



Logística Reversa e Diminuição de Consumo Energético na Produção de Garrafas de Vidro

Luiza Almeida Cruz

Monografia em Engenharia Química

Orientador

**Prof. Ladimir José de
Carvalho, D. Sc.**

Mai de 2021

LOGÍSTICA REVERSA E DIMINUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM PRODUÇÃO DE GARRAFAS DE VIDRO

Luiza Almeida Cruz

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Estevão Freire, D. Sc.

Valéria Castro de Almeida, D. Sc.

Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Orientado por:

Ladimir José de Carvalho, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 2021

Cruz, Luiza Almeida.

Logística reversa e diminuição do consumo energético na produção de garrafas de vidro/

Luiza Almeida Cruz. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

xi, p.82; il.

Monografia–UniversidadeFederaldoRiodeJaneiro,EscoladeQuímica,2021.

Orientador: Ladimir José de Carvalho.

1. Logística Reversa. 2. Vidro. 3. Consumo Energético. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ladimir José de Carvalho. I. Logística Reversa e Diminuição de Consumo Energético na Produção de Garrafas de Vidro.

“Não existe meio de verificar qual é a boa decisão, pois não existe termo de comparação. Tudo é vivido pela primeira vez e sem preparação. Como se um ator entrasse em cena sem nunca ter ensaiado. Mas o que pode valer a vida, se o primeiro ensaio da vida já é a própria vida?”(Milan Kundera)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família amada pelo cuidado e paciência, porque sem eles não seria quem eu sou e não estaria onde estou.

Agradeço a minha mãe pelo apoio, dicas e puxões de orelha, incansável na missão de aguentar minhas crises (e me zoar depois por cada uma delas); a minha querida irmã Julia, minha melhor amiga, pelo companheirismo, pelas risadas e pelo tempo disponível para ouvir meus lamentos, sempre à base de memes e muito do nosso humor peculiar; a minha irmã Laura pelo carinho quando estava cansada e triste; a meu pai pela formação da mulher que sou; a meu padrasto e irmão por me dar suporte e aguentar minha falação incessante sobre vidro.

Agradeço ao professor Ladimir pela confiança, orientação e tempo dedicados a construção desse trabalho, com meus incontáveis e-mails e dúvidas sendo sempre atenciosamente respondidos.

À Gi, minha irmã de alma; sou grata pela nossa amizade e pela parceria que construímos ao longo desses anos, incluindo aqui o Caio como bônus da nossa insubstituível conexão.

Às minhas amigas de sempre, as meninas do ZB – Gi, Let, Marininha, Helena e Melhem -, e Belzinha, por serem luz e certeza em todos os momentos, independente de tempo e distância.

À Nanda, por ser meu farol e meu porto seguro incontáveis vezes, mesmo na nossa constância de contato de uma vez por semana.

À Bordallo e Guima, por me ensinarem sobre pertencimento e conforto sem nunca pedir nada em troca, e me permitirem caminhar junto a vocês nesse caminho lindo.

Às minhas Marianas do 2V, tanto me ensinaram e acolheram que palavras não descrevem o amor que sinto por vocês. À Cerne, por me ouvir e me acompanhar em todos os momentos de UFRJ; à Mariananey por ser minha conexão de outras vidas, meu aprendizado diário e por me proporcionar crescimento em todos os momentos.

Aos meus amigos dessa loucura que é a UFRJ, Griso, Font, Adry, Paulinha, Bea, Edu, Arthur, Bibi, Mika, Floras, Sillman, Daniel, Gabriel, Vieira, Vert, Thalles, Leticia e Karine, por me acompanharem nessa jornada linda e complexa que é nossa amada Federal (bandejões e unificadas inclusos).

Aos meus cristais do DAEQ, Cris, Pedrinho, Estevão e Pietro, por me proporcionarem boas risadas e fofocas, além de um crescimento absurdo junto aos nossos perrengues de diretório acadêmico.

À Amandinha, minha certeza de apoio, companheirismo e risadas, por me permitir estar do seu lado e viver essa amizade que só me faz bem.

À Naná, por ser minha inspiração e meu modelo todos os dias, me motivar a ser o melhor de mim e compartilhar as coisas boas (e ruins) da vida comigo, sem me deixar esquecer quem eu sou e o que lutamos por.

Aos meus companheiros de trabalho, por estarem do meu lado na realização desse sonho que é a Ambev e por me darem o suporte mais do que necessário para crescer e me

desenvolver. Em especial ao time do Meio Ambiente, ao SWOT, ao Matheus, à Brunna e à Mariana.

Agradeço, por fim, à banca examinadora pela disponibilidade de estarem participando desse trabalho.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

LOGÍSTICA REVERSA E DIMINUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM PRODUÇÃO DE GARRAFAS DE VIDRO

Luiza Almeida Cruz

Maio, 2021

Orientador: Prof. Ladimir José de Carvalho, D. Sc.

Tendo em vista a relevância do uso de embalagens de vidro, a substituição do perfil de consumo para crescimento dos descartáveis e a urgência da estruturação de sistemas que priorizem a sustentabilidade ecológica e financeira da indústria vidreira, pesquisou-se sobre a estrutura de logística reversa de garrafas de vidro no país a fim de verificar os benefícios da prática no que concerne a diminuição do consumo energético do processo produtivo, bem como do consumo de matéria prima e seus custos associados, e as dificuldades em implementar um sistema eficiente no país. Para tanto, foi necessário descrever o processo e tecnologias usadas na produção de garrafas de vidro no Brasil; caracterizar o sistema de logística reversa (captação, beneficiamento e reincorporação) de vidro pós consumo em fornos industriais e analisar o impacto energético e econômico na utilização de caco no processo vidreiro atual. Realizou-se, então, uma pesquisa exploratória a partir de método bibliográfico e documental. Diante disso, verificou-se que a utilização de 60% de caco de vidro em substituição à matéria prima bruta oferece benefícios ao reduzir 18% o consumo de energia, ao passo que a análise preliminar de um forno de produção de 150 toneladas por dia demonstra a economia de 313 mil reais por ano com o menor consumo de gás natural, e 22 milhões de reais anualmente pela menor quantidade de matéria prima bruta comprada. Assim, os números de diminuição de consumo de energia com o aumento do uso de caco, do custo referente a aquisição de matérias primas brutas, da matriz energética e da manutenção a longo prazo dos fornos vidreiros são essenciais para a sustentabilidade do setor, tanto em competitividade quanto em garantia de recursos, além do impacto ambiental direto observado. No entanto, a estrutura vigente de logística reversa não atende os requisitos de quantidade e qualidade demandados pelas vidreiras, e, por isso, os benefícios são pouco aproveitados por não serem priorizados. Desse modo, se faz necessária uma reformulação do cenário vigente com o objetivo de potencializar os ganhos provenientes da reciclagem de vidro pós-consumo.

ÍNDICE

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	11
Capítulo 2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDRO	13
2.1 Matérias Primas	17
2.2 Produção de garrafas de vidro	22
2.2.1 Fornos vidreiros	23
2.2.2 Formação da garrafa	25
2.2.3 Recozimento e tratamentos superficiais	27
2.2.4 Inspeção e qualidade	28
2.2.5 Paletização e embalagem	29
2.3 Consumo energético no processo vidreiro	30
Capítulo 3 – LOGÍSTICA REVERSA DE EMBALAGENS DE VIDRO	34
3.1 Logística Reversa no Brasil	38
3.2 Captação de Vidro Pós Consumo	43
3.3 Beneficiamento de caco	49
Capítulo 4 – LOGÍSTICA REVERSA E CONSUMO ENERGÉTICO: RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Impacto da utilização de caco no consumo energético de fornos	59
4.2 Análise econômica	64
4.3 Oportunidades para o setor	68
Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
Capítulo 6 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	73
Capítulo 7 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Processo de solidificação de sólidos cristalinos e amorfos	14
Figura 2	Evolução da produção física industrial de embalagens por indicadores especiais	15
Figura 3	Materiais de embalagem alimentícias por peso em 2016	16
Figura 4	Materiais para embalagem de bebidas por peso em 2016	16
Figura 5	Materiais de embalagem de alimentos e bebidas por valor em 2016	17
Figura 6	Diagrama de fases entre Na ₂ O e SiO ₂	18
Figura 7	Resumo do Processo de Produção de Garrafas de Vidro	23
Figura 8	Representação de forno contínuo de vidro	24
Figura 9	Representação do feeder	24
Figura 10	Formação e corte das gotas	26
Figura 11	Processo <i>Blow and Blow</i>	26
Figura 12	Processo <i>Press and Blow</i>	27
Figura 13	Defeitos comuns em garrafas de vidro: (a) Dobra, (b) Fissura, (c) Poleiro	28
Figura 14	Desagregação dos consumos e custos energéticos	31
Figura 15	Partição do consumo de gás natural em planta vidreira	31
Figura 16	Partição do consumo de energia elétrica em planta vidreira	33
Figura 17	Ciclo de vida do vidro	35
Figura 18	Canais de distribuição de bens descartáveis	36
Figura 19	Cadeia de logística reversa de embalagens e seus respectivos atores	39
Figura 20	Evolução da situação da disposição inadequada no país	42
Figura 21	Catador de vidro realizando transporte de material em bicicleta	46
Figura 22	Disposição de vidro pós consumo na cooperativa Mazetto	47
Figura 23	Sistema de scraper de rejeito de vidro de área quente	49
Figura 24	Inclusão vítrea (a) e defeito de corda (b) visualizadas por microscópio ótico	51
Figura 25	Catação manual em processo semiautomatizado de beneficiamento de caco	52
Figura 26	Usina automatizada de beneficiamento de caco na Vidroporto	53
Figura 27	Resumo esquemático do balanço de energia em fornos vidreiros	61
Figura 28	Relação entre energia de fusão (em MJ/kg de vidro) e % de caco em fornos	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Composição típica de garrafas de vidro	19
Tabela 2	Valores de venda para diferentes colorações de caco	47
Tabela 3	Economiasde energia (em kJ/kg de vidro) devido ao uso de caco	63
Tabela 4	Preços de compra de insumos vidreiros	67

LISTA DE SIGLAS

ABIVIDRO	Associação Brasileiras das Indústrias de Vidro
ABRABE	Associação Brasileira de Bebidas
ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BB	<i>Blow and Blow</i>
CBO	Classificação Brasileira de Ocupações
CDD	Centro de Distribuição
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GGC	Glass Global Consulting
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GNL	Gás Natural Liquefeito
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MNCR	Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis
NNPB	<i>Narrow-Neck Press and Blow</i>
PB	<i>Press and Blow</i>
PEB	Ponto de Entrega Bonifica
PET	Polietileno Tereftalato
PEV	Ponto de Entrega Voluntária
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Tg	Temperatura de Transformação

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Um dos principais pontos de estudos e desenvolvimento tecnológico na indústria de alimentos é a questão das embalagens. A necessidade de utilização de materiais inertes, resistentes e funcionais consolidou o uso do vidro como elemento básico de envase de artigos alimentícios. O vidro oco é visto como superior a seus concorrentes, como latas, polietileno tereftalato (PET) e cartão (*tetrapack*), tendo em vista o isolamento entre produto e ambiente, e a manutenção do conteúdo sem alterações. (BNDES, 2007).

Cabe salientar que o vidro é material inteiramente reciclável, seja por sua reutilização ou sua reincorporação ao processo vidreiro nos fornos industriais. No que tange ao uso de vidro reciclado na produção de novos artigos, são notáveis as suas vantagens, seja no âmbito econômico ou de sustentabilidade. A Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (2019) ressalta que “com um quilo de vidro se faz outro quilo de vidro, sem emissão de CO₂ para o meio ambiente. Além da vantagem do reaproveitamento do caco, a reciclagem permite poupar matérias-primas e energia.” Segundo a mesma, a utilização de 10% de caco significa ganho energético de até 4% do total da produção.

Ademais, segundo o Bradesco BBI (2019), há um perfil de aumento do consumo de garrafas de vidro descartáveis em relação às retornáveis, significando, pois, um maior volume de geração de cacos ditos pós consumo. Associado a projeção de instabilidade do fornecimento de gás natural e barrilha – matérias-primas base do processo vidreiro - a nível Brasil, que é extensivamente dependente da importação desses insumos industriais (BNDES, 2007), urge a necessidade de reforço da cadeia de logística reversa de garrafas de vidro em prol da utilização desse maior volume de caco nos fornos ativos no país.

Diante disso, o presente trabalho se propõe a estudar e entender a política de reciclagem e de logística reversa de garrafas de vidro pós consumo no país, de modo a analisar o impacto desse sistema na diminuição de consumo energético e de matéria prima no processo de produção vidreiro.

Para tanto, foram delineados os seguintes objetivos:

- Descrever o processo e tecnologias usadas na produção de garrafas de vidro no Brasil;
- Caracterizar o sistema de logística reversa (captação, beneficiamento e reincorporação) de vidro pós consumo em fornos industriais
- Analisar o impacto energético e econômico na utilização de caco no processo vidreiro atual.

Parte-se da hipótese de que a utilização extensiva de cacos de vidro proveniente de um sistema de logística reversa fundamentado e de qualidade é essencial para a manutenção da indústria de garrafas de vidro no país, tendo em vista a diminuição considerável no consumo energético, bem como a sustentabilidade associada às práticas.

Assim, foi realizada uma pesquisa exploratória a partir de método bibliográfico e documental, com base em documentação indireta e análise de dados qualitativa para viabilizar o estudo e fundamentação da hipótese levantada.

No primeiro capítulo, são descritas todas as etapas do processo de fabricação de vidro, com ênfase em garrafas para utilização na indústria alimentícia. São exploradas as matérias primas utilizadas, bem como tecnologias e metodologias em práticas na produção vidreira do país. Por fim, é analisado o consumo energético em fábricas de vidro.

No segundo capítulo, realiza-se estudo da logística reversa no Brasil, com foco no sistema de captação de garrafas de vidro pós consumo. Ademais, é analisado o beneficiamento do caco captado, bem como a qualidade requisitada para a utilização dessa matéria prima no processo vidreiro.

No terceiro capítulo, há a análise da correlação entre o sistema de logística reversa de caco e o consumo energético e de matéria prima na fabricação de garrafas de vidro. O estudo contempla a análise econômica, energética e de sustentabilidade das práticas.

Ao final, pode-se inferir que os objetivos propostos no trabalho são atendidos e que a hipótese levantada no presente capítulo se faz pertinente, de modo a incentivar o desenvolvimento, em termos de abrangência e tecnologia, do ciclo completo de utilização de cacos de vidro, com ênfase em um sistema efetivo de logística reversa.

Capítulo 2 -PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDRO

A história da fabricação e utilização de vidro é antiga e acompanha intimamente o desenvolvimento da sociedade ao longo dos anos. Não se sabe exatamente de que forma foi descoberta a produção artificial de artigos vítreos; a versão mais aceita pela comunidade científica, no entanto, aponta que o descobrimento foi resultado de subprodutos da metalurgia ou como evolução do desenvolvimento de materiais cerâmicos. (RASMUSSEN, 2012)

Ainda assim, egípcios já utilizavam vidro em adornos e contas coloridas em 7000 A.C., tal qual os “homens da caverna” confeccionavam algumas de suas ferramentas e armas utilizando material vítreo (SHELBY, 2005). Esses pequenos artigos de vidro eram resultantes da fragmentação de rochas, como obsidianas e quartzos, de modo com que sua dificuldade de obtenção e manipulação resultasse na valorização do elemento, considerado por muito artigo de luxo. (MAIA, 2003).

Somente com a invenção da técnica de sopro, em meados do primeiro século A.C., que houve uma expansão da aplicação de vidro na sociedade. Segundo Maia (2003), o que antes era visto como luxuoso, passou a ser material de utilidade doméstica, uma vez que o desenvolvimento tecnológico possibilitou a disponibilidade de utensílios de vidro a preços populares e em maiores quantidades. Além disso, a qualidade de garrafas, copos e vasos vítreos aumentou drasticamente com o advento do sopro, consolidando ainda mais o elemento como material de manufatura. (SHELBY, 2005).

Como consequência para essa popularização, a aplicação de vidros é consideravelmente abrangente na realidade atual. Steven Johnson escreve em seu livro que “um mundo sem vidro atacaria a base do progresso moderno”(JOHNSON, 2021). De fato, a sociedade contemporânea utiliza materiais vítreos para os mais diversos usos, perpassando desde a indústria de alimentos, construção civil e farmaceutica, até as específicas indústrias de vidro especial e técnico. Desse modo, fomenta-se a constante inovação e estudo do material e sua fabricação.

Em adição, cabe destacar que, ainda que cotidiano, o vidro é um material complexo, o que justifica a profundidade de estudos. Essa complexidade provém de suas características físico-químicas, nas quais sua aparência sólida se manifesta em suas propriedades mecânicas de rigidez, elasticidade e possibilidade de fratura, em contraste com o fluxo viscoso que o vidro apresenta, similar a um estado líquido. (ZANOTTO, 2017)

Essa dualidade de características físico-químicas o qualifica como líquido super-

resfriado. Esse resfriamento ocorre na ausência de núcleos de cristalização, atingindo o Estado vítreo após superada a Temperatura de Transformação vítrea (T_g). Essa T_g é resultante da mudança de inclinação da curva de resfriamento de materiais líquidos, sem definição termodinâmica, e diferencia materiais vítreos de cristais em seu processo de formação, como pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Processo de solidificação de sólidos cristalinos e amorfos



Fonte: Callister (2008)

Por conseguinte, contrariamente a cristais, materiais vítreos são caracterizados por sua desorganização de estrutura cristalina, se delimitando como um sólido amorfo. Dessa forma, não possui ponto de fusão e, por isso, quando aquecido, amolece gradualmente até ter sua viscosidade reduzida. Essa característica permite a fabricação de diversos tipos de vidros e utensílios com esse material.

Em se tratando de outros atributos intrínsecos ao vidro, cabe destacar a não estabilidade em altas temperaturas, podendo ocorrer Desvitrificação – processo em que, ao expor o vidro a temperatura acima de seu ponto de amolecimento durante longos períodos de tempo, o mesmo fica sujeito a cristalização. Além disso, é mau condutor de calor e eletricidade.(MAIA, 2003).

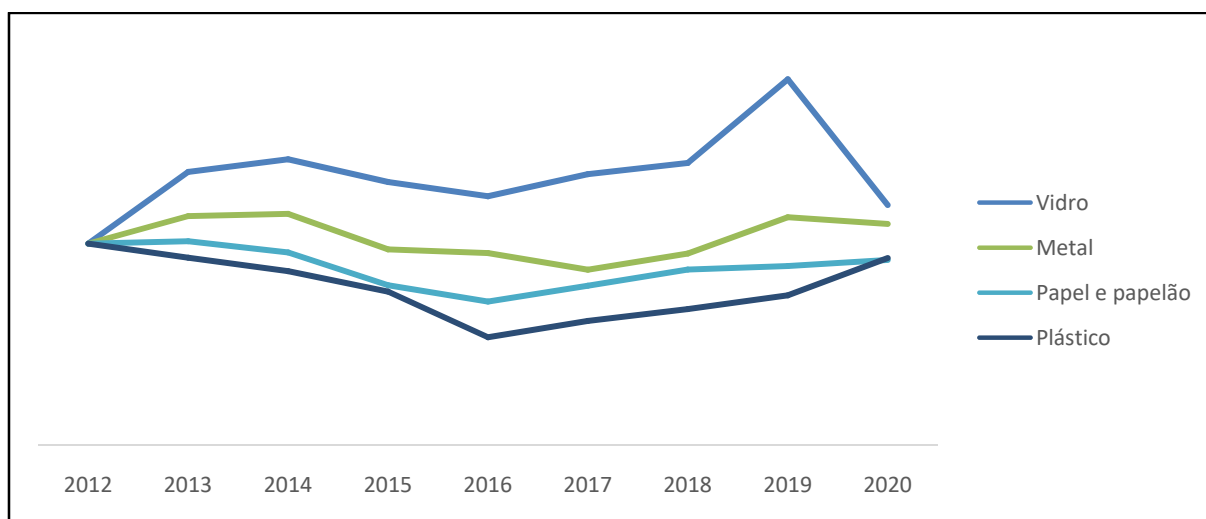
Portanto, pode-se inferir que a dificuldade de definição do que é um vidro é consequência direta da sua complexidade físico-química. A definição trazida por Samuel Berg

Maia, delimitando vidro como “produto inorgânico resultante de uma fusão que resfriou até um estado rígido sem haver cristalização”, atende com certa abrangência as particularidades de um material vítreo e está alinhada com o escopo do presente trabalho.

Ainda que material de complexa fisico-química, sua utilização em manufatura é consolidada. Isso porque inúmeras particularidades de utensílios de vidro os destacam de outros materiais. Primeiramente, evidencia-se sua durabilidade devido a forte rede de ligações sílica-oxigênio de sua composição, de modo com que objetos de vidro durem por séculos sem sofrer alterações. Além disso, sua transparência pode ser utilizada com grande eficácia para transmissões ópticas, e sua estabilidade mecânica e térmica, somados a predominância elástica a temperatura ambiente, tornam o vidro material ideal para superfícies submetidas a algumas condições extremas. (MORSE, 2016).

Esse destaque de artigos de vidro para a confecção de embalagens é explicitada em análise comparativa com outros materiais. De acordo com dados do IBGE relativos a Produção Física Industrial de embalagens no país, pode-se perceber que, com o decorrer do tempo, há aumento gradativo da produção e utilização de vidro como matéria prima de invólucros, como visto na figura 2 a seguir (IBGE, 2021).

Figura 2 - Evolução da produção física industrial de embalagens por indicadores especiais



Fonte: IBGE (2021)

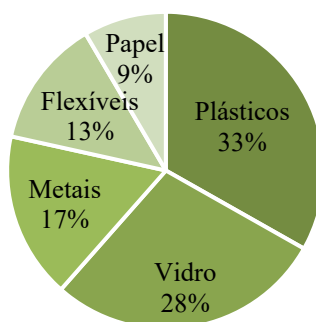
Ademais, utilizar vidro enquanto embalagem possui a vantagem de ser um material inerte e impermeável, de modo com que não interaja com as bebidas e alimentos as quais há o armazenamento, além de conservar os produtos de interações com ambiente e aumentar sua

vida útil. Complementarmente, artigos de vidro podem ser submetidos a processos de esterilização, requisitados em certos bens alimentícios, como cervejas. (PARISI, 2013).

À vista disso, a utilização de embalagens de vidro oco se destaca frente às suas concorrentes na indústria de alimentos, principalmente no que concerne ao setor de bebidas. Com intuito de visualização dessa tendência, foram utilizados dados disponibilizados pela Datamark relativos ao ano de 2016 para ilustrar a importância dos artigos de vidro para a indústria de embalagens, tendo em vista que números mais recentes com segmentação por setor não foram possíveis de ser acessados em bases gratuitas e confiáveis até a finalização do presente estudo.

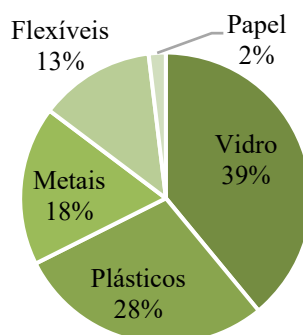
Esses dados da Datamark para 2016 mostram que 28% das embalagens utilizadas em bebidas e alimentos são feitas de vidro, enquanto que, apenas para bebidas, o *share*¹ de artigos vítreos aumenta para 39% em peso.

Figura 3 - Materiais de embalagem alimentícias por peso em 2016



Fonte: Datamark (2016)

Figura 4 - Materiais para embalagem de bebidas por peso em 2016



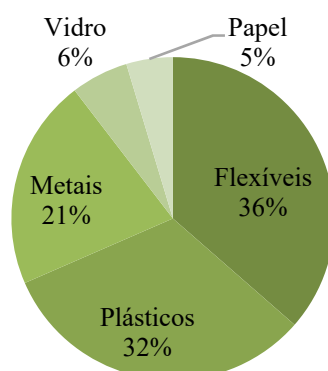
¹Share indica o grau de participação de determinado produto no total da segmentação estudada, semelhante a porcentagem relativa ao todo.

Fonte: Datamark (2016)

Cabe destacar também, que para bebidas alcóolicas, há predominância de embalagens de vidro, chegando a 68% em peso em 2016, segundo a Datamark. Isso pode ser explicado pela conservação das propriedades organolépticas proporcionada pela impermeabilidade do vidro, tendo em vista que bebidas fermentadas são sensíveis a oxigenação e decarbonatação enquanto em armazenamento.

Além disso, os dados levantados em 2016 pela Datamark mostram que, na distribuição por valor dos materiais de embalagem de alimentos, o vidro se encontra como o segundo menor em custos relativos, representando cerca de 6% do valor total. Desse modo, é notável que a confecção de materiais vítreos para a indústria alimentícia se torna questão de redução de custos e, então, aumento do valor agregado do produto final.

Figura 5 - Materiais de embalagem de alimentos e bebidas por valor em 2016



Fonte: Datamark (2016)

Outro ponto de vantagem dos artigos de vidro na indústria reside na sua capacidade de reciclagem e reutilização. As embalagens produzidas podem ser utilizadas inúmeras vezes após o primeiro consumo, com foco nas garrafas retornáveis predominantes na indústria de bebidas; já os cacos oriundos da quebra nos processos de envase ou pós-consumo podem ser 100% reciclados ao introduzi-los como matéria-prima nos fornos de produção de vidro.

Assim, a indústria vidreira se torna ecologicamente sustentável por diminuir o volume de rejeitos em lixões e aterros, além de contribuir para a redução de consumo energético e de insumos ao utilizar o caco como matéria prima. (ABIVIDRO, 2019)

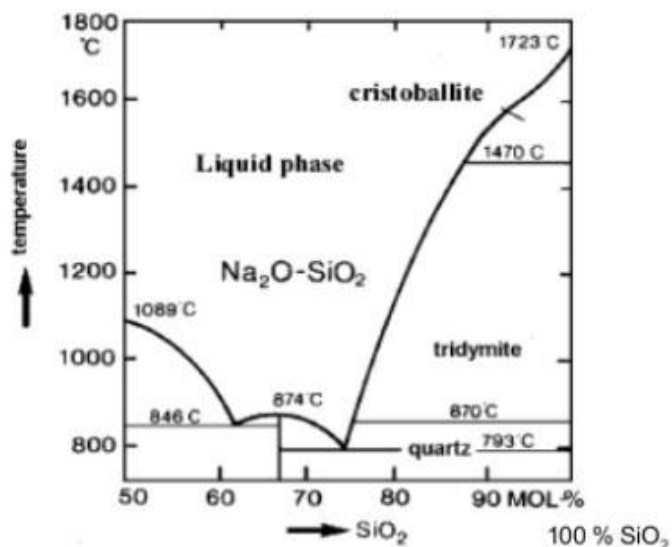
2.1 Matérias primas

O processo industrial de confecção de vidro se trata da mistura, fusão e posterior solidificação controlada de diversas matérias primas em forno refratário. Essas matérias primas que constituem o vidro comercial são majoritariamente compostos de óxidos, uma vez que materiais vítreos se encaixam na categoria de produtos cerâmicos. Esses óxidos que constituem a massa vítrea podem ser classificados em 4 tipos, referentes a suas funções na fabricação do artigo: vidro-formadores, fluxos ou fundentes, estabilizadores, e óxidos acessórios.

Os óxidos vidro-formadores são os elementos-base da formação da rede estrutural do vidro. Quimicamente, esses compostos possuem átomos com altos números de coordenação e capazes de se ligar a mais quatro átomos de oxigênio, sendo, assim, o elemento de maior porcentagem na composição do vidro formado. O principal óxido utilizado na confecção de garrafas de vidro é o óxido de silício (SiO_2), de modo com que a ampla maioria do vidro empregado na indústria é classificado como vidro silicato.

Os compostos chamados fluxos ou fundentes desempenham o papel de diminuir a temperatura de fusão das matérias-primas aplicadas no processo, tendo em vista que a formação de vidro de sílica pura demandaria valores acima de 2000°C para sua fusão e confecção. Em vista da incapacidade econômica e tecnológica de chegar a esses patamares de temperatura, adicionam-se óxidos fundentes para redução da energia necessária para fundir e misturar os demais óxidos que darão origem ao material vítreo. A ação do Na_2O como fundente pode ser vista na figura 6 a seguir, na qual ilustra o diagrama de fases do óxido de sódio e a sílica e seu ponto eutético.

Figura 6 - Diagrama de fases entre Na₂O e SiO₂



Fonte: ICG/EFONGA (2009)

No entanto, a adição de fundentes tende a gerar vidros de resistência química reduzida, uma vez que há a degradação de propriedades físico-químicas da rede formada. Para contornar essa problemática, adicionam-se os óxidos conhecidos como estabilizadores, ou modificadores, que atuam na melhoria das características do vidro que foram afetadas pelos óxidos fundentes, conferindo maior resistência e estabilidade ao material de acordo com a quantidade desses elementos que é adicionada a matéria-prima.

Ademais, são adicionados ao processo produtivo óxidos ditos como acessórios. Essa classificação engloba os colorantes e os agentes afinantes, sendo os primeiros óxidos acrescentados na composição química da fusão com o intuito de conferir cor ao vidro final, enquanto que os segundos têm a função de promover a remoção e desprendimento de bolhas de CO₂ do material fundido. Ambos os tipos de óxidos estão presentes em pequenas quantidades na mistura. (MAIA, 2003; SHELBY, 2005)

Em se tratando de produção de garrafas, temos a confecção de vidro do tipo alcalino, cujo elemento majoritário é o silicato, óxido vidro-formador característico. Além do SiO₂, cabe ressaltar a presença de óxido de sódio (Na₂O), utilizado como agente fundente; óxido de alumínio, que também se comporta como vidro-formador e é agregado a fusão na forma de silicato duplo de alumínio; óxido de cálcio, principal estabilizador/modificador utilizado na indústria vidreira.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DE GARRAFAS DE VIDRO

Material	Porcentagem
SiO₂	70%
Na₂O	15%
CaO	11%
Al₂O₃	2%
Outros componentes	2%

FONTE: MAIA, 2003

As matérias primas utilizadas para alcançar essa composição química do vidro são, em grande maioria, comerciais e naturais. São comumente empregados no processo de fusão de materiais vítreos a areia, a barrilha, o calcário e o feldspato, além de óxidos colorantes (a depender da garrafa a ser produzida). Todos os óxidos que servem de componentes da massa de vidro são obtidos pela degradação dos carbonatos adicionados como matéria prima, de modo com que haja a formação de CO₂ nos fornos produtivos.

A areia é a matéria prima principal e mais importante na produção de vidro. Ela se comporta como fonte majoritária de dióxido de sílica (silicato), vidro-formador usado no processo vidreiro. Esse material é encontrado em depósitos naturais, devido à presença abundante na superfície do planeta, mas precisa ser submetido a etapas de purificação prévias. Isso porque, nesses depósitos, a areia está associada a certo teor de impurezas que podem afetar a formação do vidro, principalmente óxidos de ferro. (MAIA, 2003; SHELBY, 2005; PFAENDER, 1996)

Cabe destacar que a areia é capaz de formar vidro mesmo se usada isoladamente nos fornos, isto é, como única matéria prima. A utilização de outros óxidos na composição da massa vidreira comercial é oriunda da inviabilização energética e econômica da produção de artigos de sílica pura, tendo em vista seus altos valores de temperatura requeridos para a fusão do material e, portanto, altos gastos com energia térmica para o alcance dessa temperatura de processo.

O sódio necessário a formação de vidro comercial é obtido pela adição de barrilha, isto é, carbonato de sódio comercial. Também conhecida como Barrilha Densa Vidreira, a matéria prima é de obtenção majoritária via importação, tendo em vista o alto custo do processo de formação Solvay e as poucas reservas naturais do componente no país. (MAIA, 2003). Por isso, a barrilha representa cerca de 60% do valor total dos insumos da produção de garrafas de vidro. (ROSA, 2007).

No que concerne o calcário, o material é encontrado na natureza como a própria rocha,

mármore ou gesso. Para a fabricação de embalagens de vidro, esse calcário se apresenta na forma de dolomita, exercendo o papel principal de fonte de cal. Essa cal atua como fundente, aumenta insolubilidade e resistência e reduz a fragilidade do vidro. (SAMPAIO & ALMEIDA, 2008).

Cabe destacar que, tanto a barrilha quanto o calcário, quando submetidos às altas temperaturas dos fornos, passam por um processo de decomposição térmica, de modo com que se obtenham os compostos óxidos usados na formação estrutural do vidro e a geração de gás carbônico. Com isso, são liberados teores de dióxido de carbono proveniente desse processo, escapando pelo precipitador eletrostático presente na planta industrial.

Já o feldspato se comporta como fonte principal de óxido de alumínio para o processo vidreiro, obtido na forma de silicato duplo de alumínio. É utilizado dessa forma por diversas razões, dentre as quais cabe destacar a constante composição da matéria prima, teores reduzidos de ferro, a ausência de constituintes voláteis e dissolução rápida nas matérias primas em fusão. (MAIA, 2003). O alumínio pode, então, exercer seu papel de aumentar a resistência química e a viscosidade do vidro em temperaturas mais baixas. (PFAENDER, 1996)

As diferentes colorações vistas em garrafas de vidro são obtidas já na etapa de determinação das matérias primas. Os chamados agentes colorantes são os óxidos ou compostos à base de enxofre que deixam o meio redutor, utilizados para a composição da diversa gama de possibilidades, com destaque para as garrafas de vidro âmbar, verde e *Flint* (transparente), mais comercializadas na indústria atual. Esses óxidos são os únicos elementos utilizados puros no processo, e são compostos por elementos de transição 3d ou terras raras 4f. Pequenas quantidades desses colorantes são adicionadas diretamente a mistura de matérias primas previamente a introdução no forno. (JAIME, 2007)

Para determinação de qual desses elementos será utilizado como colorante, deve-se levar em consideração o tipo de garrafa a ser produzido. O vidro âmbar, mais comum na indústria de bebidas, adiciona sulfato de sódio, carvão e óxido de ferro como matérias primas; já o vidro verde tem como composto colorante o óxido de cromo; e o vidro *Flint*, nome dado ao vidro transparente, é proveniente da mistura de óxido de selênio e óxido de cobalto.

Por fim, ainda que não considerado efetivamente como matéria prima por ser resíduo do produto acabado, pode-se destacar a utilização de caco de vidro na mistura a ser fundida. O material é adicionado às matérias primas em etapa anterior a inserção no forno de modo homogêneo, e tem como principal função a diminuição da utilização dos componentes brutos.

Dessa forma, há compensação econômica pela diminuição de gastos com matérias primas, além da menor quantidade de energia necessária no processo de fusão da mistura.

O caco de vidro usado pode ser classificado em três grupos: material gerado na própria vidraria e, assim, de mesma composição química; material produzido em outra fonte geradora e que deve ter sua composição analisada para efeitos de cálculo de processo; além do material provindo de origens desconhecidas, oriundos da reciclagem e de sistema de logística reversa, também conhecido como cacos pós-consumo. (JAIME, 2007)

O caco utilizado, portanto, precisa passar por controle de qualidade antes de ser inserido no processo. Isso porque, especialmente em cacos pós consumo, pode-se observar impurezas misturadas no material. Essas impurezas podem influenciar na formação dos artigos, em destaque para garrafas, dependendo da sua natureza: a presença de porcelanas oriundas do caco pós consumo contaminado é propagada no processo produtivo pois suas temperaturas de fusão não são alcançadas nos fornos. Com isso, é notável que cacos não beneficiados acarretam os principais problemas de qualidade relacionados a formação de garrafas de vidro.

Todas as matérias primas explicitadas devem ter sua composição química e granulometria testadas e conhecidas antes de serem utilizadas no processo vidreiro. Com base nos resultados de análises químicas, pode ser necessária a correção da composição das matérias-primas brutas devido a variação natural a qual esse tipo de material é sujeito. Os agentes colorantes são adicionados e homogeneizados a areia para haver distribuição uniforme de cor em toda a massa do vidro.

Além disso, é essencial o cuidado no armazenamento dos elementos a serem utilizados, protegendo-os de intempéries e de contaminação. Os lotes de matérias primas são armazenados conforme a previsão de utilização no forno para não haver grandes estocagens de produto e, assim, ocorrer degradação do material. Adicionalmente, para prevenir a segregação prévia, as misturas são preparadas com porcentagem de umidade entre 2 e 4%. (MAIA, 2003; PFAENDER, 1996)

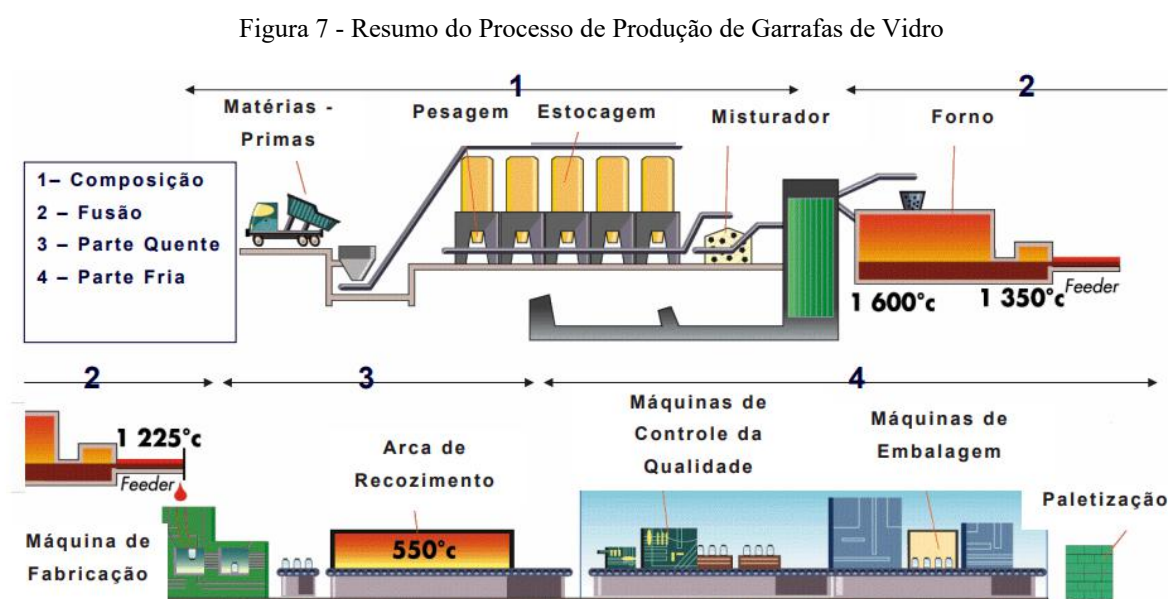
2.2 Produção de garrafas de vidro

A produção de artigos de vidro se popularizou com o advento da tecnologia do sopro. Esse método manual de formação de produtos de vidro oco foi o principal a ser utilizado na

indústria até 1903, ano em que foi criada a primeira máquina automática de sopro por Michael Owens. Já no século XX, garrafas de vidro passaram a ser obtidas por técnicas mecanizadas e se firmaram como principal embalagem utilizada na indústria de alimentos. (PFAENDER, 1996)

As fábricas atuais dessas embalagens possuem as mais variadas localizações e configurações de seus aparatos, podendo apresentar diferentes números de fornos e capacidades de fusão para alimentação de maquinário. Sendo o principal equipamento de uma planta vidreira, a produção de artigos é dependente do tipo e do rendimento dos fornos disponíveis para fusão e obtenção da massa de vidro a ser utilizada no processo. (AMORIM, 2019).

A figura a seguir esquematiza todo o processo de fabricação de garrafas de vidro, englobando todas as suas etapas, desde o recebimento das matérias primas até a paletização das embalagens.



Fonte: Mansano (2007)

2.2.1. Fornos vidreiros

O forno vidreiro tem como objetivo atingir temperatura de processamento mais alta que a obtida ao ar livre (MULLINGER; JENKINS, 2014), chegando a valores de 1500 a 1600°C. Esses altos patamares de temperatura são necessários para a ocorrência das reações químicas entre matérias-primas e para a redução da viscosidade do vidro fundido. (MAIA,

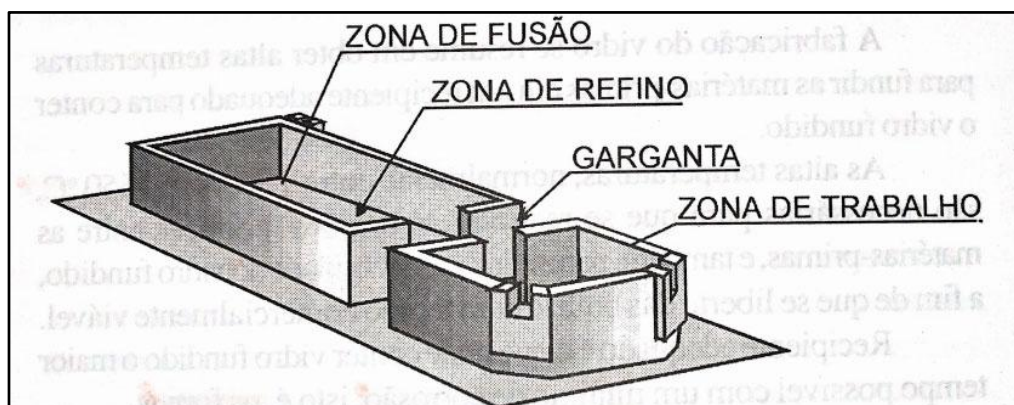
2003). Os fornos podem ser classificados por sua taxa de extração, tipo de vidro derretido e o produto almejado, sendo as duas mais abrangentes subdivisões explicitadas pela Glass Global Consulting (GGC, 2019).

Segundo a GGC, existem dois grandes tipos de fornos de fusão: os fornos de potes (em inglês, *potfurnaces*) e os fornos de tanque (em inglês, *tankfurnaces*). Os primeiros são estruturas refratárias de menores aportes, utilizados em processos batelada de fabricação de sopro manual de vidro; enquanto que os últimos são fornos de fabricação contínua, usados na alimentação de máquinas de formação automática de vidro. Esses fornos de tanque são os empregados na indústria de garrafas, e podem ser subdivididos por suas características de alimentação energética em regenerativos, recuperativos e elétricos (MAIA, 2003).

Esses fornos de fluxo contínuo operam em regime ininterrupto, 24 horas por dia, e tem tempo de vida útil de 8 a 10 anos (MAIA, 2003). Após esse período, recomenda-se a reforma do mesmo, tendo em vista que o material refratário sofre desgaste natural devido as condições adversas a qual o forno é submetido. A vida útil dos fornos pode ser otimizada em caso de aplicação de boas práticas de utilização, como poucas variações de temperatura de fundo, estabilização do nível do forno, entre outros.

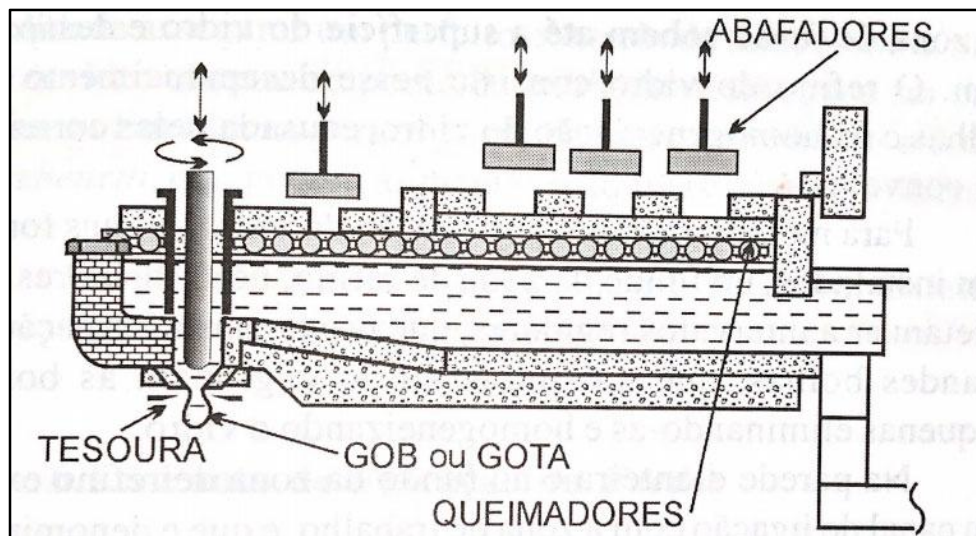
Em fornos do tipo contínuo, há o zoneamento de sua área de trabalho. De acordo com Maia (2003) e Jaime e Dantas (2009), as principais zonas do forno são a de fusão, a de refino, a garganta e o alimentador. Cada uma desempenha uma função específica e estão explicitadas nas imagens abaixo.

Figura 8 - Representação de forno contínuo de vidro



Fonte: Maia (2003)

Figura 9 - Representação do *feeder*



Fonte: Maia (2003)

A zona de fusão (ou enforna) é a responsável pela alimentação das matérias primas no processo e início do processo de derretimento dos componentes para formação da massa de vidro. Dessa forma, há o aumento da temperatura a patamares próximos de 1400 graus, iniciando as reações químicas e o consequente desprendimento de vapor d'água e outros compostos.

Na zona de refino (ou homogeneização), há a retirada dos gases formados na região anterior pelo carreamento das bolhas formadas na massa de vidro. Essas bolhas também são responsáveis pela homogeneização, tendo em vista as correntes de convecção formadas. Algumas fábricas possuem borbulhadores acoplados aos fornos nessa zona, injetando ar a intervalos regulares com o intuito de formar grandes bolhas para realizar esse processo. Há, também, a diminuição da viscosidade do vidro e aumento de temperatura.

É na garganta, ou zona de condicionamento, que há o gradual abaixamento de temperatura do vidro fundido para valores de trabalho de moldagem, em torno de 1100°C. Esse gradiente esperado é realizado por pequenos queimadores e abafadores, cuja função é assegurar o controle efetivo da temperatura da massa vidreira. Tendo em vista que a qualidade da garrafa produzida está intimamente ligada a um condicionamento eficiente do material, sem heterogeneidades térmicas, a zona da garganta é uma das mais importantes e estudadas na operação de um forno vidreiro.

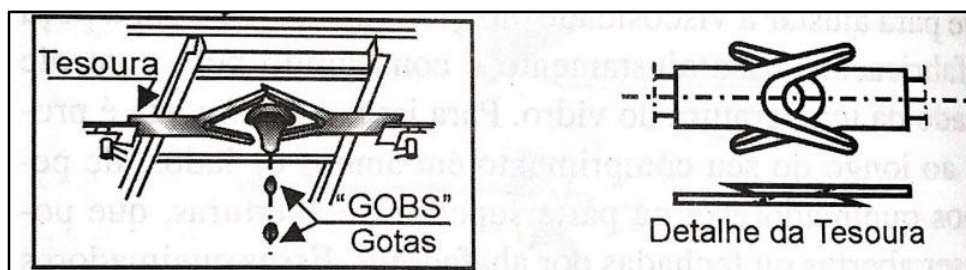
Por fim, o alimentador (ou *feeder*) consiste em uma bacia de refratário com orifício no fundo no qual, pela ação da gravidade, há a saída do vidro, também conhecida como extração.

Há também punções de refratário cujo objetivo é o controle do fluxo que irá alimentar o maquinário posterior, realizado por seu movimento e posicionamento em relação a estrutura da zona.

2.2.2. Formação da garrafa

Na indústria de vidros de embalagem, o *feeder* irá realizar a alimentação das máquinas de seção individual (do inglês, *Individual Section Machine*, ou *IS Machine*), que formarão a garrafa ou o artigo desejado. Durante o movimento descendente dos punções do *feeder*, há a formação da gota, isto é, da massa de vidro que será cortada pelas tesouras e irá ser moldada no produto. De acordo com o ajuste feito na altura dessa punção e nos diâmetros do orifícios, pode-se obter gotas de diferentes pesos. A seguir, imagem que esquematiza o processo de formação e corte da gota.

Figura 10 - Formação e corte das gotas

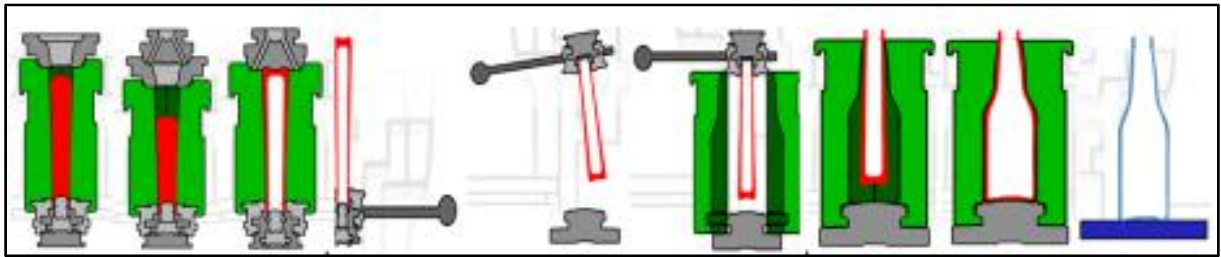


Fonte: Maia (2003)

No que concerne o processo de fabricação de garrafas de vidro, são conhecidos três diferentes tipos na indústria: soprado-soprado (em inglês, *blowandblow*(BB)), prensado-soprado (em inglês *pressandblow* (PB)) e o prensado-soprado-gargalo-esteiro (em inglês, *narrow-neckpressandblow* (NNPB)). Eles se diferenciam nas fases de formação do artigo, nos equipamentos e nos produtos objetivados a serem produzidos.

O processo BB é caracterizado pelo uso de ar comprimido nas duas fases de moldagem. Esse método forma garrafas de diversos tipos e usos, tendo em vista que é usado para a produção de artigos de maiores pesos e de gargalos de menores diâmetros. As principais etapas são ilustradas na figura a seguir e são descritas na sequência, de acordo com Verallia (2021) e Jaime e Dantas (2009):

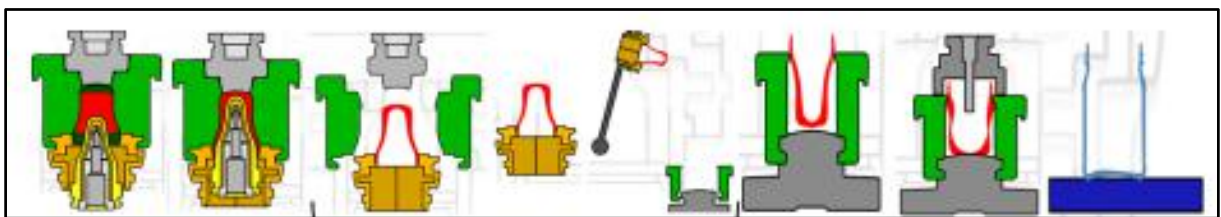
Figura 11- Processo *Blow and Blow*



Fonte: Verallia (2021)

O processo PB se diferencia do BB pela formação do *parison*, isto é, primeira fase da moldagem. No processo BB, o *parison* é formado a partir do sopro; enquanto que para o PB, essa etapa é realizada por meio da prensagem através de um punção móvel. O tipo PB é utilizado principalmente para embalagens de paredes finas, formando garrafas mais leves e de produção mais rápida. As principais etapas são ilustradas na figura a seguir e são descritas na sequência, de acordo com Verallia (2021) e Jaime e Dantas (2009):

Figura 12 - Processo *Press and Blow*



Fonte: Verallia (2021)

Já o processo NNPB tem suas etapas de produção similares às do processo PB, com diferenciação no tamanho e diferença do pino usado na prensagem. Dessa forma, pode-se obter garrafas de gargalo mais estreito e de menor peso. Essa redução de peso é oriunda da melhor e mais homogênea distribuição de vidro pelo produto final, sem comprometer características intrínsecas de resistência mecânica e física, de modo com que o desenvolvimento desse processo seja considerado um dos principais saltos tecnológicos para a generalização do uso de embalagens de vidro na indústria alimentícia. (JAIME, 2009).

2.2.3. Recozimento e tratamentos superficiais

Após a confecção propriamente dita, com auxílio de sistema de transporte compostos

por esteiras, as garrafas formadas passam por etapa de recozimento. Isso consiste em aquecer o vidro até temperatura suficiente para liberação das tensões internas presentes na estrutura devido ao resfriamento rápido e irregular ocorrido, procedido de esfriamento controlado para induzir um mínimo de tensões e esforços permanentes. Ocorre em equipamentos chamados de *Lehr*, e duram cerca de 40 minutos a 1:30 hora, dependendo do artigo produzido.

Além do recozimento, a garantia de resistência mecânica alta é obtida por tratamentos superficiais das embalagens, lançando mão de tratamentos a quente (*Hot End Coating*) e a frio (*Cold End Coating*). Tem como objetivo aplicar revestimentos poliméricos nas garrafas, de modo com que haja a minimização dos impactos dos danos físicos sofridos nas embalagens, desde a moldagem até o embalamento.

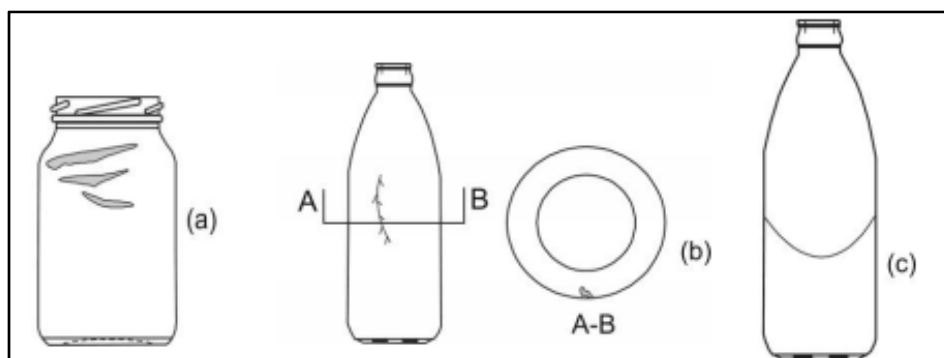
O tratamento a quente tem o intuito de aumentar a dureza superficial do vidro, realizando aspensão de solução de cloreto de estanho ou de titânio sobre a garrafa ainda quente, antes do recozimento. Já o tratamento a frio almeja a redução do coeficiente de atrito da superfície do vidro, a partir da aspensão de solução à base de polietileno glicol, ácido oleico ou ácido esteárico logo após a saída do *Lehr*. (JAIME, 2009).

2.2.4. Inspeção e qualidade

Após todos os tratamentos aos quais são submetidas as garrafas, há a etapa de inspeção dos produtos. Essa verificação pode ocorrer de forma manual, com inspeção visual realizada pela operação fabril, ou mecanizada, com o auxílio de equipamentos chamados inspetores. Esses inspetores contam com sistema de captação óptica das garrafas e comparação com modelos pré-definidos, realizando automaticamente o descarte de artigos defeituosos. Esse descarte é apoiado por sistema de código de pontos, ou *cavity identification device*, localizado no calcanhar da garrafa, identificando pelo número do molde da qual é oriunda. (JAIME, 2009)

Paralelamente, geralmente são realizados testes de qualidade por meio de amostragem aleatória de garrafas. Esses testes, performados manualmente pela operação da área de qualidade, testam propriedades físicas e mecânicas dos artigos, como quebra por pressão e dimensionamento, e procuram por possíveis defeitos na fabricação. Alguns desses defeitos são explicitados na figura abaixo.

Figura 13 - Defeitos comuns em garrafas de vidro: (a) Dobra, (b) Fissura, (c) Poleiro



Fonte: Jaime (2009)

Os defeitos que podem ser gerados na confecção de garrafas são classificados em três grandes grupos, de acordo com sua criticidade. Os defeitos críticos são aqueles que apresentam riscos a saúde e segurança do consumidor final, como poleiros, ou com possibilidade de gerar avaria aos equipamentos de enchimento, como dimensão do gargalo. Defeitos maiores são os que danificam ativamente a estrutura da garrafa, de modo com que ela perca seu rendimento e características desejadas, como verticalidade ou bolhas. Por fim, defeitos menores ou relativos são mais ligados ao aspecto e aparência do produto, como marcas de molde e rugas. (JORGE, 2013)

No que concerne o controle de qualidade realizado, as principais análises são a inspeção visual, a determinação de parâmetros da garrafa, como peso, espessura, capacidade volumétrica e dimensões, determinação do grau de têmpera (para detectar pontos de fragilidade mecânica), testes de resistência a choques térmicos e mecânicos (impacto e pressão interna), além de análise de cor e transmitância dos artigos (XAVIER; ORTIZ, 1986; JAIME; DANTAS, 2009).

O mapeamento de defeitos é essencial para o controle do processo de confecção das garrafas, servindo como *feedback* para eventuais falhas na produção. Nas fábricas, a comunicação contínua entre Área Quente (como é chamada a região entre a máquina IS e o *Lehr*), Área Fria (como é chamada a região entre a saída do *Lehr* e a embalagem) e o Laboratório de Qualidade é essencial para atuação eficiente e direcionada nas possíveis causas de defeitos no processo vidreiro.

Por fim, cabe destacar que as garrafas que apresentam defeitos são descartadas do processo, bem como as garrafas de amostragem de qualidade. Elas são direcionadas para área de subproduto da unidade vidreira, e, posteriormente, são reinseridas no processo como caco

de vidro utilizado nos fornos. Dessa forma, as perdas na fabricação são bastante reduzidas, principalmente no que concerne a geração de resíduos oriundos da atividade fabril.

2.2.5. Paletização e embalagem

Finalmente, as garrafas produzidas, tratadas e inspecionadas são direcionadas para embalagem, passando pelas paletizadoras. Assim, são formados paletes de garrafas que são devidamente cintados e envolvidos, visando o transporte dos artigos de forma íntegra e sem perdas no processo. Posteriormente, há a transferência das garrafas para as fábricas alimentícias que irão fazer uso das embalagens de vidro para comercialização de seus produtos, fechando a cadeia de produção. (JAIME, 2009; MAIA, 2003)

Cabe salientar que, ainda que muito utilizadas na indústria alimentícia, as garrafas de vidro estão em constante processo de desenvolvimento de sua tecnologia. O principal foco é no aumento de produtividade e redução do peso dos artigos, de modo com que cada vez mais há a criação de uma vantagem comparativa das embalagens vítreas em relação a similares em plástico ou metal. A perspectiva para o setor é vista como favorável em análises econômicas e mercadológicas. (BNDES, 2007)

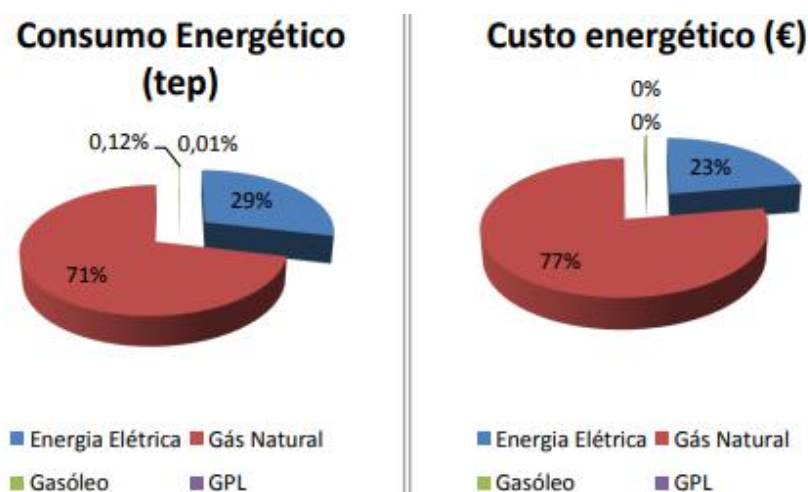
2.3 Consumo energético no processo vidreiro

O processo de fabricação de vidro pode ser considerado como intensivo em energia (BNDES, 2007), sendo classificado conforme a contribuição para o consumo total na indústria brasileira em 2007 como o 13º maior consumidor energético no país (EPE/MME, 2008). Isso porque uma planta vidreira despende, em média, cerca de 2,5 milhões de kcal por tonelada de garrafas produzidas em energia térmica, somadas a mais de 400 kWh/t de energia elétrica em toda a cadeia produtiva de embalagens. (GAINES e MINTZ, 1994). Dessa forma, pode-se inferir que considerável parcela dos custos associados a fabricação de embalagens de vidro está associada a obtenção de recursos energéticos.

Uma análise mais aprofundada desse consumo em planta vidreira mostra que a maior parte da energia é empregada nas etapas de fusão e refino. Estudos mostram que cerca de 70% do gasto energético é direcionado para essas fases da produção, tendo em vista que os fornos necessitam de constante inserção de energia para manutenção das altas temperaturas (acima de 1500°C) de fusão de matérias-primas e obtenção do vidro. (D'ANTONIO et al., 2003).

Em termos da matriz energética aplicada a plantas vidreiras, pode-se observar a predominância da utilização de gás natural como fonte térmica e de energia elétrica para demais aplicações dentro da fabricação das embalagens. A partir de estudo de caso, foi possível fazer desagregação das utilizações das diferentes matrizes de acordo com quantidade e custos associados, conforme é observado abaixo. Para termos de análise, considerou-se fator de conversão da energia elétrica como $1 \text{ kWh} = 215 * 10^{-6} \text{ tep}$ (toneladas equivalentes de petróleo), o preço de energia elétrica como 0,0713 €/kWh e o preço do gás natural como 0,0355 €/kWh. (PEREIRA, 2015)

Figura 14 - Desagregação dos consumos e custos energéticos



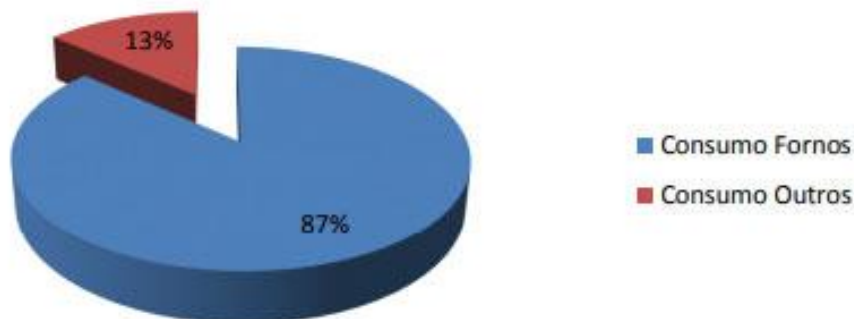
Fonte: Pereira(2015)

De acordo com os gráficos, é notável a predominância do gás natural como fonte de energia para a fabricação de garrafas de vidro, correspondendo a cerca de 71% do consumo energético total da planta devido a sua aplicação na fusão de matéria prima que ocorre nos fornos. Além disso, ainda que o custo unitário da energia elétrica seja mais elevado, conclui-se que o impacto financeiro do consumo de gás natural é o mais relevante, sendo responsável por cerca de 77% dos recursos destinados a compra de energia para a planta. (PEREIRA, 2015).

No que concerne o gás natural, ele é utilizado como fonte de energia térmica principal devido a suas vantagens comparativas a outros combustíveis, como queima mais uniforme, melhor controle das variáveis do processo, melhor manutenção dos queimadores e menores taxas de emissão de poluentes. (BNDES, 2007; MAIA, 2003). Devido a extensa necessidade de consumo de energia nos fornos, cerca de 87% da aplicação do gás natural é destinada ao

processo de fusão das matérias primas.

Figura 15 - Partição do consumo de gás natural em planta vidreira



Fonte: Pereira (2015)

A aplicação do gás natural nos fornos de vidro consiste na sua utilização como combustível para ação dos queimadores, provendo o conteúdo calórico necessário para as transformações físico-químicas das matérias primas no interior do equipamento. Na indústria vidreira, esses queimadores estão acompanhados de estruturas chamadas regeneradores, que trabalham no reaproveitamento da energia dos gases de combustão para preaquecimento do ar que vai ser usado na queima posterior. Esses fornos, chamados de contínuos regeneradores, tendem a ter maior eficiência térmica em comparação a outros tipos.

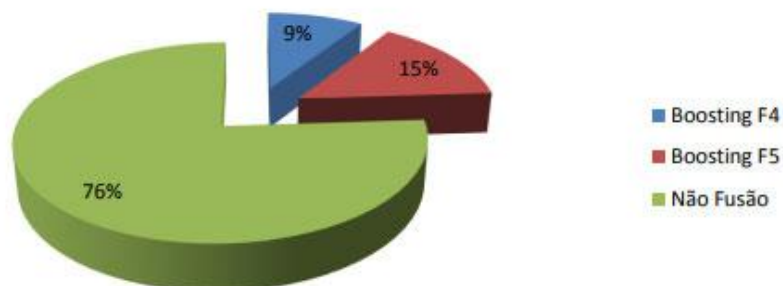
No entanto, cabe salientar que fornos de vidro empregados na indústria hoje são pouco efetivos quando se trata de eficiência térmica. Isso porque há grandes perdas de energia no processo, obtendo uma média de 50% de aproveitamento de calor fornecido aos fornos contemporâneos, o que corresponde a aproximadamente 100 kcal por quilo de vidro produzido. Para minimizar essas perdas, os fabricantes vidreiros utilizam, além dos regeneradores, recursos auxiliares, como isolamento térmico das paredes, abóbada e fundo dos fornos, redução de paradas de produção, entre outros. (MAIA, 2003).

Outros usos de gás natural na fabricação de garrafas de vidro são direcionados a menores processos de troca de calor dentro da planta. O destaque dessas etapas vai para os canais, no qual o gás é usado para garantir a temperatura pretendida no vidro até a camisa, além do recozimento das garrafas que ocorre no *Lehr*, atuando no tratamento térmico de retirada de tensões intrínsecas à estrutura do vidro moldado.

À exceção do uso de gás natural, o consumo de energia elétrica é segundo maior em termos de matriz energética. Esse montante é destinado tanto ao forno como a demais

processos da planta, em proporção de 75/25. No que se trata de forno, a aplicação da energia elétrica é destinada aos *Boostings*, que são estrutura auxiliares à combustão de gás na obtenção de altas temperaturas para a fusão e que aumentam a capacidade de extração nominal do forno. (PEREIRA, 2015; MAIA, 2003).

Figura 16 - Partição do consumo de energia elétrica em planta vidreira



Fonte: Pereira (2015)

Como é explicitado no esquema anterior, mais de 75% do gasto de energia elétrica na fabricação de embalagens de vidro é destinada a processos não relacionados à fusão de matérias-primas. Essas aplicações são auxiliares na obtenção das garrafas, sendo a maioria proveniente do consumo de compressores de baixa pressão. Tais estruturas de compressão são essenciais a vidraria pois são responsáveis pela moldagem das garrafas e para o funcionamento das máquinas IS. Além disso, há boa parcela de energia elétrica direcionada aos ventiladores, que são incumbidos de realizar o resfriamento de moldes e pre-moldes (PEREIRA, 2015).

Ainda que o gás natural e a energia elétrica sejam a esmagadora maioria dos recursos energéticos no processo vidreiro, outras matrizes devem ser levadas em consideração. Devido ao aumento da procura e substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, e à instabilidade de fornecimento do gás natural no Brasil, é percebido movimento na indústria do vidro em direção a co-geração de energia pelo uso do biogás.

Estudos mostram que é possível substituir industrialmente o gás natural pelo biogás em fornos de fusão de vidro sem que haja perda de qualidade na garrafa formada, nem impactos ao refratário interno da estrutura dos fornos. No entanto, a menor disponibilidade de biogás em abundância e os altos custo de adaptação dos fornos à tecnologia empregada se tornam impeditivos para a total substituição dos combustíveis atuais, de modo com que é observado na indústria atual a utilização de ambas as matrizes para a composição de

combustão.

Por fim, cabe citar o consumo de GLP e combustível veicular como gastos provenientes da cadeia produtiva das garrafas de vidro. Essas matrizes estão associadas ao transporte do produto, seja ele interno com o uso de GLP em empilhadeiras, ou externo, com alimentação de diesel e gasolina nas frotas de distribuição. O gasto energético, no entanto, é irrisório quando comparado às demais aplicações, tanto em volume quanto em valor. (PEREIRA, 2015).

Capítulo 3 - LOGÍSTICA REVERSA DE EMBALAGENS DE VIDRO

Em seu inovador relatório “Nosso Futuro Comum”, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) definiu o que utilizamos hoje como o conceito de desenvolvimento sustentável. Essa classificação pauta que a sustentabilidade do progresso da sociedade deve manter íntegra a necessidade das futuras gerações ao não degradar a natureza para atender as diretrizes da geração atual.

Em vista disso, trazer à tona a questão do desenvolvimento sustentável obriga a discussão sobre o ciclo de vida de embalagens. Isso porque a importância dos invólucros cresce cada vez mais no cenário industrial e comercial, deixando de ser apenas o recipiente de transporte e armazenamento de produtos, para assumir papel ativo em *marketing* e valor aparente do consumível. (LANDIM, 2016). Dados da Associação Brasileira de Embalagens (ABRE) mostram que há uma tendência de aumento da produção nacional dos artigos, com crescimento de 3% em 2019, 2,6% em 2018 e 1,9% em 2017.

Concomitante a esse crescimento, as indústrias de embalagens tem buscado adaptar seus processos a práticas mais sustentáveis e ambientalmente saudáveis. Inúmeras estratégias são utilizadas para viabilizar o desenvolvimento sustentável, desde investimentos na adequação da produção a práticas menos danosas ao meio ambiente, reduzindo água e uso de combustíveis não renováveis; a confecção de embalagens providas de materiais biodegradáveis e o aumento exponencial da aplicação de reuso e reciclagem dos recipientes pós consumo. (LANDIM, 2016).

Em termos de reciclagem, a modalidade se mostra como uma das principais formas de manter a indústria de embalagens dentro de um modelo sustentável. Isso porque os recipientes descartados ainda compõem grande parte dos resíduos sólidos gerados, correspondendo a cerca de 33,6% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) levantados em 2020 (ABRELPE, 2021). Considerando que, em 2020, 43,2% do RSU no país não teve a destinação adequada (ABRELPE, 2021), a reciclagem de embalagens atuaria de forma eficiente na diminuição do montante de material acumulado na natureza.

Define-se como reciclagem a reinserção no processo produtivo de materiais industrializados que foram previamente utilizados e rejeitados, de modo a ser reincorporado e transformado em novo produto (OXFORD, 2021). Segundo Benetti (2000), essa modalidade abrange as etapas de coleta, triagem, beneficiamento, acondicionamento, armazenamento, transporte e processamento, resultando em um novo artigo industrial com uso definido. A

prática em resíduos sólidos implica em diversas esferas sociais, seja na preservação ambiental, na conservação energética ou até na geração de renda (CALDERONI, 1999).

Nesse cenário, as embalagens de vidro se destacam de suas substitutivas no que concerne a reciclagem e o reuso. Essa importância reside na composição e características físico-químicas do vidro, que permitem que o material seja 100% reciclável e passível de retransformação inúmeras vezes sem perder a qualidade ou suas propriedades. Além disso, a sua inércia química e manutenção de estrutura física possibilitam o reuso das embalagens com mesma finalidade e desempenho. (ABIVIDRO, 2019).

A figura abaixo demonstra o ciclo de vida do vidro, incluindo desde sua fusão e confecção dos artigos, até seu retorno ao processo na forma de caco.

Figura 17 - Ciclo de vida do vidro



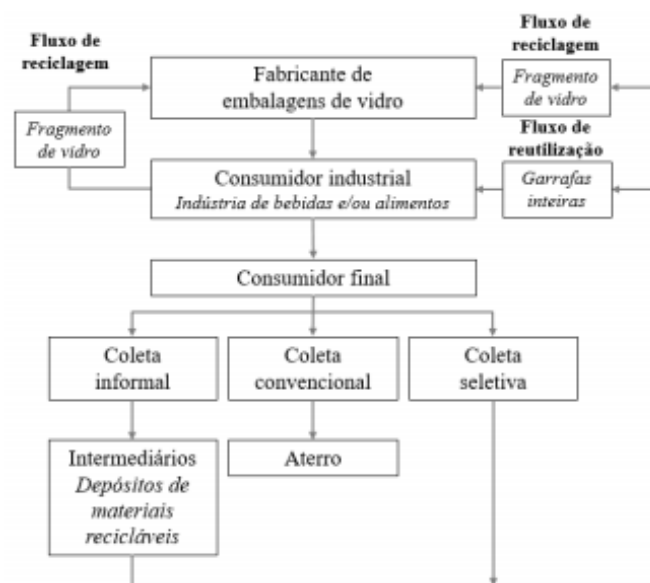
Fonte: Nery (2016)

Cabe ressaltar que os benefícios da reciclagem do vidro e utilização de caco nos fornos de confecção de novos artigos vão além da diminuição do impacto de resíduos sólidos. Isso se explica pela vantagens atreladas a diminuição do consumo de matéria prima, a economia energética associada, redução do consumo de água e da poluição do ar, segundo estudos de Calderoni (1999). Essas benesses atreladas são incorporadas ao processo produtivo europeu desde 1974, no qual programas de reciclagem vítrea foram iniciados com o intuito de redução energética, de modo com que, atualmente, quase 90% do vidro descartado é reaproveitado. (VALT, 2004).

Em vista do exposto, faz-se necessária a utilização de um sistema estruturado de logística reversa para otimização da reciclagem de vidro. Conceitualmente, logística reversa é entendida como a “área da logística empresarial que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo produtivo, por meio dos canais de distribuição reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, entre outros.” (LEITE, 2003).

Para a cadeia de reciclagem de garrafas de vidro, o estudo da logística reversa é delimitado para canais de distribuição reversos de pós-consumo de bens descartáveis e semi-duráveis. Bens descartáveis refere-se a artigos de vida útil de algumas semanas, como garrafas *long neck*; assim como semi-duráveis fazem referência a garrafas retornáveis, maiores e mais resistentes. (LEMOS, 2012). A figura a seguir esquematiza os canais de distribuição dos bens descartáveis, conforme definição.

Figura 18 - Canais de distribuição de bens descartáveis



Fonte: Caetano (2017)

A existência dessas cadeias reversas de embalagens pós-consumo se faz possível somente na presença de condições tidas como essenciais. Essas premissas englobam fatores econômicos, tecnológicos e logísticos, e sua ausência implica em perda da qualidade do sistema de logística reverso. Outrossim, fatores modificadores podem auxiliar e reorganizar as cadeias em caso de não existência dos fatores essenciais, como pautas ecológicas e legislativas, incentivando a estruturação mesmo que em cenário adverso para a mesma.

(LEITE, 2003).

Ainda que complexa e de existência condicionada a premissas estruturais, a realização de logística reversa para embalagens de vidro é factível na realidade contemporânea. Isso porque pode-se observar modelos de sucesso na captação e reciclagem de vidro na Europa, em destaque para países como a Bélgica, Suécia e Dinamarca. Em termos de números, a União Europeia reportou, em 2018, que aproximadamente 75,9% das embalagens vítreas dispostas foram destinadas a reciclagem, representando um aumento de 7% em relação aos 10 anos anteriores. (EUROSTAT, 2020)

Esse sucesso é resultado de longa trajetória de estruturação do segmento, baseada na possibilidade de gerar maior competitividade na fortalecida indústria de embalagens de vidro presente na Europa e, principalmente, na necessidade latente de diminuição do montante de lixo de embalagem gerado no território. Para tal, uma série de definições legais e metas foram estabelecidos dentro da União Europeia, com destaque para a Diretiva de Estrutura de Resíduos (em inglês, *Waste Framework Directive*) de 1998 e a Diretiva de Resíduos de Embalagem (em inglês, *Packaging and packaging waste directive*).

Ambas essas diretivas europeias levaram ao estabelecimento de que, até 2030, 85% de todo o vidro destinado a rejeitos sejam reciclados, diminuindo, assim, a quantidade de lixo destinados a aterros. Dentro dessa lógica, há a premissa do “princípio do poluidor-pagador” (em inglês, “*polluter pays principle*”), no qual a responsabilidade de garantir o sistema de reciclagem se designa à própria indústria de embalagens. O que realmente ocorre, no entanto, é a criação de entidades, chamadas de *Green Dots*, que se tornam responsáveis pela gestão da logística reversa do caco em todas as suas etapas em troca de aporte financeiro por parte das fábricas de embalagens. (DA CRUZ *et al.*, 2013).

Ainda assim, estudos sobre a cadeia logística da reciclagem do vidro na Europa apontam a necessidade de atuar mais fortemente na conscientização e na estrutura física das coletas. O relatório de Testa *et al.* (2017), por exemplo, aponta que os principais pontos de investimento na organização do ciclo completo do vidro residem na implantação de diferentes esquemas de coleta, aumento da qualidade e eficiência da cadeia, promoção de parcerias mais sinérgicas e do conhecimento populacional sobre os benefícios ecológicos da prática de reciclagem de vidro.

Assim, pode-se concluir que a implantação efetiva de cadeia de logística reversa no ciclo de vida de garrafas de vidro é dependente da atuação direta de todas as partes interessadas, seja em âmbito governamental e legal, seja pela participação efetiva das

indústrias de embalagens ou pela adesão social aos objetivos ecológicos e econômicos da reciclagem de vidro.

3.1 Logística Reversa no Brasil

Visando atender a Agenda 21 – programa de ação voltado ao desenvolvimento sustentável adotado pela Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente -, o Governo Federal aprovou, em 2 de agosto de 2010, a Lei nº 12.305. Nessa legislação, institui-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), principal marco regulatório no que diz respeito a objetivos, instrumentos e diretrizes para gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos (FARIA, 2012), visando, assim, a diminuição de passivos ambientais desviados a acondicionamento em lixões e estruturadas de descarte não apropriadas.

Na PNRS, há o estabelecimento das diretrizes de poluidor-pagador e responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010), espelhando o modelo de gestão de RSU desenvolvido na Europa. Com isso, há a delimitação de papéis ativos de todos os atores presentes na cadeia dos bens industriais a serem dispostos, desde fabricantes, comerciantes, distribuidores, setor público e consumidores finais. Em resumo, cabe à indústria a estruturação do sistema de logística reversa, incluindo ferramentas para a captação e destinação adequada dos resíduos; ao setor público a gestão e regulamentação dos mecanismos reversos; e ao consumidor final a destinação adequada dos bens pós-consumo. (SILVA, 2021).

Ainda conforme da Lei de 2010, apenas determinados produtos tidos como perigosos ou estratégicos seriam submetidos de imediato a logística reversa, sendo eles agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, lubrificantes, lâmpadas fluorescentes e eletroeletrônicos, além de suas respectivas embalagens. Os demais produtos e suas embalagens seriam, dessa forma, regidos conforme regulamentos e acordos setoriais firmados entre setores público e privado. (FARIA, 2012).

Em vista disso, e levando em consideração que mais de 30% do RSU gerado no país é oriundo da indústria de embalagens, 22 associações que representam esse setor firmaram, em 2015, um Acordo Setorial com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) visando a estruturação e implementação de sistema de logística reversa para diminuição do impacto volumétrico de invólucros descartados. Denominada Coalizão Embalagens, o conjunto de mais de 3000 empresas produtoras propõe a delimitação da responsabilidade compartilhada

dos resíduos com enfoque na reinserção do material pós consumo no processo produtivo, envolvendo a indústria, cooperativas de captação de lixo e consumidores (COALIZÃO, 2017), conforme explicitado na imagem abaixo.

Figura 19 - Cadeia de logística reversa de embalagens e seus respectivos atores



Fonte: Coalizão (2017)

De acordo com o esquema apresentado pela Coalizão (2017), a estrutura proposta pelo Acordo versa na responsabilidade dos consumidores na separação e destinação das embalagens a Pontos de Entrega Voluntária (PEVs). Esse montante de material descartado é coletado por organizações de catadores ou comerciantes de recicláveis, e é realizada a triagem prévia do produto para a comercialização, sendo direcionado posteriormente aos recicladores, sejam eles empresas especializadas em reciclagem ou fábricas de embalagem que inserirão o material pós triagem em seu processo produtivo. Cabe destacar que é papel dos produtores de invólucros a disponibilização e manutenção dos PEVs a serem utilizados na cadeia reversa.

Para a implementação dessa estrutura proposta, a Coalizão Embalagens atua em três principais frentes de trabalho, sendo elas: a disponibilização dos PEVs, incluindo a abertura de novos pontos, manutenção dos antigos e operacionalização efetiva; o investimento em capacitação das cooperativas de catadores, com enfoque em ações estruturantes junto a essas empresas em questões administrativas, operacionais e de produtividade, além da adequação

de suas infraestruturas; e a promoção de campanhas educacionais, visando a conscientização ambiental da população e, por conseguinte, do consumidor final quanto ao descarte e coleta seletivas adequadas. Em números, foram implementados mais de 2000 PEVs, apoiadas mais de 800 cooperativas e realizadas mais de 500 ações em campanha.

No entanto, ainda que haja alguns produtores que utilizam embalagens vítreas contempladas pelo Acordo Setorial firmado, não há representantes da indústria do vidro participando efetivamente da Coalizão. Cabe destacar, nesse cenário, a ausência da ABIVIDRO, associação de produtores de vidro no país, na discussão dos termos e aplicação das diretrizes do acordo, de modo com que a priorização de ações voltadas para a captação, beneficiamento e reciclagem do material sejam preteridas. Isso ocorre, segundo Caetano (2018), devido a discordâncias entre a ABIVIDRO e o MMA no que diz respeito a delimitação espacial de atuação da Coalizão.

Em vista de mitigar essa preterização de iniciativas para a reciclagem do vidro, foi realizada consulta pública, em fevereiro de 2021, para estabelecimento de Acordo entre o Ministério e o setor vidreiro. De acordo com o texto, o Acordo entraria em vigor em Março de 2021 e haveria o estabelecimento de prazos para a implementação do sistema de logística reversa, com a instalação de pontos de consolidação das embalagens de vidro antes da destinação final, além da delimitação de meta de reciclagem do material de 50% em 2025. Outros pontos do texto reiteram a PNRS e suas diretrizes, principalmente no que diz respeito a participação dos catadores e cooperativas no fluxo reverso. (BRASIL, 2021; UOL, 2021).

Essa questão da participação de catadores e cooperativas no sistema de logística reversa é prevista no artigo 7 da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Segundo a PNRS, esses agentes são incorporados no fluxo de logística reversa dos produtos a serem destinados, de modo que, no entanto, não haja a extensão da responsabilidade compartilhada aos trabalhadores dessa classe. Segundo Locatelli (2016), cooperativas e associações de catadores atuam de forma voluntária na cadeia, facultando à iniciativa privada a atuação ou não dessa mão de obra no processo.

Por fim, cabe ressaltar que a PNRS, após 10 anos de existência, pouco alterou o cenário de destino final de RSU no país. Isso porque, mesmo após 20 anos de discussão entre setores público e privados para a definição do texto final da Lei, a implementação das diretrizes foi realizada de forma inadequada. De acordo com Chaves *et al.* (2014), a implantação efetiva do sistema logístico depende do empoderamento da administração pública em caráter municipal, tendo em vista que o país é extenso e de variadas

regionalidades em sua formação.

Pelo contrário, a baixa capacidade administrativa dos municípios levou a terceirização da implementação da gestão de resíduos, contratando, assim, empresas de consultoria para a atuação nessas frentes. Esses consultores, no entanto, geralmente não levam em consideração as regionalidades e especificidades das condições locais, propondo a adesão a esses sistemas de gestão de forma padrão e que não contemplam as necessidades reais dos locais submetidos a esses planos de ação.

Aliado a isso, cabe ressaltar que a implementação de uma estrutura sustentável de logística reversa é um investimento de alto aporte financeiro inicial, principalmente pela necessidade de criação de espaços físicos para destinação correta e captação de materiais. Percebe-se, assim, uma negligência dos atores responsáveis na preconização de recursos financeiros para as ações da PNRS, minando as chances de sucesso do movimento. Além disso, a precária atenção dada a conscientização da população e aos mecanismos educacionais com relação a pauta ambiental pioram o cenário de insucesso da Lei de 2010. (CHAVES *et al*, 2014)

Esse insucesso foi alvo de estudo do Panorama dos Resíduos Sólidos de 2020, realizado pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). O documento mostra que, desde a promulgação da PNRS, em 2010, a geração total de RSU aumentou cerca de 19% no país, enquanto que iniciativas de coleta seletiva cresceu apenas 16%. Como consequência, os índices de reciclagem brasileiros ainda permanecem abaixo dos 4%, demonstrando as dificuldades de implementação da Lei, principalmente pela “falta de capacidade institucional dos titulares, o não reconhecimento da importância da gestão adequada de resíduos, a ausência de instrumentos econômicos e tributários para impulsionar as melhores práticas, e o sub-financiamento dos serviços”. (ABRELPE, 2021)

Cabe salientar que o cenário atual da malha de logística reversa de embalagens contribui ativamente para os baixos índices de reciclagem de embalagens no país. Machado (2013) discorre em seu estudo sobre a existência de 5 grandes núcleos de captação de materiais no Brasil, sendo eles a coleta domiciliar, catadores, coleta seletiva porta-a-porta, os PEVs e os Pontos de Entrega Bonificada (PEB). Cada um deles possui suas peculiaridades e, devido a pouco desenvolvimento de sua atuação em um sistema efetivo de logística reversa, contribuem em maior ou menor grau para o insucesso de um fluxo reverso de qualidade no país.

Para a coleta domiciliar, que hoje é a de maior abrangência no quesito de destinação de resíduos, pode-se perceber que a ausência de segregação dos materiais de embalagem de materiais orgânicos diminui a qualidade do montante, de modo a diminuir o valor agregado e as quantidades passíveis de reciclagem.

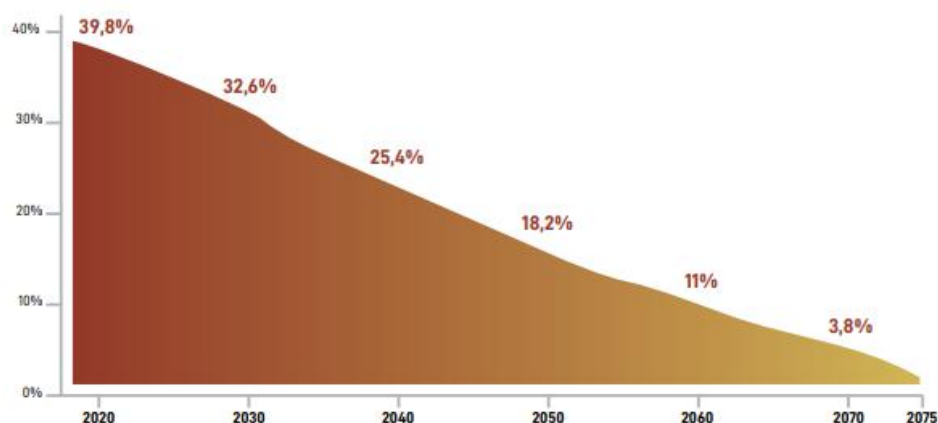
No que se trata de valor agregado, o modo de coleta por catadores também atinge diretamente esse quesito quando se trata de reciclagem de embalagens, especialmente quanto ao vidro. Por ainda se tratar de uma classe com poucos investimentos e baixa remuneração, associações de catadores tendem a preferenciar materiais que possuam um valor de venda maior, principalmente metais. Isso contribui para mais um percalço no cenário geral de reciclagem, com destaque para o vidro, que necessita de grandes volumes para se tornar atrativo comercialmente. (JESUS; BARBIERI, 2013)

A coleta seletiva porta-a-porta se caracteriza por ser uma variante da coleta domiciliar que estimula a separação dos materiais previamente pela população, facilitando a disposição adequada por parte das cooperativas de recolha. Ela, no entanto, ainda tem cobertura incipiente no país – em 2012, apenas 14% das cidades brasileiras possuíam algum tipo de iniciativa (CEMPRE, 2012), além de possuir alto custo e baixo estímulo para sua consolidação.

Tanto a existência de PEVs e os PEBs possuem a mesma problemática da dependência da adesão da população a suas estruturas. Aliado a isso, os entraves com relação a custos de manutenção por parte das empresas idealizadoras e a falta de estímulos governamentais (seja econômicos ou fiscais) potencializam um quadro de ausência de continuidade dessas iniciativas, que são opções viáveis para maximizar a eficiência do sistema de logística reverso. (MACHADO, 2013)

Diante desse cenário, é válido ressaltar que o estudo da ABRELPE explicita, também, que, seriam necessários 55 anos para a extinção de aterros controlados e lixões, principal pauta e objetivo da PNRS. A expectativa de demora para o alcance das metas com relação a extinção desses sistemas de descarte demonstra a necessidade de viabilizar econômica e administrativamente a implementação das ações previstas na Lei, de forma contínua e sustentável. A figura a seguir ilustra a prospecção de diminuição de disposição inadequada no país.

Figura 20 - Evolução da situação da disposição inadequada no país



Fonte: ABRELPE (2021)

3.2 Captação de Cacos de Vidro

A possibilidade de reciclagem de maneira infinita de embalagens de vidro o coloca o principal aliado na redução da quantidade de RSU indevidamente rejeitado e, com isso, diminuição do número de lixões. Concomitantemente, os grandes volumes consumidos desse material no cenário nacional de invólucros impulsionam ainda mais a importância de sistemas bem estruturados de reinserção de vidro pós consumo no processo produtivo. Para ilustrar, estudos apontam que o consumo médio do brasileiro em produtos de vidro é de 30,5 kg/pessoa/ano, sendo 10,8kg/pessoa/ano em embalagens. (FREITAS & MAGNABOSCO, 2019)

Dessa forma, a movimentação para se instaurar e estruturar um sistema de logística reversa de vidro urge como prioridade para o atingimento de metas de reciclagem no país. Para tal, a operacionalidade desses canais reversos deve seguir modelos já estudados, que englobam etapas pré-definidas para a obtenção do caco a ser comercializado. São elas: separação, descarte, coleta, triagem, classificação, beneficiamento, armazenamento e transporte.

A separação e descarte dizem respeito ao processo de armazenamento e desvio dos materiais vítreos de outros tipos de resíduos, somados ao encaminhamento dos mesmos a estabelecimentos e pontos de coleta. Em seguida, a coleta propriamente dita se refere a retirada do material desses locais intermediários pra estações de transbordo ou instalações

designadas a realização de processos visando o aumento do valor agregado do resíduo captado. Já a triagem e classificação englobam as etapas de separação e remoção de resíduos não recicláveis e impurezas, além de posterior categorização do montante restante. O beneficiamento, ou processamento intermediário, é composto por operações que propiciam a utilização do vidro como parte integrante da matéria prima dos fornos, enquanto que o armazenamento e o transporte são as etapas relativas ao fim da cadeia e inserção do caco no processo vidreiro. (BRASIL, 2015; POHLEN, FARRIS, 1992).

Em termos de responsabilidade compartilhada prevista da PNRS, há certo grau de delimitação da atuação dos agentes da cadeia reversa do vidro. A etapa de separação fica a cargo dos consumidores finais, responsáveis por realizar a devida seletividade do material em reciclável e orgânico de modo prévio a coleta, enquanto que a recolha, triagem e classificação do material vítreo acaba por estar a cargo de cooperativas, associações de catadores e servidores públicos de limpeza urbana. Já o beneficiamento tende a estar associado à empresas especializadas em reciclagem e, muitas vezes, à própria indústria vidreira que irá utilizar o caco captado.

O que é visto, no entanto, na realidade de captação de vidro pós consumo atual, é que a baixa eficiência da logística reversa do material nasce da pouca estruturação dos sistemas de coleta instaurados. Dos cinco principais modelos de captação de materiais vítreos, coleta domiciliar, catadores, coleta seletiva porta-a-porta, PEVs e PEBs, a qualidade dos montantes de resíduos de vidro ainda se apresenta muito baixa, originado de uma etapa de separação pouco eficiente e consciente. (CAETANO, 2018)

Em vista disso, cabe ressaltar a importância da mobilização de recursos para a educação ambiental e conscientização social sobre as vantagens e impactos resultantes da reciclagem de vidro de embalagem. Ainda que parte da responsabilidade por essas campanhas seja creditada ao setor público, são percebidas mobilizações e ações do setor privado, especialmente da própria indústria vidreira, para o incentivo da participação popular na cadeia de logística reversa de vidro pós consumo.

Exemplos dessa movimentação da indústria do vidro para a conscientização popular podem ser vistos pelos guias, cartilhas e ações da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO), orientando sobre reciclagem e seletividade de resíduos provenientes de materiais vítreos. Outro movimento que cabe destaque é o *Glass is Life*, realizado pela produtora de embalagens de vidro Owens Illinois, cujo programa visa chamar a atenção dos consumidores quanto ao uso de vidro por meio de ações voltadas à população.

A conscientização do consumidor final impacta diretamente o ciclo de cadeia reversa de vidro no Brasil principalmente devido ao modelo utilizado atualmente para a estruturação desse nicho. O sistema de captação de embalagens de vidro pós-consumo é dependente da atuação dos catadores, ocupação definida pela Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) do Ministério do Trabalho como profissionais autônomos ou organizados em associações/cooperativas cujas atividades são baseadas na coleta, seleção e venda de materiais recicláveis. (BRASIL, 2021)

A atividade dos catadores e suas associações consiste na separação de materiais recicláveis, sua recolha dos locais de disposição e posterior venda a cooperativas e recicladores. Essa atuação pode ocorrer em paralelo com a coleta urbana de resíduos, principalmente quando esses agentes estão associados a coletivos de catadores que regulamentarizam suas atividades e realizam parcerias com o setor público, ou de forma autônoma, coletando resíduos diretamente nos geradores antes da coleta municipal e recuperando os materiais nos lixões em que foram dispostos. (PEREIRA; GOES, 2016). De todo o modo, o Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR) classifica o trabalho dos catadores como base da estrutura de reciclagem, tendo em vista que são “os primeiros agentes do processo”.

Embora a atuação dos catadores seja essencial à existência da logística reversa de vidro no Brasil, e embora haja apoio da PNRS para a participação desses agentes na estrutura do ciclo, percebe-se o não reconhecimento desses atores econômicos como legítimos no contexto geral. Isso porque não há a obrigatoriedade de participação de associações de catadores na cadeia reversa, de modo com que municípios não necessitem custear as atividades realizadas por esses agentes (CAMPOS, 2014). Com isso, a remuneração oriunda do trabalho de coleta e separação dos materiais é relativo exclusivamente a venda direta dos mesmos a cooperativas e recicladores, dependendo, então, do valor agregado de produtos e de volumes de captação.

Como forma de potencializar a atuação dos catadores e, concomitantemente, valorizar seu trabalho e mão de obra, surgem algumas iniciativas para a organização e profissionalização da classe. Dentre elas, cabe citar o Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR), caracterizado por ser um movimento social que visa o “reconhecimento, inclusão e valorização do trabalho dos catadores e catadoras, auto organizando-os em Bases Orgânicas” (MNCR, 2021).

Outra iniciativa voltada para a questão social dos catadores é a *Green Mining*. Criada

em 2018, a *startup* emprega trabalhadores voltados para as atividades de catação de bens recicláveis para a inserção em esquema de logística reversa voltado para a indústria vidreira. A empresa realiza mapeamento de pontos de geração de vidro pós-consumo, financia a construção de estruturas de armazenamento intermediário de resíduo e, posteriormente, comercializa o montante acumulado com recicladoras e fábricas de vidro. A atuação dos catadores reside no transporte desses locais de geração mapeados e os HUBS – estruturas intermediárias construídas -, utilizando veículos não motorizados para essa atividade, como ilustra a figura abaixo.

Figura 21 - Catador de vidro realizando transporte de material em bicicleta



Fonte: GREEN MINING (2021)

A *startup*, que hoje possui parcerias com grandes empresas consumidoras de embalagens de vidro, como a Ambev e a Unilever, afirma ter coletado cerca de 1,6 mil toneladas de vidro durante sua atividade, além do impacto social oriundo da empregabilidade de catadores previamente autônomos e da parceria com iniciativas voltadas a capacitação desses trabalhadores. (GREEN MINING, 2021)

Cabe destacar também que as condições de comercialização dos materiais separados levam ao cenário atual das associações de catadores no que diz respeito a atuação na cadeia do vidro. As peculiaridades na manipulação de recicláveis vítreos, como o baixo valor agregado do material, os riscos de acidente vinculados a seu manuseio, carência no fornecimento de equipamentos de segurança para o manejo dos produtos devido a informalidade geral da categoria, e a exigência da indústria vidreira por grandes volumes e alta qualidade dos resíduos de vidro, propiciam a introdução de intermediários no processo de comercialização de embalagens de vidro pós consumo. (DEMAJOROVIC et al., 2014; LEMOS, 2012)

Esses intermediários de comercialização são as chamadas cooperativas de materiais recicláveis, empresas nas quais há o armazenamento e acúmulo de embalagens pós consumo e cacos de vidro captados pelas associações de catadores e em PEVs. A coleta dos materiais vítreos é iniciada com a disponibilização de caçambas para os fornecedores e, quando a mesma é preenchida, o montante é transportado por meio de caminhões de frota da cooperativa. Em seguida, há o depósito do vidro captado em grandes pátios, como visto na figura a seguir, nos quais é realizada etapa de pré-triagem, que consiste na retirada das embalagens nas quais estão dispostas do artigos vidreiros (ex: sacolas plásticas).

Figura 22 - Disposição de vidro pós consumo na cooperativa Mazetto



Fonte: SABIÃO *et al* (2016)

Devido às especificidades e requerimentos de qualidade das indústrias vidreiras que reutilizarão o caco de vidro em seu processo, parte das cooperativas realiza, ainda, parte da etapa de triagem e beneficiamento do vidro a ser vendido. Com isso, são realizadas atividades de catação, geralmente manual, de outros resíduos de materiais distintos e impurezas que estão presentes no montante, passagem por imãs, além de trituração das embalagens para atendimento da granulometria requerida. Algumas empresas realizam, ainda, separação e classificação do vidro por seu material e cor (CAETANO, 2018; SABIÃO *et al*, 2016).

Essa etapa de separação e classificação por cor é realizada pois leva a maior valor agregado do material vítreo a ser comercializado. Isso porque as principais colorações para cacos de vidro – branca, âmbar e verde – impactam diretamente na composição química do forno na qual eles serão inseridos, de modo com que a compra de caco misto, ainda que mais barato, possa levar a necessidade de realização de análise química prévia à integração no processo produtivo. (CAETANO, 2018; SABIÃO *et al*, 2016). A tabela a seguir serve para ilustrar essa valorização do vidro pós-consumo separado por cor, retirado do trabalho de

Sabião *et al* (2016) relativo à empresa Mazzeto em 2016.

TABELA 2 – VALORES DE VENDA PARA DIFERENTES COLORAÇÕES DE CACO

Cor	Preço de Venda (R\$/ton)
Caco Branco	265
Caco Verde	185
Caco Âmbar	300
Caco Misto	190

FONTE: SABIÃO *et al*, 2016

Outrossim, cabe destacar que, devido à responsabilidade compartilhada e a definição de poluidor-pagador decorrentes da PNRS, e visando aumentar a captação de caco para ser reinserido no processo vidreiro, algumas empresas de fabricação de embalagens de vidro também possuem sistema de logística reversa atuante. Um exemplo disso é a Ambev, empresa de bebidas com foco em cervejas, que realiza o retorno de caco proveniente da avaria de garrafas em suas cervejarias e centros de distribuição (CDDs). O material coletado é encaminhado para a Fábrica de Vidros, localizada no Rio de Janeiro, por meio de sua frota de distribuição de garrafas às cervejarias, realizando, ao final, a reinserção desse caco diretamente nos fornos vidreiros. (AMBEV, 2020)

Outro modelo de logística reversa realizado pela iniciativa privada é o programa *Glass is Good*, idealizado pela Diageo e, posteriormente, incorporado a iniciativa setorial sob gestão da Associação Brasileira de Bebidas (ABRABE). Nesse programa, há o armazenamento de embalagens de vidro utilizadas em bares, restaurantes e casas noturnas em caçambas fornecidas, e, em seguida, esse material é coletado por associações de catadores parceiras, é beneficiado e comercializado para a fabricante de embalagens Owens-Illinois. Dessa forma, o caco pós consumo é reintegrado no processo vidreiro.

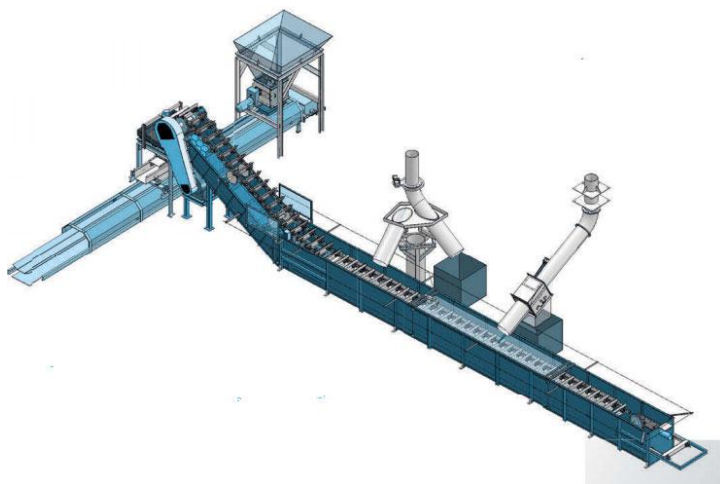
A ABRABE não atua, no entanto, no fluxo de logística reversa, sendo responsável apenas pela intermediação e fornecimento de estrutura necessária para a operacionalização do programa. Sua responsabilidade reside no cadastramento dos bares e restaurantes a serem contemplados pela iniciativa e na geração de relatório por parte das cooperativas de catadores, considerando volume comercializado e qualidade de operação. (ABRABE, 2021)

Por fim, cabe destacar que parte da captação de para reinserção no processo produtivo é oriundo do refugo da própria fábrica vidreira, através de sistema de recuperação de subprodutos. Ainda que não seja caco pós-consumo, todos os artigos produzidos que, por

motivos de qualidade, segurança ou indisponibilidade de equipamento, são descartados do processo são recolhidos, triturados e adicionados a massa vidreira de modo integral.

O vidro rejeitado na área quente é proveniente de paradas ocorridas na *IS Machine*, sejam elas programadas, como troca de produtos ou manutenções preventivas, ou indisponibilidades geradas, como troca de moldes por qualidade ou quebra de equipamentos. A matéria que é rejeitada ainda não passou pelo processo de formação de garrafa, e é direcionada a sistema de captação por meio de calhas e transportes resfriados por água devido às altas temperaturas. O material vítreo é, então, disposto num sistema de *scraper*, isto é, de raspadores, que irão quebrar o vidro em menores tamanhos; em seguida, há novas etapas de trituração antes da incorporação à matéria prima. O sistema de *scraper* pode ser visto na figura abaixo.

Figura 23 - Sistema de *scraper* de rejeito de vidro de área quente



Fonte: ZIPPE (2021)

Já o vidro rejeitado na área fria é oriundo majoritariamente dos sistemas de inspeção de qualidade. Seja pelas máquinas ou por inspeção humana, todos os artigos em não conformidade com os requisitos de qualidade estipulados pela vidreira são descartados, de modo com que haja sua captação para transformação em caco a ser usado nos fornos. Essa captação é feita por sistemas de esteiras e transportes, podendo ser finalizado em caçambas de acúmulo ou ser encaminhados para britadores/trituradores para já garantir a granulometria do material para a incorporação à matéria prima utilizada para dar origem à massa vidreira.

A vantagem da utilização desse caco é, dessa forma, o conhecimento de sua composição química, uma vez que é oriunda do próprio forno no qual será inserido, além da

ausência de sistema de transporte externo necessário a seu funcionamento. No entanto, a quantidade de caco gerado é muito pequena dentro de fábricas com operações de alta produtividade, sendo necessária a suplementação com vidro proveniente de canais reversos existentes.

3.3 Beneficiamento de Caco

A reinserção de cacos de vidro na cadeia produtiva de garrafas tem como etapa final e condicionante o beneficiamento do material coletado. Entende-se como beneficiamento, segundo a Conama (2002), como o conjunto de operações e processos aos quais são submetidos os resíduos previamente a sua utilização como matéria-prima ou produto. No caso dos rejeitos vítreos, essas atividades são, principalmente, voltadas a lavagem, separação granulométrica e magnética, trituração, aspiração e separação por cor dos materiais captados. (MAIA, 2013).

A complexidade da estrutura a ser empregada para beneficiamento de caco depende da origem do material a ser processado. O estudo desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Alimentos (2019) classifica esses rejeitos vítreos em três grandes grupos quanto à sua procedência: da mesma vidraria e forno; da mesma vidraria, porém de forno diferente; e caco de origem desconhecida, também conhecido como pós consumo.

Para as duas primeiras classificações, o caco captado é proveniente da própria vidraria que realizará a reinserção do vidro no processo. A captação é realizada nas diferentes áreas da fabricação da embalagem vítrea, principalmente nas etapas de moldagem da garrafa e inspeção de defeitos. Os artigos que são refugados pela indisponibilidade das *IS Machines*, ou por não se adequarem aos padrões de qualidade necessários para a comercialização, são desviados para área de armazenamento de subprodutos da fábrica para o posterior beneficiamento.

Esse beneficiamento dos artigos vítreos provenientes da própria vidraria se dá de maneira mais simples, tendo em vista o conhecimento por parte da fábrica da composição química do material recolhido. Por isso, faz-se necessária apenas a operação de trituração do material captado, seja ele garrafas inteiras ou caco, com o objetivo de reduzir a granulometria dos cacos antes do retorno ao processo e facilitando a incorporação a matéria prima que será fundida. Cabe salientar que, para materiais provenientes de outros fornos, deve-se levar em conta a composição do vidro inserido no processo para a compensação química da matéria

prima bruta que será utilizada. (MAIA, 2013; JAIME, 2019).

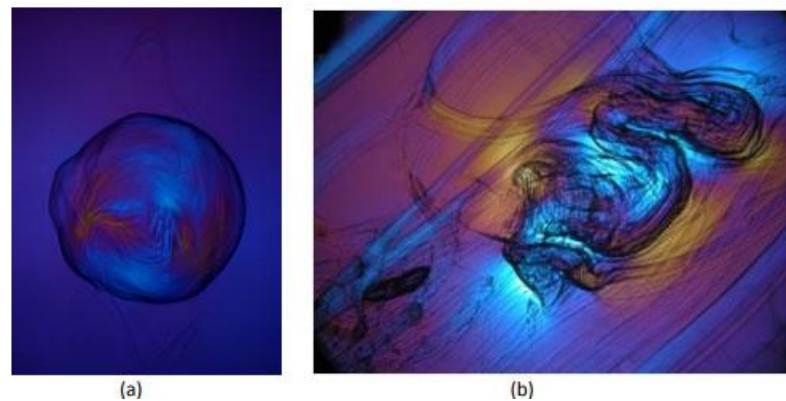
A última classificação, caco de origem desconhecida, é oriunda do processo de captação e coleta de vidro pós consumo em cadeias reversas. Tendo em vista que é composto de material de diversas procedências, parte da triagem desse tipo de caco é a sua análise de composição química para adequação ao processo vidreiro utilizado na fábrica. Além disso, como já visto, o sistema de logística reversa no qual são submetidas as garrafas vítreas ainda não garante um resíduo de alta qualidade, sendo comum a contaminação por impurezas orgânicas e inorgânicas.

Essa grande presença de impurezas no vidro captado por logística reversa origina a necessidade de sistemas mais robustos de beneficiamento dos resíduos. Isso porque o processo vidreiro exige que o caco a ser incorporado à matéria prima tenha alta qualidade, isto é, poucos contaminantes em seu montante, tendo em vista que cada tipo de contaminação do vidro resulta em diferente dificuldade técnica do processo de fabricação das garrafas. (MAIA, 2013).

A presença de grandes quantidades de matéria orgânica no montante vítreo, por exemplo, podem alterar o equilíbrio redox da fusão de matéria prima, podendo gerar problemas de refino e variações na coloração final do vidro. Impurezas de metais e ligas metálicas também causam variação de cor, além de aumentarem o ataque ao refratário do forno, diminuindo, assim, sua vida útil. O excesso de alumínio é causador das chamadas “bolhas de silicone”, oriundas da redução do SiO_2 em Si. Partículas refratárias, como porcelanas e cerâmicas, não são fundidas por terem suas temperaturas de fusão mais altas que a do vidro, de modo a gerarem defeitos de inclusão nas garrafas formadas, diminuindo sua resistência mecânica. (MAIA, 2013; JAIME, 2019).

Além dos contaminantes de outros materiais, como metais e orgânicos, presentes nos cacos, cabe destacar que vidros de diferentes composições químicas também são impurezas relevantes e impactam na eficiência dos artigos produzidos. Para mais dos impactos por coloração, vidros cuja aplicação é específica, como vidrarias de laboratórios, possuem matéria-prima base diferenciada do vidro de embalagem, de modo com que sua reinserção na cadeia produtiva de garrafas não pode ocorrer. Isso porque inserir vidro de borossilicato em fornos de embalagens pode gerar inclusões e até mesmo defeitos de corda, que são pontos de stress heterogêneos na massa vidreira, devido às diferenças de temperatura de fusão. (JAIME, 2019). Abaixo, imagem microscópica da heterogeneidade oriunda de inclusão vítrea e defeito de corda em vidro.

Figura 24 - Inclusão vítrea (a) e defeito de corda (b) visualizadas por microscópio ótico



Fonte: Jaime (2019)

Em vista de todas as implicações técnicas oriunda da presença de impurezas nos resíduos, o beneficiamento do caco pós-consumo se mostra dependente de uma estrutura mais complexa de processos. No geral, as beneficiadoras lançam mão de diversas etapas de tratamento do vidro captado, incluindo uma pré-triagem de separação de contaminantes mais grosseiros, separação prévia de embalagens e artigos de diferentes colorações, lavagem, separação magnética e trituração. Diversos sistemas e tecnologias são hoje empregados na operação desse tipo de atividade, sendo eles classificados pela Abividro (2019) em 3 processos básicos: manual, semiautomatizado e automatizado.

O processo de beneficiamento manual é utilizado em escala artesanal, no qual não há a utilização de equipamentos ou recursos específicos de tratamento no processo. O que ocorre é a catação manual de impurezas, principalmente metálicas e de cerâmica, além da separação por cores. Por ser de menor eficiência e menores montantes de material beneficiado, recomenda-se utilizar vidro proveniente já de coleta seletiva, no qual há menores presenças de outros materiais no montante total. (ABIVIDRO, 2019).

O processo semiautomatizado corresponde a sistema que mescla a catação manual e a utilização de certo grau de recurso tecnológico para a realização das atividades de beneficiamento. É o modo mais utilizado no país pelas beneficiadoras e vidreiras, no qual há maquinários específicos para lavagem (tambor ou tanque), trituração (moinho) e separação magnética (séries de imãs permanentes) do montante captado de vidro pós consumo. A parcela manual do processo reside na triagem manual realizada por meio de esteiras localizadas entre os imãs permanentes e o triturador, no qual trabalhadores, equipados dos devidos equipamentos de proteção individual, realizam a retirada de materiais indesejados do

caco que será reincorporado, como cerâmicas, plásticos e metais que possam ter passado pelos imãs. (ABIVIDRO, 2019). Exemplo desse modo é visualizado na imagem a seguir.

Figura 25 - Catação manual em processo semiautomatizado de beneficiamento de caco



Fonte: Bernardo (2017)

Já o processo automatizado de beneficiamento se difere do anterior pois não há qualquer interferência manual nas atividades de separação de contaminantes. A utilização de novas tecnologias voltadas para o reconhecimento e diferenciação de vidro com potencial de reinserção no processo e impurezas a serem descartadas promove um cenário de altos investimentos iniciais para a implementação desse tipo de processo, de modo com que poucas indústrias o utilizam no Brasil. (ABIVIDRO, 2019).

Um exemplo de usina de beneficiamento de processo automatizado é a presente na vidreira Vidroporto, localizada em Porto Ferreira (SP). A fábrica instalou uma planta automática de beneficiamento em 2013, sendo a primeira no país a utilizar da tecnologia para tal, e tem capacidade de produção de 20 toneladas/hora. A técnica utilizada na planta é disponibilizada pela empresa espanhola Picvisa, e se baseia na separação óptica dos resíduos por suas coloração, material e forma. (VIDROPORTO, 2021). A imagem a seguir mostra visão dessa linha de beneficiamento de caco.

Figura 25 - Usina automatizada de beneficiamento de caco na Vidroporto



Fonte: Vidroporto (2021)

Cabe destacar que o beneficiamento de caco é, em maioria, realizado por empresas específicas, que realizam o acúmulo de resíduos de vidro provenientes de catadores, associações e sistemas de coleta, aplicam os processos de separação e trituração no vidro e o vendem para as vidreiras que irão incorporar em sua produção. Um exemplo dessas beneficiadoras é a Comércio de Cacos de Vidro Mazzeto, cujo processo semiautomatizado gera material suficiente para atender grandes vidreiras como a Owens Illinois e a Saint Gobain.

As atividades realizadas pela Mazzeto iniciam na quebra do material por meio da inserção em funis de martelos, a fim de atender a granulometria requerida. Em seguida, a limpeza é feita por intermédio da circulação do material em esteira, que passa por imãs iniciais que irão retirar tampas, alumínio e ferros presentes no caco. Depois, há a catação manual de outros materiais não metálicos, como cerâmicas e, por fim, mais um imã para garantia de limpeza. Esse processo é realizado de duas a três vezes para atendimento dos requisitos de qualidade dos compradores. (SABIÃO *et al*, 2016).

Ademais, todo material coletado como impureza do processo vidreiro nessas empresas beneficiadoras e que possua valor agregado é passível de ser vendido como reciclável a outros produtores. Isso porque a disposição de rejeitos oriundos do beneficiamento de caco é atividade que possui custos elevados à empresa, tendo em vista a necessidade de direcionar a aterros, além dos grandes volumes que podem vir a ser gerados. A empresa de beneficiamento Catarina Vidros, por exemplo, gera em torno de 20 a 30 toneladas de resíduos por mês, de modo com que se faça necessária a venda de alumínio coletado para supplantar esse custo adicional do processo. (CAETANO, 2017).

A terceirização das operações de coleta e beneficiamento de caco leva a necessidade de criação de sistema de qualidade para o material que está sendo comprado pela indústria de vidro. Desse modo, uma triagem é realizada com todo o resíduo de vidro recebido nas vidreiras antes de ser incorporado às matérias primas, incluindo análises por amostragem e atendimento dos parâmetros determinados de quantidade de impurezas presentes no montante. Caso haja o não atendimento dessas condicionantes de qualidade, o material transportante pode ser até devolvido à beneficiadora, fazendo com que a mesma arque com os custos logísticos do produto não vendido, o que explica o porquê de se refazer o processo de beneficiamento com os lotes mais de uma vez.

Cabe destacar que lotes coletados de resíduos de vidro que não atendem as especificações de qualidade de vidreiras, seja por altas quantidades de impurezas ou por serem de composição química distinta da desejada, podem ser reaproveitados em outros processos produtivos. Cacos de vidro podem ser empregados na produção de espuma e fibra de vidro, na composição de asfalto, em tintas refletivas, bijuterias e na produção de concreto para a construção civil. (CAETANO, 2018). Assim, não há perda da capacidade de reciclagem do material, mesmo que não reaproveitado na indústria vidreira.

Além disso, as próprias indústrias vidreiras podem ser responsáveis pelo beneficiamento de seu caco de processo. A fim de garantir a qualidade do material vítreo que vai ser incorporado à matéria prima, algumas empresas fabricantes de artigos de vidro, como a Vidroporto (SP) e a Ambev Vidros (RJ), possuem suas linhas de beneficiamento próprias, utilizando de seu aporte financeiro e funcionários específicos para a operacionalidade das mesmas. Essas atividades de separação podem ser realizadas individualmente, com caco sujo provindo de cooperativas, ou em série a cacos adquiridos de beneficiadoras, de modo a assegurar os requisitos de qualidade do vidro.

Após o beneficiamento realizado, o caco a ser inserido nos fornos vidreiros passa por processos de trituração, realizados em britadores. Devido a essa etapa, há o garantimento da granulometria necessária ao material para otimização de sua reinserção no processo, de modo com que a sua funcionalidade de diminuição de temperatura para a fusão da massa de vidro seja atendida. O caco é, então, pesado, caracterizado e misturado às matérias-primas brutas antes de sua incorporação nos fornos, geralmente sendo alocados junto à areia nos silos de estocagem.

Capítulo 4 -LOGÍSTICA REVERSA E CONSUMO ENERGÉTICO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

O vidro e as embalagens oriundas do mesmo podem ser vistos como os principais aliados do desenvolvimento sustentável a longo prazo na indústria. Suas características físico-químicas permitem que artigos vítreos sejam capazes de serem reutilizados diversas vezes com a manutenção completa de suas propriedades de resistência mecânica e química, além de admitirem a reciclagem integral de seus resíduos pela reintegração no processo vidreiro. Dessa forma, o vidro conquista seu espaço em qualidade de armazenamento e capacidade de não-geração de resíduos no pós consumo.

Em termos de não-geração de resíduos, cabe o destaque para o uso de garrafas retornáveis na indústria de bebidas e alimentos. Essas embalagens de vidro, apesar possuírem custos de produção mais elevados, tem a capacidade de serem reutilizadas de 20 a 30 vezes com a mesma qualidade de armazenamento, de modo a impactar positivamente nos pontos de vista ecológico – por não gerarem material a ser descartado e depositado em lixões -, econômico – pela não necessidade de produção ou aquisição de novos vasilhames – e até mesmo energético para as vidreiras – uma vez que não precisam dispor parte de sua massa de vidro para a confecção de novas garrafas.

No entanto, a utilização de sistema de garrafas retornáveis só se torna vantajoso quando os índices de quebra dos recipientes é inferior a 5% do total. Isso porque existem outros custos associados a prática de reutilização de artigos vítreos, como o transporte e a lavagem, além da reposição dos invólucros perdidos no processo. Assim, tendo em vista que o sistema de logística reversa de vidro no país envolve a distribuição em grandes distâncias, gerando custos elevados e maior suscetibilidade dos artigos à quebra durante o transporte, pode-se perceber uma diminuição no uso desse tipo de embalagem na indústria contemporânea por sua não viabilidade econômica. (ROSA et al, 2007)

Por esse motivo, ganha importância a reciclagem do vidro pós-consumo em um quadro de crescimento do uso de embalagens descartáveis. Essa reciclagem consiste na utilização de fragmentos vítreos, os cacos, nos fornos como parte integrante do material que será fundido. O caco, ainda que não seja considerado efetivamente matéria-prima no processo vidreiro, é capaz de produzir em proporção de 1:1 novas embalagens de vidro, ou seja, 100 kg de cacos geram 100 kg de massa de vidro para a nova produção.

No ponto de vista ecossustentável, a utilização de caco também atua na diminuição de

gases desprendidos pelo processo vidreiro, especialmente o gás carbônico. Isso se dá pois as matérias primas brutas utilizadas na formação da massa de vidro são majoritariamente empregadas na forma de carbonatos, como a barrilha (carbonato de sódio), de modo com que o processo de fusão leve a decomposição do material em CO₂, que é retirado na forma de bolhas e acaba por carrear parte da energia incidida no processo. Assim, como os fragmentos de vidro não passam por esse processo de descarbonatação, não há a geração desse gás e, portanto, há a diminuição do impacto ambiental na liberação de gases estufa.

Outra vantagem ecológica da utilização do caco reside na substituição da matéria-prima bruta no processo produtivo. Tendo em vista que esses materiais, como areia, barrilha e feldspato, possuem sua origem mineral de fontes naturais, a sua substituição na confecção de vidro representa menores montantes a serem demandados pelo mercado e, por isso, menor extração de seus reservatórios. Com isso, o impacto ambiental associado a mineração e beneficiamento dos reagentes da indústria vidreira é minimizado, em conjunto com menor necessidade de despendimento energético nos processos de introdução dessas matérias-primas no mercado.

Além das vantagens em sustentabilidade supracitadas, a utilização de caco se apresenta como benéfica no ponto de vista econômico para o processo produtivo. Isso porque a utilização de vidro pós consumo nos fornos acarreta em menor gastos na aquisição de matéria prima bruta, especialmente areia e barrilha, além de gerar menores consumos e, por isso, custos ligados a combustíveis empregados na fusão. Essa diminuição de consumo energético nos fornos ocorre devido a diminuição das temperaturas de trabalho e da quantidade de energia perdida no desprendimento de gás carbônico dos óxidos puros em relação ao cenário de reinserção de caco no processo vidreiro. (KOVACEC *et al*, 2011; RUTH *et al*, 1997)

Como consequência direta, os fornos vidreiros existentes no país optam por trabalhar com certo percentual de caco em sua composição de material de fusão, trabalhando com faixas entre 30 a 80% de fragmentos de vidro pós-consumo. Esse percentual varia em cada uma das plantas vidreiras, ficando dependente da quantidade de caco disponível, bem como a qualidade e pureza dos mesmos. Cacos mistos com altos teores de impureza levam a problemas no processo produtivo e, por isso, é exigido controle de qualidade dos materiais a serem reincorporados nos fornos. (KOVACEC *et al*, 2011)

O que é visto no cenário brasileiro, no entanto, é que há certa barreira no aumento da utilização de caco nos fornos devido a baixa qualidade do material. Isso ocorre pois o sistema

de logística reversa existente no país ainda é precário, tanto em suas estruturas de captação e tecnologia de beneficiamento, quanto na organização logística de transporte dos materiais entre os agentes participantes da cadeia de pós-consumo.

Em termos de estruturas de captação, o que é observado é a baixa abrangência do sistema de coleta seletiva a nível Brasil, seja por responsabilidade dos governos municipais ou por empresas especializadas em tal. Isso porque há uma predominância na coleta domiciliar realizadas por órgãos públicos sem uma correta diferenciação dos materiais presentes no montante de lixo, de modo com que o mesmo perca valor agregado e acabe por ser destinado a lixões e aterros sem o processamento adequado.

Além disso, a infraestrutura logística de captação e transporte entre os agentes integrantes do ciclo de logística reversa do vidro interfere ativamente nos baixos índices ainda percebidos de reciclagem do mesmo. Tendo em vista a necessidade de altos gastos para realizar a coleta desse material, uma vez que são percorridas grandes distâncias para garantir o montante necessário para venda às vidreiras, acaba por se formar um cenário de não viabilidade econômica de manutenção dessas rotas de cadeia reversa. Com isso, menos material é fornecido à indústria do vidro para ser reinserido no seu processo, afetando diretamente a porcentagem de caco utilizada nos fornos atuais.

Outrossim, a menor porcentagem de caco usada pelas vidreiras é impactada diretamente pela precariedade das estruturas e tecnologias de beneficiamento do material vendido. O cenário que é visto no país é ainda bastante rudimentar no quesito das técnicas utilizadas na limpeza e seleção do vidro pós-consumo captado, com predominância de processos manuais e semiautomatizados de beneficiamento. A consequência direta é uma menor qualidade do material beneficiado e menor quantidade obtida, tendo em vista que esses tipos de processamento são de menor escala e velocidade de processo.

Cabe salientar que a hesitação dos agentes de captação e beneficiamento de investir em novas tecnologias voltadas para o aumento da qualidade do caco reside nos altos investimentos necessários para tal. Em contrapartida a esse capital essencial de aplicação e desenvolvimento, o valor de venda do caco processado é baixo em comparação aos custos totais envolvidos, seja o de transporte, de capacitação de pessoal ou de destinação dos montantes de impurezas retiradas, de modo com que o apelo na ampliação desse modelo de negócio seja baixa e pouco incentivada. (CAETANO, 2017)

Outro ponto a ser destacado com relação às desvantagens de desestruturação do sistema de logística reversa no país diz respeito à avaliação do ciclo de vida das embalagens

de vidro. O estudo conduzido por Gaines e Mintz (1994) defende que, contrariamente ao reuso de garrafas retornáveis, a reciclagem de artigos vítreos pode não incorrer em economia de energia no que diz respeito ao cenário global do material em questão.

Isso porque as economias de energia associadas ao processo completo de reciclagem do vidro acabam por depender de fatores locais, como densidade populacional, localização dos aterros e lixões, localização dos pontos de coleta e armazenamento do material, além da localização das plantas vidreiras e sua eficiência. A partir da análise do ciclo de vida dos artigos vítreos, é perceptível que há um aumento da economia de energia caso os aterros sejam mais afastados, enquanto que há diminuição de frugalidade energética no cenário de pontos de coleta e beneficiamento longínquos, ou da localização distanciada da planta de vidro que irá ser atendida.

Como conseqüente, ainda que haja poupança energética na utilização de caco para a extração de matérias primas e na eficiência dos fornos, sistemas de logística reversa pouco estruturados, com poucos pontos de coleta e grandes distâncias percorridas, levam a não economia de energia no balanço global das operações. (GAINES E MINTZ, 1994). Com isso, faz-se indispensável o investimento no desenvolvimento dessas cadeias reversas em cenários locais e em nível nacional para atender as necessidades e demandas da indústria vidreira e da onda de sustentabilidade no país.

Por fim, cabe destacar que, independente da qualidade do sistema de logística reversa, as vantagens energéticas da aplicação de caco nos fornos vidreiros são indiscutíveis, de modo com que devam ser incentivadas no sentido de realizar manutenção sustentável e economicamente viável do setor em uma prospecção a longo prazo.

4.1 Impacto da utilização de caco no consumo energético de fornos

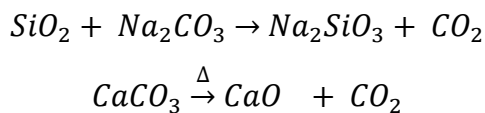
A produção de garrafas de vidro é considerada um processo intensivo em gastos energéticos. Essa classificação é oriunda de sua alta demanda por incidência de energia, majoritariamente empregada em troca térmica dentro dos fornos de fusão e dos canais de condicionamento de vidro, onde as temperaturas de trabalho alcançam valores acima de 1600°C.

Essas altas temperaturas de trabalho são originadas dos processos básicos de formação da massa vidreira. A primeira etapa da produção do vidro envolve a fusão de suas matérias primas, sendo a principal e majoritária delas a areia (SiO₂). A sílica que compõe esse material

possui temperatura de fusão de 1710°C, de maneira com que outros óxidos são adicionados à mistura a ser fundida com o propósito de abaixar esse valor almejado de temperatura.

Ainda assim, um grande montante de calor e, por isso, de energia, precisa ser incidido nos fornos de fusão para o alcance da temperatura necessária para fundir a mistura de matérias-primas brutas utilizadas. Estudos de Ruth *et al* (1997) mostram que entre 55 e 65% de toda a energia necessária para o processo é usada nas etapas de fusão e refino da massa vidreira antes da confecção dos artigos, de modo com que essas sejam, então, o foco para a diminuição do consumo energético nas plantas produtivas.

Além da energia requerida pelo processo produtivo em si, pode-se perceber que parte do calor despendido para os fornos é perdido devido ao desprendimento dos gases formados durante a fusão e refino. Isso ocorre pois a matéria prima que é utilizada na fabricação de garrafas é inserida no reator como forma de carbonatos, com destaque para o carbonato de sódio (Na₂CO₃) e o carbonato de cálcio (CaCO₃), de modo com que os óxidos necessários para a formação da massa vidreira sejam obtidos após a reação de descarbonatação do reagente. Essa descarbonatação é evidenciada pelas reações a seguir:



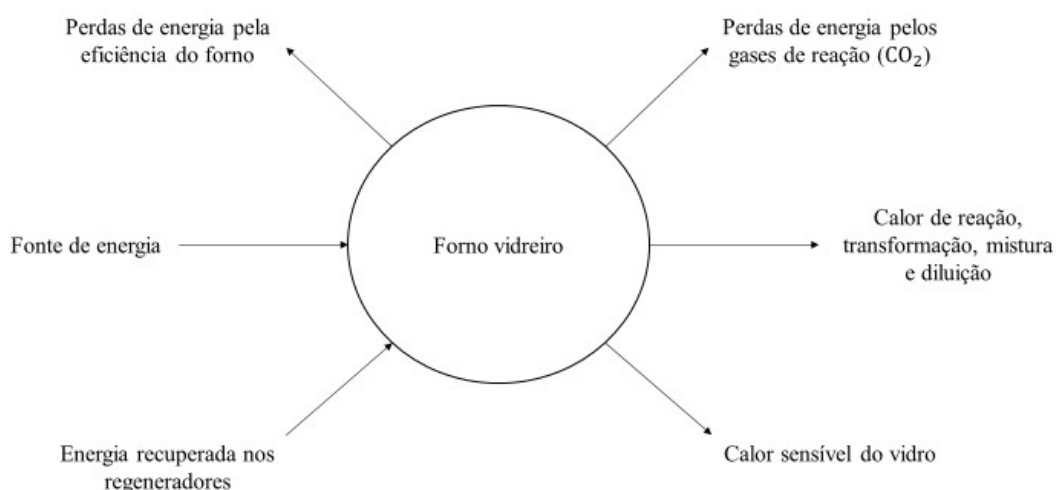
Com isso, há a formação de certo volume de gás carbônico (CO₂) na massa vidreira, que se desprende do meio reacional na forma de bolhas. Essas bolhas são importantes para a homogeneização do vidro fundido presente no forno. No entanto, o desprendimento das mesmas leva ao carreamento de parte da energia incidida no processo, gerando perdas energéticas e diminuição da eficiência global da produção. (KOVACEC, 2011)

Outro ponto de demanda energética dentro dos fornos vidreiros consiste na manutenção da massa produzida a altas temperaturas. Essa requisição é oriunda da necessidade de manter o vidro na sua forma fundida, com aspecto de um “xarope” grosso e avermelhado, de modo com que a moldagem das garrafas possa ser realizada a partir da *IS Machine* com produção de artigos de alta qualidade. Com isso, parte dos gastos energéticos são desviados para a preservação do calor sensível do vidro. (KOVACEC, 2011; LOREDO *et al*, 1968)

Por fim, cabe destacar que os fornos de fusão vidreiros contemporâneos possuem

baixa eficiência energética quando analisado o processo global. É verificado que o aproveitamento de calor fornecido aos reatores alcança valores de 50% do total despendido, de modo com que as plantas de fabricação disponham de recursos para otimizar essas grandes perdas por eficiência, como por exemplo o uso de regeneradores de calor (MAIA, 2003). A imagem a seguir esquematiza o balanço de energia que ocorre nos fornos vidreiros.

Figura 27 - Resumo esquemático do balanço de energia em fornos vidreiros



Fonte: Adaptado de Loredó *et al* (1986)

Toda essa alta demanda energética nos fornos é suprida pela utilização de gás natural como fonte combustível. Essa matriz energética é a preferencial em plantas vidreiras devido a suas características inerentes, gerando vantagens comparativas quando comparado a outros combustíveis, como queima mais uniforme, melhor controle das variáveis do processo, melhor manutenção dos queimadores e menores taxas de emissão de poluentes. (MAIA, 2003)

Complementarmente, alguns fornos vidreiros utilizam apoio energético de matriz elétrica devido ao alto montante necessário, além de maior uniformidade de troca térmica obtida pelo uso da energia elétrica. Por meio de estruturas chamadas *Boostings*, é inserida eletricidade como fonte de energia, estabilizando mais eficientemente a temperatura e aumentando a capacidade nominal dos fornos (BNDES, 2007; MAIA, 2003).

Essa necessidade de alta incidência de energia leva a indústria do vidro desenvolver estudos e pesquisas voltadas para a redução do consumo do recurso nos fornos. Isso porque, além da questão de sustentabilidade relacionada a matriz energética, há intensivos gastos para o fornecimento de energia necessários ao forno, tendo em vista que tanto gás natural quanto a

eletricidade são fontes de alto valor unitário. (PEREIRA, 2015).

A principal prática utilizada com o propósito da diminuição do consumo energético é a incorporação de caco de vidro na mistura que será fundida nos fornos. Essa forma de reciclagem é amplamente conhecida na literatura e é comumente vista nas fábricas de confecção de artigos vítreos, utilizando-se cacos originados dos rejeitos da própria planta e vidro pós-consumo decorrente de logística reversa. Nesse sentido, fornos vidreiros são capazes de utilizar com sucesso experimental até 80% de caco na sua produção, sendo as porcentagens mais comumente vistas entre 30 a 70% do volume total inserido no reator.

O principal impacto oriundo da inserção de caco reside no processo de fusão da matéria prima. Tendo em vista que o processo de derretimento dos fragmentos de vidro não requer energia para a reação endotérmica de fusão, o que ocorre com a areia e os óxidos complementares, a inserção desse material leva a necessidade de menores temperaturas de trabalho para os fornos. Além disso, o tempo de duração da fusão é diminuída, aumentando a capacidade nominal dos fornos. Com isso, menos incidência de energia térmica é requerida pelo processo, aumentando sua eficiência.

Outro aspecto impactado pela utilização do caco é a menor geração de gases decorrentes do processo de decomposição dos carbonatos da matéria prima bruta. Por não ocorrerem reações de descarbonatação das matérias primas brutas, não há um montante grande de formação de CO₂, de modo com que a parte da energia que era perdida pelo desprendimento das bolhas seja conservada na produção da massa vidreira. (KOVACEC, 2011; LOREDO *et al*, 1968, RUTH *et al*, 1997)

A tabela a seguir demonstra as economias energéticas associadas ao uso de caco no processo de produção de novos artigos de vidro, conforme estudo de Kovacec (2011).

TABELA 3 – ECONOMIAS DE ENERGIA (EM KJ/KG DE VIDRO) DEVIDO AO USO DE CACO

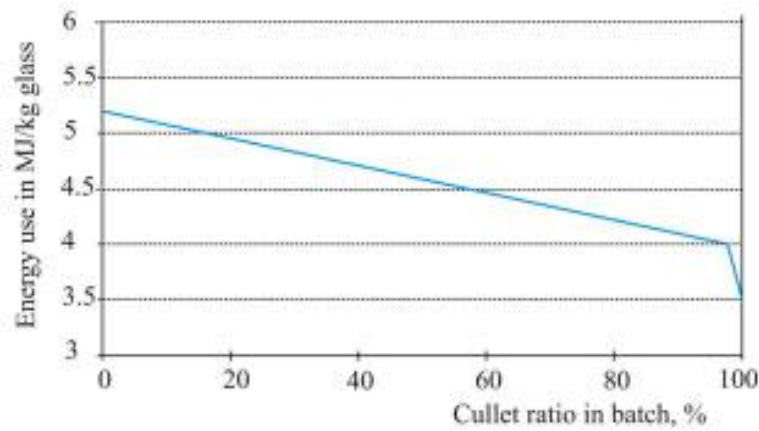
Impacto	Energia gasta (kJ/kg de vidro)
Consumo de energia teórica para fusão de vidro a partir de matéria prima bruta	2550
Energia proveniente da decomposição de gases da matéria prima	176
Barreira térmica (condução de calor e perda) e perda por gases de combustão	2074
Total de energia consumida em forno de vidro por kg produzido (sem caco)	4800
Consumo de energia teórica para fusão de vidro a partir de 100% de caco	1750
Barreira térmica (condução de calor e perda) e perda por gases de combustão	1800
Total de energia consumida em forno de vidro por kg produzido (100% de caco)	3600
Economia de energia por derretimento de 100% de caco no lugar de 100% de fusão de matéria prima bruta	1200

FONTE: Adaptado de Kovacec (2011)

Percebe-se, portanto, que a utilização de caco pode inferir em economia de até 30% somente no processo de fusão e refino do vidro, condizendo com o que foi explicitado também nos estudos de Deng *et al* (2019). Além disso, considerando todas as requisições energéticas presentes no processo vidreiro dentro dos fornos, a incorporação de caco pode levar diminuição no consumo energético de até 25% do total, levando em conta somente a manutenção das reações no interior dos fornos vidreiros.

Tendo em vista a inviabilidade de se trabalhar somente com o derretimento de cacos para a confecção de novos artigos vítreos, o estudo de Kovacec (2011) mostra que a substituição de 10% de matéria prima bruta em vidro fragmentado leva a diminuição de 2,5 a 3,3% do consumo energético. Isso condiz com o que é defendido pela Abividro (2019), de modo a estimular a reincorporação de caco no processo produtivo de garrafas de vidro. A imagem a seguir demonstra essa relação de economia de energia com o aumento do uso do caco de vidro.

Figura 28 - Relação entre energia de fusão (em MJ/kg de vidro) e % de caco em fornos



Fonte: KOVACEC (2011)

Cabe destacar que o impacto da diminuição da temperatura dos fornos não é sentido apenas na redução no consumo energético, mas também na manutenção e extensão da vida útil dos fornos. Com temperaturas menos elevadas e, assim, mais controladas de operação, o ataque ao refratário do qual os fornos são feitos é diminuído, levando a menor desgaste da estrutura dos fornos. Dessa forma, há maior qualidade em trocas térmicas no processo vidreiro, extensão do tempo de utilização dos fornos e economias em custos de manutenção dos mesmos. (MAIA, 2003).

No entanto, é notável que todas essas vantagens na utilização de caco nos fornos é dependente da qualidade do material que será reincorporado no processo. Altos níveis de impureza alteram os parâmetros de processo no interior dos fornos, bem como a utilização de fragmentos vítros de composições não condizentes com a matéria produzida pelos mesmos. Dessa forma, é destacada a necessidade de um sistema de logística reversa de caco, desde sua captação a seu beneficiamento, bem regulamentado e estruturado, de modo a atender essas demandas de qualidade e possibilitar o usufruto das benesses por parte da indústria vidreira.

4.2 Análise econômica

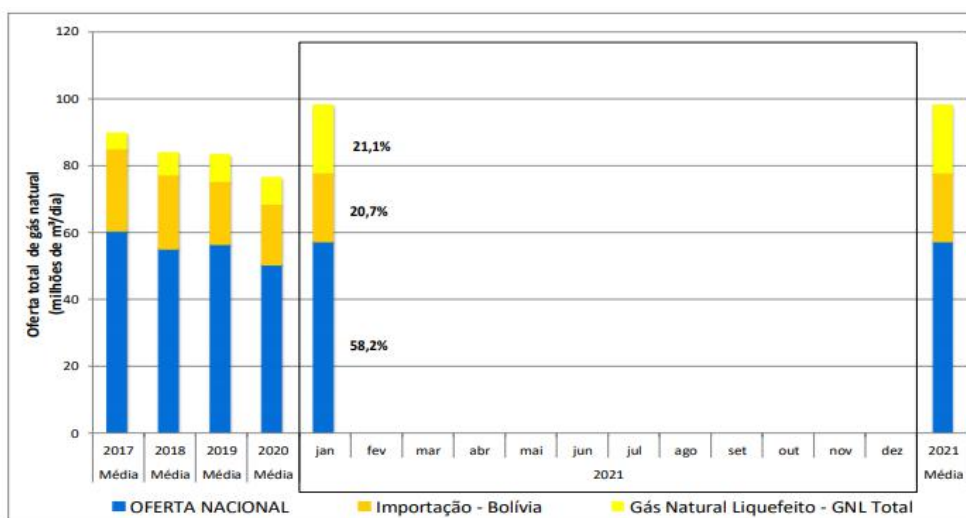
Outro ponto a ser observado com a incorporação do uso de caco em fornos vidreiros é a vantagem econômica que pode ser usufruída pelas fábricas participantes. Uma vez que o setor de produção de embalagens de vidro conta com competidores consolidados e em crescente desenvolvimento, como os plásticos, a diminuição de custos associados ao processo

produtivo se torna essencial para a manutenção dos artigos vítreos em seu patamar de *market share* na indústria.

O principal impacto que pode ser percebido com a reciclagem do vidro é a diminuição dos gastos em energia pela compra de insumo calorífico. Tendo em vista seu caráter de intensividade energética, a quantidade de gás natural adquirida por fábricas vidreiras é de grande volume. Utilizando valores encontrados no estudo de Kovacec (2011), um forno vidreiro que produz apenas pela fusão de matéria prima bruta e com capacidade produtiva de 150 toneladas/dia possui demanda energética de 60.000 MJ/dia. Considerando o poder calorífico do gás natural como 9400 kcal/m³ (COMGAS, 2021), esse forno hipotético consumiria cerca de 1525 m³ de gás natural por dia.

Esse grande montante se torna um desafio em um cenário brasileiro de instabilidade no fornecimento de gás natural. Uma vez que o país possui modestas reservas de gás natural disponíveis em contraste a sua alta demanda pelo mesmo, é presenciado o quadro de dependência de importação do recurso energético para abastecimento industrial, sobretudo de países sulamericanos, como a Bolívia (EPE/MME, 2015). O último Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural (MME, 2021) mostra que cerca de 42% da oferta do combustível foi proveniente de importação, seja via gasoduto boliviano ou pela regaseificação de GNL, conforme mostra a imagem a seguir.

Figura 29 - Oferta de gás natural para a indústria no país



Fonte: MME (2021)

A consequência direta desse cenário é o encarecimento do gás natural a ser consumido

pela indústria e, com isso, maior impacto nos custos totais da fabricação de garrafas de vidro. Considerando o preço médio de 14 US\$/MMBTU para a matriz energética no ano de 2020 (BARROSO *et al*, 2020), o fábrica sujo forno produz 150 toneladas de vidro/dia com fusão apenas de matéria prima bruta gasta cerca de 796 US\$/dia com aquisição de gás natural. Isso significa a disposição de 1,55 milhões de reais por ano² para a compra de combustível para a manutenção do processo produtivo vidreiro.

Dessa forma, o impacto causado pela redução da demanda energética associada a utilização de caco em fornos vidreiros pode ser prontamente demonstrada. Como já explicitado, 10% de substituição de matéria prima por fragmentos de vidro resulta em uma média de 3% de redução do consumo de gás natural (KOVACEC, 2011). Isso significa que fornos com produção de 150 toneladas de vidro/dia economizam cerca de 23,7 US\$/dia de produção a cada 10% de caco inserido, de modo com que o montante total de gastos com gás natural chegue a redução de aproximadamente 50 mil reais por ano.

Essa mesma análise, ao ser realizada com a média atual de 60% de caco em fornos vidreiros no Brasil, demonstra que 313 mil reais podem ser economizados por ano somente no que diz respeito ao custo de matriz energética da planta vidreira. Considerando que boa parte da manutenção das fábricas atuais tem seus gastos voltados para o consumo de energia, redução de custos significa ampliação de vantagem competitiva e sustentabilidade para o negócio de produção de garrafas de vidro.

Ademais, o uso de caco nos fornos significa também redução do consumo de matéria prima bruta para a obtenção de novos produtos de vidro. Isso porque os fragmentos de vidro atuam como substitutivos dos materiais puros utilizados, como areia, barrilha e feldspato, atuando como “matéria prima” para a fusão da massa de vidro desejada. Tendo em vista que 1 tonelada de caco leva a produção de 1 tonelada de vidro, e que são necessários cerca de 1,17 toneladas de matéria prima bruta para a formação da mesma quantidade, podemos perceber uma redução imediata do montante de material despendido (KOVACEC, 2011).

O impacto oriundo no ponto de vista econômico diz respeito nos valores das matérias primas para a fusão vidreira. Com relação aos insumos necessários para o processo vidro, pode-se dizer que os mesmos são relativamente abundantes, uma vez que são provenientes de fontes naturais. A única exceção, no entanto, aplica-se à barrilha, que representa a mais de 60% dos custos com matéria prima, ainda que corresponda a somente 15% do montante em peso. Isso ocorre pois o carbonato de cálcio disponível no Brasil é obtido via importação,

²Cálculo realizado considerando o câmbio PTAX de 20/04/2021: 5,5266 R\$/US\$

tendo em vista que o único produtor de barrilha no país, a Companhia Nacional de Alcális, está com suas atividades paralisadas desde 2006 (BNDES, 2007).

A análise da economia de recursos pode também ser realizada no que diz respeito as matérias primas. Considerando os valores dos insumos descritos por Maccari *et al* (2019) e o preço de venda de caco misto descrito por Sabião *et al* (2015) foi montada tabela a seguir com os custos totais relativos a produção de artigos de vidro.

TABELA 4 – PREÇOS DE COMPRA DE INSUMOS VIDREIROS

Matéria prima	Custo (R\$/ton de MP)	Ton MP/ton de vidro	Custo (R\$/ton de vidro)
Areia	45	0,65	29,29
Barrilha	3190	0,22	701,8
Carbonato de cálcio	800	0,19	152
Feldspato	60	0,11	6,6
Total	4095	1,17	889,69
Caco misto	190	1	190

FONTE: Elaboração própria

A partir dos valores apresentados, é possível inferir que, a cada tonelada de caco que é reinserida no processo vidreiro, cerca de 700 R\$ são economizados, representando 78% de redução do custo unitário da tonelada de vidro novo. Considerando um forno vidreiro que produz 150 toneladas de vidro/dia e com a utilização de 60% de caco em seu processo de fusão, estima-se uma economia de 63 mil reais por dia de produção, podendo chegar a 22 milhões por ano em redução de custo.

Cabe ressaltar, no entanto, que essas análises são apenas preliminares, sem considerar custos adicionais de caracterização do caco inserido, beneficiamento adicional ou quaisquer novas incorrências associadas a substituição de matéria prima por fragmentos de vidro reciclado. Faz-se então, necessária a análise de viabilidade econômica mais robusta para determinação precisa da redução de custo relativos ao uso de caco.

Não obstante, os números apresentados explicitam as benesses econômicas capazes de serem usufruídas pela reciclagem de vidro na indústria. Além das reduções de custo em energia e na aquisição de matéria prima, a utilização do caco incorre em diminuição no valor unitário total do vidro quando se analisa o completo ciclo de vida do material. Isso porque a reincorporação das embalagens no processo vidreiro leva a menor extração de matéria prima e, com isso, menores custos associados a essa atividade.

Outrossim, a sustentabilidade de longo prazo da indústria de garrafas de vidro perpassa a reciclagem não somente no que tange a diminuição de custos, mas também para suprir demandas de recursos em futuros cenários projetados de escassez dos mesmos. Isso porque os principais insumos para a fabricação de vidro são altamente dependentes da importação, de modo com que fique submetido ao mercado externo e ao câmbio do dólar. Cenários de crise econômica podem levar a escassez de recursos, principalmente barrilha e gás natural (BNDES, 2007).

Dessa forma, a importância da estruturação de um sistema de logística reversa robusto e de qualidade sobressai após a análise econômica, avaliando-se os impactos em redução de custos em plantas fabris de produção de vidro. Maior disponibilidade de caco para fornos significa menores gastos unitários para fabricação de artigos de modo proporcional. Ainda que o investimento inicial para o estabelecimento de uma cadeia reversa funcional seja alto, os resultados a longo prazo tendem a compensar o aporte financeiro destinado a tal.

4.3 Oportunidades para o setor

A análise das oportunidades de desenvolvimento da logística reversa no Brasil iniciam no estudo da reestruturação do sistema como um todo. Pelos números levantados com relação a quantidades e porcentagens de destinação correta e reciclagem praticados no país, pode-se inferir que o modelo atual de captação de resíduos vítreos e seu beneficiamento não é eficaz em seus objetivos. Dessa forma, novos modos de funcionamento devem ser estudados, seja a partir de exemplo de casos de sucesso, como o Europeu, como na inovação por parte de órgãos e estudos desenvolvidos nesse sentido.

Estudos realizados por Caetano (2017), por exemplo, levantam que a menor abrangência dos canais reversos de vidro no país são resultado do sistema de coleta porta a porta *single-stream* realizado no país, sem separação exclusiva para o vidro. Com isso, há maior custo com o beneficiamento e menor valor agregado do produto, diminuindo interesse na efetiva reciclagem do mesmo. O trabalho defende que a forma mais eficiente de se realizar a captação de materiais vítreos reside na implementação de Pontos de Entrega Voluntária, os PEVs, modelo fortemente empregado na Europa.

Esses PEVs se mostram como opção favorável para a cadeia de reciclagem devido a seu baixo custo de operação, sendo caracterizado por grandes locais estruturados para a coleta de material depositado pela população de forma voluntária, além da menor necessidade de

separação do vidro de outros materiais. Todavia, sua implementação requer a adesão da população a seu funcionamento, o que deve ser incentivado por meio de campanhas e também da disponibilização de o maior número de pontos viáveis por toda a localidade a ser contemplada. Quanto menores as distâncias necessárias a serem percorridas pelo indivíduo para o descarte em PEVs, maior o sucesso de sua implementação.

Ademais, em casos em que o modelo de PEV não atinja os resultados esperados devido a baixa adesão, pode-se trabalhar em cima da coleta porta a porta, adotando práticas simples que possam potencializar a captação seletiva do material. Um exemplo é a coleta em fração única, no qual o sistema de captação é exclusivo para um tipo de resíduo, de modo a evitar a contaminação cruzada. Outra prática que pode ser adotada para diminuir essa problemática é a coleta seletiva porta a porta de orgânicos, permitindo uma triagem otimizada dos recicláveis (CAETANO, 2017).

Complementarmente, cabe destacar que os sistemas de beneficiamento brasileiros são majoritariamente pautados na catação manual, utilizando de pouca automação em seus processos. Oportunidades de alavancar a reciclagem estão atreladas ao uso de novas tecnologias, no sentido de aumentar quantidades de vidro a ser destinado a vidreiras, além da qualidade requisitada do mesmo. Esse movimento de melhoria dos pontos de beneficiamento já são percebidos no país, com a introdução de plantas completamente automatizadas.

As melhorias que podem ser empregadas na parte do beneficiamento consistem no uso de tecnologias para a otimização da separação dos materiais desejados (vidro) dos resíduos. Os modelos de maquinários atuais para essa catação automática podem utilizar de tecnologia óptica, com a combinação de luz visível, espectroscopia de infravermelho, sensores magnéticos indutivos e ultravioleta, para diferenciar resíduos plásticos, metálicos e até mesmo cerâmicos dos fragmentos de vidro a serem reciclados, além de serem capazes de separar cacos por sua coloração. Aparelhagem mais novas lançam mão até mesmo de inteligência artificial para o reconhecimento e separação dos resíduos de vidro de materiais indesejados (PICVISA, 2021).

No entanto, é de conhecimento que essas novas tecnologias e sua implantação necessitam de uma custosa reestruturação dos pontos de beneficiamento atuais, gerando um aporte inicial de investimento robusto. Uma alternativa para viabilizar a melhora no sistema de triagem do material vítreo é a mistura de operação manual e automatizada, utilizando, por exemplo, séries de imãs para a captação de metálicos, por exemplo.

Outra prática que pode ser adotada para a otimização da logística reversa de caco é a

utilização de resíduos de vidro que, por suas características como tamanho, acabam por serem descartados ou destinados a indústrias alternativas (como de asfalto), diminuindo seu valor agregado. Nesse sentido, o estudo de Deng *et al* (2019) explora a utilização de briquetes³ feitos pela compressão de cacos de granulometria muito baixa para a sua reinserção nos fornos com silicato de sódio, carbonato de sódio e água.

Os resultados mostram que a utilização de 15% desses briquetes na mistura de matérias primas levou a diminuição do consumo de energia pela aceleração das reações de decomposição dos insumos e diminuição da energia de ativação das decomposições dos carbonatos. Assim, há a oportunidade de utilizar caco de vidro que previamente seria disposto em aterros, causando custos adicionais aos beneficiadores, para a formação desses briquetes com a potencialização das vantagens energéticas da utilização de fragmentos de vidro reciclado nos fornos (DENG *et al*, 2019).

Por fim, cabe destacar que, além das modificações no sistema de logística reversa e otimizações dos processos de beneficiamento de caco, oportunidades podem ser percebidas na introdução do caco na mistura de matéria prima. Uma dessas novidades reside no preaquecimento dos fragmentos de vidro a temperaturas de 450°C utilizando um sistema de contra-fluxo com os gases desprendidos do próprio forno que será inserido. Essa possibilidade reutiliza parte da energia que seria perdida no forno para facilitar os processos de derretimento do caco, diminuindo o consumo energético em até 8% nos casos estudados. (BEERKENS AND MUYSENBERG, 1992).

³Briquetes são blocos densos e compactos de materiais energéticos, geralmente usados na reciclagem de madeira.

Capítulo 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento e consolidação das embalagens de vidro na indústria alimentícia, bem como a tendência atual de utilização de garrafas de uso único, tornam necessários o estabelecimento e desenvolvimento de uma estrutura de reciclagem que possa abranger o montante de resíduo gerado por esse setor. A reinserção de caco de vidro no processo produtivo se mostra como uma alternativa sustentável ecológica e financeiramente, refletindo em benefícios tanto para a indústria, com a redução de consumo de energia e matéria prima, quanto para a sociedade como um todo.

Com base nisso, o trabalho atual se propôs a analisar a cadeia reversa de embalagens de vidro no país, a fim de observar as vantagens obtidas pela indústria vidreira ao se consolidar uma estrutura eficiente e de qualidade de retorno de caco pós consumo aos fornos instalados. Pôde-se inferir que o objetivo do estudo foi atingido, tendo em vista que foi destrinchado o cenário próximo do real, dadas as limitações de obtenção de informações confiáveis disponíveis, de produção de vidro, captação e beneficiamento de caco e as benesses adquiridas da utilização de reciclagem no setor de vidro no país.

Para tanto, os objetivos específicos foram atendidos ao decorrer do estudo. Houve a descrição completa do processo de produção de garrafas de vidro no país, bem como o completo panorama da logística reversa de caco em vigor na atualidade, incluindo seus pontos fortes e oportunidades de melhoria. Por fim, foi estudado os impactos energéticos e econômicos da reincorporação de fragmentos de vidro na indústria, explicitando maneiras de aperfeiçoamento das técnicas e estruturas aplicadas na atualidade.

Com base no que foi observado no trabalho chegamos às seguintes conclusões:

1 - A estrutura vigente de logística reversa de vidro necessita de uma melhor organização, tendo em vista que as quantidades e qualidade do caco que retorna à indústria vidreira não atende os requisitos para seu aproveitamento benéfico.

2 - O sistema atual, de captação porta a porta sem coleta seletiva e beneficiamento majoritariamente manual, com predominância de agentes independentes e com baixo valor agregado nos produtos, diminui a atração e interesse de novos investimentos no setor.

3 - As vantagens energéticas, ecológicas e econômicas da reciclagem do caco são minimizadas pelo sistema vigente. Devido a baixa abrangência da logística reversa no país, o que é percebido são pequenas porcentagens de uso de caco nas fábricas e, por ainda ser um material de baixa qualidade, a geração de problemas operacionais nos fornos pela presença de

contaminantes. Dessa forma, os benefícios explicitados não são aproveitados, tendo em vista que a introdução de 10% de caco nos fornos leva a redução de 3% no consumo de energia e mais de 10 mil reais de economia por dia, além da menor dependência de matérias primas importadas e manutenção menos custosa dos fornos vidreiros.

4 - Dessa forma, pode-se inferir que a hipótese levantada pelo presente estudo foi confirmada, uma vez que a utilização de caco em fornos industriais é fundamental para a manutenção do setor em termos de sustentabilidade a longo prazo e competitividade por suas vantagens energéticas e econômicas. Isso, no entanto, depende de uma cadeia de logística reversa bem estruturada e com alta qualidade para que possa haver o usufruto dos benefícios conhecidos da reciclagem de vidro.

5 - Vale ressaltar que o atual trabalho foi realizado com base em pesquisa exploratória a partir de método bibliográfico e documental, de modo com que as análises realizadas durante a estruturação do mesmo ficassem restritas a números preliminares e sem estudo de caso prático probatório.

Capítulo 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 – Aprofundar o estudo dos impactos da reciclagem de vidro para as fábricas que lançam mão desse recurso, utilizando números factíveis para traçar a tendência de benefícios em redução de custos, consumo energético e de matéria prima.

2 - Outro ponto de melhoria nos estudos reside na exploração de novas estruturas de captação, beneficiamento e reintegração do caco, de modo com que os *gaps* abertos e explicitados pelo presente trabalho sejam otimizados para o fechamento do ciclo da cadeia reversa desse bem reciclável.

3 - Um estudo de viabilidade econômica se torna pertinente para verificar o retorno a longo prazo de possíveis investimentos na reciclagem de vidro pós consumo, bem como a experimentação de novos modelos de logística.

Capítulo 7 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMBEV. Captação de caco interno. **Documentos Internos**. 2020

AMORIM, F. M. S. **Modelos matemáticos para planejamento da produção em indústrias de embalagem de vidro**. Tese (Doutorado em Ciências da Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 125. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Guia de Reciclagem do Vidro**. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/>>. Acesso em: 27/12/2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS (ABRABE). **Glass is Good**. 2021. Disponível em: <<https://www.abrabe.org.br/glass-is-good/>>. Acesso em: 20/03/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS (ABRABE). **Glass is Good ganha escala setorial**. 2021. Disponível em: <<https://www.abrabe.org.br/salaimprensa/glass-is-good-ganha-escala-setorial/>>. Acesso em: 20/03/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM (ABRE). **Estudo ABRE Macroeconômico da Embalagem e Cadeia de Consumo**: Apresentação março de 2020: retrospecto de 2019 e perspectivas para o ano de 2020. 2020. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/ano2019/>>. Acesso em: 21/02/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 21/02/2021.

BARROSO, L. A.; KELMAN, R.; GASPAR, L. S. **Panorama e Perspectivas para o Gás Natural no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.emaisenergia.org/wp-content/uploads/2020/09/PanoramaPerspectivasGasNaturalBrasil.pdf>> Acesso em: 21/04/2021

BEERKENS, R. G. C.; MUYSENBERG, H. P. H. Comparative study on energy-saving technologies for glass furnaces. **Glastechnische Berichte**, v. 65, n. 8, p. 216-224, 1992.

BENETTI, M. **Modelo metodológico para formulação e implantação de programas de coleta seletiva em municípios de pequeno porte**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BERNARDO, F. A reciclagem de Vidros. **II Workshop Universidade - Indústria em Materiais Vítreos**. 2017. Disponível em: <https://wikividros.eesc.usp.br/media/eventos/ii-workshop-uimv/4-fabio_reciclagem_de_vidros_no_brasil.pdf>. Acesso em: 27/03/2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Brasília.

BRASIL. **Aberta consulta pública para reciclagem de embalagens de vidro em todo o Brasil**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/aberta-consulta-publica-para-reciclagem-de-embalagens-de-vidro-em-todo-o-brasil-1>>. Acesso em: 16/03/2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo Setorial de Embalagens em Geral**, 2015. Disponível em: <<http://www.sinir.gov.br/web/guest/embalagens-em-geral>>. Acesso em: 17/03/2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Classificação Brasileira de Ocupações**. Disponível em: <<http://www.mtecbo.gov.br/>>. Acesso em: 20/03/2021.

CAETANO, A. C. G. **Sistema de Logística Reversa de Embalagens de Vidro Pós Consumo**. Dissertação (mestrado) -Universidade Federal de Santa Catarina, CentroTecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis. 2018.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 3ª ed. São Paulo:Humanistas, 1999

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130-138, 2014.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL DE RECICLAGEM. **Ciclosoft 2012**.
Campinas: CETEA/CEMPRE. 2012

CHAVES, G. L. D.; SANTOS JR., J. L.; ROCHA, S. M. S. The challenges for solid waste management in accordance with Agenda 21: A Brazilian case review. **Waste Management & Research**, v. 32, p. 19-31, 2014.

COALIZÃO. **1º Relatório de Desempenho do Sistema de Logística Reversa de Embalagens em Geral**. [S.l.], 2017.

COMGAS. **Características do Gás Natural**. 2021. Disponível em:
<<https://www.comgas.com.br/para-industria/caracteristicas-do-gas-natural/>>. Acesso em:
21/04/2021

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, 2002.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1988.

CRUZ, N. F., FERREIRA, S., CABRAL, M., SIMÃO, P., MARQUES, R. C. Packaging waste recycling in Europe: Is the industry paying for it?. **Waste Management**, Lisboa, 34, p. 298-308, novembro, 2013.

D'ANTONIO, M.;HILDT, N; PATIL, Y; MORAY, S; SHIELDS, T. **Energy Efficiency Opportunities in the Glass Manufacturing Industry**. New York. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 2003.

DENG, W; WRIGHT, R.; BODEN-HOOK, C.; BINGHAM, P. A; Melting Behaviour of Waste Glass Cullet Briquettes in Soda-Lime-Silica Container Glass Batch. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 10, n. 1, 2019.

DEMAJOROVIC, J.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, L. N. S.; SILVA; M. J. C. Integrando empresas e cooperativas de catadores em fluxos reversos de resíduos sólidos pós-consumo: o caso Vira-Lata. **Cadernos EBAPE.BR**, v.12, Edição Especial, p. 513-532, 2014

EPE/MME, **Balanco Energético Nacional 2008**. Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Rio de Janeiro, RJ, 2008.

EPE/MME. **Plano Nacional de Energia – 2030**. Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Rio de Janeiro, RJ, 2015.

EUROSTAT. **Recycling rates of packaging waste for monitoring compliance with policy targets, by type of packaging**. 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASPACR__custom_649157/default/table?lang=en>. Acesso em: 07/03/2020.

FARIA, C. R. S. M. **A política nacional de resíduos sólidos**. Brasília. Disponível em: <<http://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/242672>> . Acesso em: 16/03/2021

FREITAS, F. G., MAGNABOSCO, A. L. **A indústria do vidro no brasil: evolução de consumo, produção e competitividade entre 2000 e 2018**, Ex Ante Consultoria Econômica. 2019

GAINES, L.L.; MINTZ, M. M. **Energy Implication of Glass-Container Recycling**. Illinois. Argonne National Laboratory, 1994.

GLASS GLOBAL CONSULTING (GGC). **Glass Melting Furnaces**. 2019. Disponível em: <<https://www.glassglobal.com/consulting/reports/technology/>>. Acesso em: 20/01/2021.

GREEN MINING. **Site da empresa**. Disponível em: <<https://greenmining.com.br/>>. Acesso

em: 20/03/2021

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Física Industrial, por indicadores especiais.** 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9324-indices-especiais-de-embalagens.html?edicao=29966&t=resultados>> . Acesso em: 20/02/2021.

ICG/EFONGA. **Spring School on Glass Structure.** 2009. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/tariqrafiq7/seeds-31746070>>. Acesso em: 13/04/2021

JAIME, S. B. M. ACV de embalagem de vidro para sistemas retornável e descartável. In.: COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas. CETEA/ITAL, 2007. cap. 3, p. 25-31.

JAIME, S. B. M. A importância da qualidade do caco de vidro para a reciclagem. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens.** CETEA/ITAL, v. 31, n. 2, 2019.

JAIME, S. B. M.; DANTAS, F. B. H. **Embalagens de vidro para alimentos e bebidas: propriedades e requisitos de qualidade.** [S.I.]: CETEA, 2009.

JESUS, F. S. M.; BARBIERI, J. C. Atuação de cooperativas de catadores de materiais recicláveis na logística reversa empresarial por meio de comercialização direta. **Revista de Gestão Social e Ambiental,** v. 7, n. 3, p. 20-36, 2013.

JORGE, N. **Embalagens para alimentos.** São Paulo: Cultura Acadêmica - Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2013.

JOHNSON, S. **Como chegamos até aqui (Nova Edição): Seis Inovações Que Transformaram o Mundo.** 2ª Edição. Brasil: Zahar, 2021.

KOVACEC, M; PLIPOVIC, A; STEFANIC, N. **Impact of glass cullet on the consumption of energy and environment in the production of glass packaging material.** Recent Researches in Chemistry, Biology, Environment and Culture. Suíça. 2011.

LANDIM, A. P. M. et al . **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil**. Polímeros, São Carlos, v. 26, p. 82-92, 2016.

LEITE, P. R. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 2003

LEMOS, E. **Diagnóstico da cadeia de reciclagem de embalagem de vidro em Santa Catarina**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012

LOCATELLI, P. M. **Catadores de materiais recicláveis: um encontro nacional: proposta de um instrumento econômico para viabilizar o pagamento por serviços ambientais urbanos aos catadores de materiais recicláveis**. Brasília: Ipea, 2016. 505 p. (459-505).

LOREDO, J. R.; MARTINEZ, A; BECERRIL, B. Cullet as a substitute for soda. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 84, p. 414-420, 1986.

LUZ, A. B.; LINS, F.F. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

MACCARI, G. G.; FURMANSKI, I. L. G.; ANTUNES, J. E.; CONCEIÇÃO, S. R.; MACHADO, S. Z. **Estudo da viabilidade de implantação de uma indústria de vidros planos pelo Processo Float**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Engenharia Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019.

MACHADO, B. A. **Logística reversa das embalagens de bebidas pós-consumo: os sistemas de depósito e a viabilidade de sua implantação no Brasil**. Tese (Mestrado em Engenharia e Produção) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia. São Paulo, p. 118. 2013

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MANSANO, F. G. **Planejamento de Reformas de Fábricas na Indústria de Vidro para Embalagem**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural**. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2021

MOVIMENTO NACIONAL DOS CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS (MNCR). **Sobre o movimento**. Disponível em: <<http://www.mnccr.org.br/>>. Acesso em: 20/03/2021

NERY, M. **Logística Reversa: Ciclo Infinito do Vidro**. 2016. Disponível em: <<http://marcosnery01.blogspot.com/2016/09/leni-logistica-reversa-ciclo-infinito.html>> Acesso em: 21/02/2021.

PARISI, S. **Food Industry and Packaging Materials: Performance-oriented Guidelines for Users**. Shropshire: Smithers Rapra Technology, 2013

PEREIRA, T. F. O. **Eficiência Energética aplicada à indústria do vidro: Estudo de caso aplicado à empresa Gallo Vidro, S.A.** Tese (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria. Leiria, p. 124. 2015

PEREIRA, B. C. J.; GOES, F. L (Org.). **Catadores de materiais recicláveis: um encontro nacional**. Rio de Janeiro: Ipea, 2016

PFAENDER, H. G. **Schott Guide to Glass**. Londres: Chapman & Hall, 1996

PICVISA. Tecnologías. 2021. Disponível em: <<https://picvisa.com/tecnologias-inteligencia-vision-artificial-industria-reciclaje-separacion/>>. Acesso em: 21/04/2021

POHLEN, T. L.; FARRIS, M. T. Reverse logistics in plastics recycling. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 22, n. 7, p. 35-47, 1992.

RASMUSSEN, S. C. **How Glass Changed the World: The history and Chemistry of Glass from Antiquity to the 13th Century**. Nova York: Springer, 2012.

ROSA, S. E. S.; COSENZA, J. P.; BARROSO, D. V. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, p. [101]-137, set. 2007.

RUTH, M; DELL'ANNO, P. An industrial ecology of the US glass industry. **Resources Policy**. Boston, v. 23, n. 3, 1997.

SABIÃO, J. D.; ARANDA, R. L. G.; GONÇALVES, L. C. Logística reversa no segmento de resíduos de garrafa de vidro: estudo de caso na empresa Cacos de Vidro Mazzeto. **REFAS: Revista FATEC Zona Sul**, São Paulo, v. 3, n. 1, 2016.

SAMPAIO, J.S. & Almeida, S.L.M. 2008. **Calcário e Dolomito**. In: LUZ, A. B.; LINS, F.F. 2008. Rochas & minerais industriais: usos e especificações. 2. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 363-387

SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**. 2ª Edição. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005.

SILVA, J. A. R. **Créditos de Logística Reversa: Atuação e Impactos na Logística Reversa Brasileira e Cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis. 2021.

TESTA, M.; MALANDRINO, O.; SESSA, M. R.; SUPINO, S.; SICA, D. Long-term sustainability from the perspective of cullet recycling in the container glass industry: Evidence from Italy. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 10, 2017.

UOL. **Vidro pode ter acordo de logística reversa em março**. Uol.com.br. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/ecoa/colunas/mara-gama/2021/01/07/vidro-pode-ter-acordo-de-logistica-reversa-em-marco.htm>>. Acesso em: 16/03/2021.

VALT, R. B. **Análise do ciclo de vida de embalagens de pet, de alumínio e de vidro para**

refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais. 2004.Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VERALLIA. **Processo de fabricação.** 2021. Disponível em: <<https://pt.verallia.com/o-vidro/processo-e-fluxograma-em-imagens>>. Acesso em: 21/01/2021.

VIDROPORTO. **Usina de Beneficiamento de Caco.** 2021. Disponível em: <<https://vidroporto.com.br/usina-de-beneficiamento-de-caco.php>>. Acesso em: 27/03/2021.

XAVIER, R. L.; ORTIZ, S. A. **Controle de qualidade em embalagens de vidro.** Campinas: CETEA/ITAL, 1986.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 471, p. 490-495. 2017

ZIPPE. **Brochure Glass Recycling.** 2021. Disponível em: <<https://www.zippe.de/en/glass-recycling/>>. Acesso em: 27/03/2021.