



RAMON BERNARDO DOS SANTOS PINTO

ANÁLISE DO IMPACTO DO USO DE CACO NA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE VIDRO

PROJETO DE FINAL DE CURSO

ORIENTADOR: PROF. ARMANDO CUNHA

Rio de Janeiro, 2024

ANÁLISE DO IMPACTO DO USO DE CACO NA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE VIDRO

RAMON BERNARDO DOS SANTOS PINTO

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

APROVADA POR:

Dr.

Dr.

Dr.

SETEMBRO, 2024

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL



AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional que me foi concedido durante todos os anos da minha vida, e, em especial, durante os momentos de dúvida e estresse que ocorreram durante os meus anos de graduação.

Aos amigos de longa data, por me proporcionarem o alívio necessário ao estresse da vida acadêmica, garantindo risadas e descontração que certamente ajudaram a tornar toda a experiência a mais agradável possível.

Aos amigos que ganhei durante a graduação, por fornecerem apoio, suporte e o ombro amigo nos momentos de desespero, nas intermináveis noites sem dormir, mas também nos momentos de alegria e comemoração, festejando a cada passo dado em nossas vidas.

Aos meus companheiros de trabalho, me apoiarem durante toda a curva de aprendizado que tornou possível a escrita deste trabalho. Em especial, ao time do Processo: Isabelle, Luciano, Felipe, Cayo e Nicolas.

Ao professor Armando, por fornecer orientação durante toda a execução deste trabalho e pelo suporte durante um momento de temor que o antecedeu.

Agradeço, por fim, à banca examinadora pela disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho.

E a todas as outras pessoas que aqui não foram citadas, mas que ajudaram de alguma forma na execução deste trabalho e nas outras etapas que me trouxeram até aqui.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

ANÁLISE DO IMPACTO DO USO DE CACO NA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE VIDRO

Ramon Bernardo dos Santos Pinto

Setembro, 2024

Orientador: Armando Lucas Cherem da Cunha

Curso: Engenharia Química

O objetivo do trabalho é realizar uma análise acerca do impacto do uso do caco de vidro, seja ele de qualquer uma de suas possíveis fontes, analisando desde o aspecto químico do produto, passando por demanda energética e chegando à qualidade final do vasilhame. Primeiramente, fez-se um estudo teórico sobre as propriedades do vidro como material e o método de produção que fora utilizado na fábrica objeto de estudo, bem como as particularidades do processo vistas no local em questão. Num segundo momento, foi realizado o estudo sobre o panorama atual do sistema de captação de caco e de seu beneficiamento, a fim de entender quais os pormenores desse fluxo, em paralelo ao processo de produção de garrafas. Por fim, foi feita uma análise dos impactos levantados, levando em conta a qualidade do material disponível em mercado e as possíveis formas de utilização deste dentro do processo produtivo. Diante dessa situação, foi constatado que a qualidade do caco de vidro utilizado atualmente na indústria de vidro é um fator crucial que restringe a quantidade empregada. Isso resulta em benefícios limitados ao usar material reciclado nos fornos de vidro, devido aos possíveis impactos negativos associados. Portanto, é essencial revisar o cenário atual para otimizar os benefícios derivados de um tratamento adequado do vidro reciclado.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivo.....	12
3. Referências Bibliográficas.....	13
3.1 Tipos de vidro.....	17
3.2 Matérias primas.....	19
3.3 Processo produtivo de garrafas de vidro.....	25
3.3.1 Recozimento de tratamentos superficiais.....	34
3.3.2 Inspeção de garrafas.....	36
3.3.3 Controle de qualidade.....	38
3.3.4 Embalagem.....	39
3.4 Processo de beneficiamento de caco de vidro.....	39
3.5 Consumo energético no processo vidreiro.....	43
4. Metodologia.....	47
5. Análise técnica sobre o uso de caco de vidro.....	47
5.1 Análise econômica da utilização de caco.....	50
5.2 Análise da utilização de caco no processo de fusão.....	54
5.3 Análise da utilização de caco para a qualidade das embalagens.....	58
6. Conclusão.....	64
7. Referências.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Processo de solidificação de sólidos cristalinos e amorfos.	14
Figura 2	Evolução da produção industrial de embalagens.	15
Figura 3	Divisão das embalagens de alimentos por peso em 2016.	16
Figura 4	Divisão das embalagens de bebidas por peso em 2016.	16
Figura 5	Materiais de embalagem de alimentos e bebidas por valor em 2016.	17
Figura 6	Comparativo da organização estrutural da sílica encontrada na natureza versus sua estrutura vitrificada.	20
Figura 7	Estrutura química do vidro sodo cálcico.	21
Figura 8	Processo de remoção de bolhas com o uso de afinantes.	22
Figura 9	Efeito de cada colorantes e a cor que se obtém a partir deles.	23
Figura 10	Esquematização do Processo de Produção de Garrafas de Vidro.	25
Figura 11	Esquema de uma usina de composição.	27
Figura 12	Vista lateral de um regenerador.	28
Figura 13	Visão interna de fornos side port e end port.	28
Figura 14	Representação de forno contínuo de vidro.	29
Figura 15	Esquema de corte longitudinal de um forno de fusão side port.	30
Figura 16	Formação e corte das gotas.	31
Figura 17	Representação do <i>feeder</i> .	32
Figura 18	Máquina IS utilizada na produção de garrafas de vidro.	32
Figura 19	Passos do processo NNPB.	33
Figura 20	Passos do processo B&B.	33
Figura 21	Lehr.	35
Figura 22	Equipamento do tratamento à quente.	36

Figura 23	Tipos de defeitos em garrafas de vidro: (a) Dobra, (b) Fissura, (c) Poleiro.	36
Figura 24	Inspetores eletrônicos da área fria.	37
Figura 25	Paletizadora de Garrafas.	39
Figura 26	Vista de uma linha de beneficiamento de caco.	40
Figura 27	Catação manual em processo semiautomatizado de beneficiamento de caco.	41
Figura 28	Usina automatizada de beneficiamento de caco na Vidroporto	42
Figura 29	Consumos e custos energéticos.	44
Figura 30	Consumo de gás natural em planta vidreira.	45
Figura 31	Consumo de energia elétrica em planta vidreira.	46
Figura 32	Balço de energia simplificado para fornos vidreiros.	55
Figura 33	Sistema de <i>scraper</i> de rejeito de vidro de área quente.	60
Figura 34	Impureza cerâmica no corpo da garrafa.	61
Figura 35	Inclusão vítrea (a) e defeito de corda (b) visualizadas por microscópio ótico.	62
Figura 36	Vista de um forno com espuma.	63
Figura 37	Possibilidades de mistura de caco.	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Curva de Recozimento para garrafas Long Neck.	34
Gráfico 2	Oferta de gás natural para a indústria no país.	51
Gráfico 3	Relação entre energia de fusão (em MJ/kg de vidro) e % de caco em fornos.	58

INDÍCE DE TABELAS

Tabela 1	Composição típica de garrafas de vidro.	19
Tabela 2	Preços de compra de insumos vidreiros.	52
Tabela 3	Economia de energia (em KJ/Kg de vidro) devido ao uso de caco.	57

1. Introdução

O Brasil se destaca como um dos principais consumidores de cerveja no mundo, onde a bebida é intrínseca à cultura social, presente em uma diversidade de eventos, desde festas até encontros informais. Carla Crippa, vice-presidente de assuntos corporativos da Ambev e do Sindicerv (Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja), destaca que o Brasil figura como o terceiro maior produtor global da bebida, movimentando uma massa salarial de R\$ 27 bilhões e gerando mais de dois milhões de empregos diretos. Segundo o Anuário da Cerveja do Ministério da Agricultura e Pecuária, o setor cervejeiro cresceu 11,6% em 2022, com a inauguração de cento e oitenta novos estabelecimentos, totalizando 1.729 cervejarias registradas no país (MAPA, 2022).

Dada a expressividade do consumo de cerveja no Brasil, é de suma importância que o envase da bebida seja conduzido de maneira a preservar suas características e qualidades. O processo de embalagem pode variar de acordo com o tipo de cerveja, o mercado-alvo e as preferências dos consumidores. As garrafas de vidro, em diferentes tamanhos, constituem a forma de envase mais comum nos mercados brasileiros, representando 54,6% do total em 2016, conforme dados da CERVBRASIL (Associação Brasileira de Indústria Cervejeira). Em seguida, as latas de alumínio têm ganhado popularidade nos últimos anos, com um aumento de mais de 80% no consumo entre 2011 e 2021, segundo a Abralatas (2022) (Associação Brasileira de Produtores de Lata de Alumínio para Bebidas).

A predominância das garrafas de vidro pode ser atribuída às vantagens que oferecem tanto em termos de preservação da cerveja quanto de apresentação ao consumidor. O vidro é atóxico, inerte e proporciona uma barreira eficaz contra gases e vapores de água, evitando qualquer interação entre a bebida e a embalagem, o que preserva o produto e impede a transmissão de odor e sabor à cerveja. Além disso, as garrafas de vidro conferem valor mercadológico ao produto, proporcionando confiança ao consumidor através da visibilidade do produto. Do ponto de vista da sustentabilidade, as garrafas de vidro são 100% recicláveis e podem ser reutilizadas nas cervejarias ou incorporadas como matéria-prima em novas garrafas pelas vidreiras.

O processo de produção de embalagens de vidro tem diversas etapas, que vão desde a recepção e fusão das matérias primas escolhidas, passam pelo preparo do vidro fundido, sua moldagem e conformação em garrafas, a garantia de que os vasilhames estão dentro dos padrões de qualidade e sua embalagem e estocagem. Na maioria dos casos, a qualidade do vidro e das garrafas formadas tem enorme influência da composição química que o material possui, podendo impactar sobre praticamente todos os defeitos conhecidos para o processo de produção.

Dentre essa gama de defeitos possíveis, se destacam as perdas de produção que ocorrem no momento da formação das garrafas, devido a presença de compostos distintos do vidro fundido idealizado. Esses são considerados defeitos críticos, pois podem acarretar danos para o cliente ou para o nome da empresa, em cenários um pouco mais extremos.

2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento sobre os impactos do uso do caco de vidro, proveniente das suas múltiplas fontes possíveis, nos processos de produção de embalagens de vidro.

3. Revisão Bibliográfica

A fabricação e o uso do vidro têm uma longa história e estão profundamente entrelaçados com o desenvolvimento social ao longo dos tempos. Embora a origem exata da produção de vidro artificial não seja completamente conhecida, a teoria mais amplamente aceita sugere que ela surgiu como um subproduto da metalurgia ou como uma evolução dos materiais cerâmicos (RASMUSSEN, 2012).

No entanto, evidências indicam que os egípcios já empregavam vidro para criar adornos e contas coloridas por volta de 7000 a.C., assim como os habitantes das cavernas utilizavam vidro para fabricar algumas de suas ferramentas e armas (SHELBY, 2005). Esses primeiros artigos de vidro eram feitos a partir da fragmentação de rochas como obsidiana e quartzo, o que tornava o vidro um material raro e valorizado, frequentemente considerado um item de luxo (MAIA, 2003).

Foi somente com a invenção da técnica de sopro, por volta do primeiro século a.C., que o vidro começou a ser amplamente utilizado na sociedade. De acordo com Maia (2003), o que antes era considerado um item de luxo passou a ser um material acessível para uso doméstico, devido ao avanço tecnológico que permitiu a produção de utensílios de vidro em maior quantidade e a preços mais baixos. A qualidade dos produtos de vidro, como garrafas, copos e vasos, também melhorou significativamente com a técnica de sopro, consolidando o vidro como um importante material de manufatura (SHELBY, 2005).

Hoje em dia, a aplicação do vidro é vasta e diversificada. Steven Johnson destaca que “um mundo sem vidro minaria as bases do progresso moderno” (JOHNSON, 2021). O vidro é amplamente utilizado em diversas áreas, desde a indústria alimentícia e construção civil até o setor farmacêutico e as indústrias de vidro especializadas e técnicas. Isso impulsiona a contínua inovação e pesquisa no campo do vidro e suas técnicas de fabricação.

Ademais, é importante notar que, embora o vidro seja um material comum no cotidiano, ele é, de fato, complexo, o que justifica a profundidade dos estudos sobre ele. Essa complexidade advém de suas propriedades físico-químicas, nas quais a sua aparência sólida está associada a características mecânicas como rigidez, elasticidade e a possibilidade de fratura, contrastando com o comportamento viscoso do vidro, que é semelhante ao de um líquido. (ZANOTTO, 2017). Esta dualidade o

classifica como um líquido super-resfriado, que atinge o estado vítreo após a Temperatura de Transformação Vítrea (T_g). A T_g é determinada pela mudança na inclinação da curva de resfriamento dos materiais líquidos, sem uma definição termodinâmica clara, diferenciando os materiais vítreos dos cristais em seu processo de formação, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Processo de solidificação de sólidos cristalinos e amorfos.



Fonte: Callister (2008)

Diferentemente dos cristais, os materiais vítreos são caracterizados pela ausência de uma estrutura cristalina organizada, configurando-se como sólidos amorfos. Por essa razão, o vidro não possui um ponto de fusão definido e, ao ser aquecido, amolece de forma gradual até que sua viscosidade seja suficientemente reduzida. Essa propriedade permite a produção de uma ampla variedade de vidros e utensílios (MAIA, 2003).

Entre outras características do vidro, é importante ressaltar sua instabilidade em altas temperaturas, o que pode levar ao fenômeno da desvitrificação. Esse processo ocorre quando o vidro é exposto a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento por longos períodos, resultando em sua cristalização. Além disso, o vidro é um mau condutor de calor e eletricidade (MAIA, 2003).

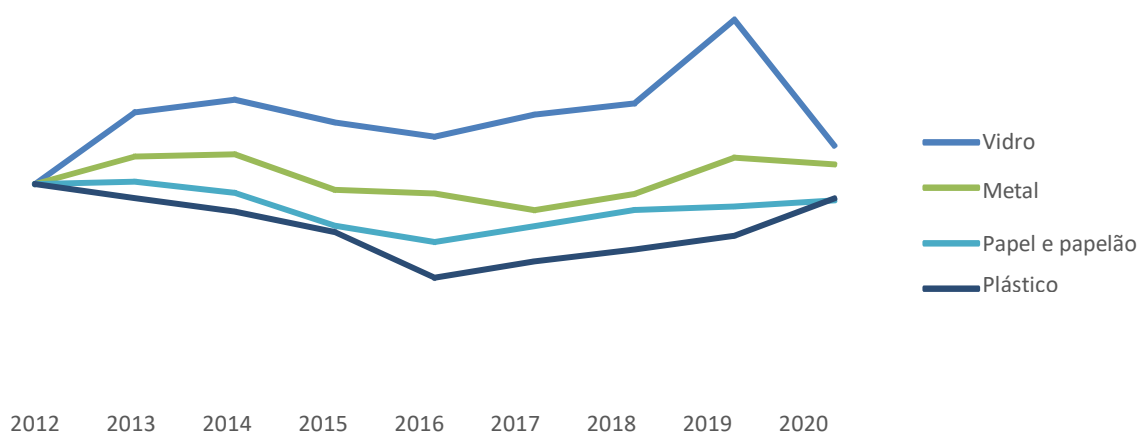
A dificuldade em definir o que constitui o vidro decorre diretamente de sua complexidade físico-química. A definição fornecida por Samuel Berg Maia (2003), que

descreve o vidro como um "produto inorgânico resultante de uma fusão que se resfriou até um estado rígido sem cristalização", abrange bem as características de um material vítreo e está de acordo com o foco deste trabalho.

Apesar de sua complexidade físico-química, o vidro tem uma utilização consolidada na manufatura devido a suas diversas qualidades. Destaca-se sua durabilidade, proporcionada pela robusta rede de ligações silício-oxigênio, o que permite que objetos de vidro se mantenham inalterados por séculos. Sua transparência é extremamente eficaz para transmissões ópticas, e sua estabilidade mecânica e térmica, aliada à predominância de elasticidade em temperatura ambiente, faz do vidro um material ideal para superfícies expostas a condições extremas (MORSE, 2016).

A preferência por artigos de vidro na fabricação de embalagens é evidenciada por uma análise comparativa com outros materiais. Dados do IBGE sobre a Produção Física Industrial de embalagens mostram um aumento gradual na produção e uso de vidro como matéria-prima para invólucros ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 2 (IBGE, 2021).

Figura 2: Evolução da produção industrial de embalagens.



Fonte: IBGE (2021)

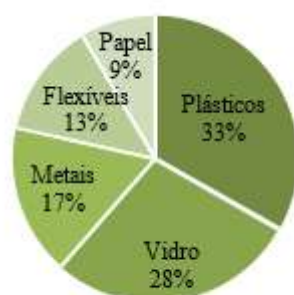
Além disso, o uso de vidro para embalagens oferece a vantagem de ser um material inerte e impermeável, o que significa que não reage com os alimentos e bebidas armazenados, preservando a integridade dos produtos e protegendo-os de interações com o ambiente, o que contribui para aumentar sua vida útil.

Adicionalmente, artigos de vidro podem ser esterilizados, um processo essencial para certos produtos alimentícios, como cervejas (PARISI, 2013).

Dessa forma, as embalagens de vidro se destacam na indústria alimentícia, especialmente no setor de bebidas. Para ilustrar essa tendência, foram analisados dados da Datamark referentes ao ano de 2016, já que informações mais recentes e detalhadas por setor não estavam disponíveis em fontes gratuitas e confiáveis até a conclusão deste estudo.

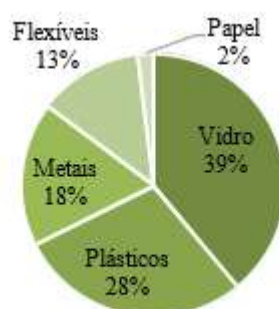
Os dados de 2016 da Datamark indicam que 28% das embalagens usadas para bebidas e alimentos são de vidro. Quando se considera apenas o segmento de bebidas, a participação dos produtos de vidro aumenta para 39% em termos de peso.

Figura 3: Divisão das embalagens de alimentos por peso em 2016.



Fonte: Datamark (2016)

Figura 4: Divisão das embalagens de bebidas por peso em 2016.



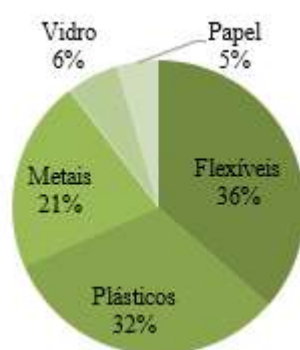
Fonte: Datamark (2016)

Vale ressaltar que, no segmento de bebidas alcoólicas, o vidro é o material predominante para embalagens, alcançando 68% do total em peso em 2016, conforme dados da Datamark. Essa preferência pode ser atribuída à capacidade do vidro de preservar as propriedades organolépticas das bebidas, uma vez que sua

impermeabilidade ajuda a evitar a oxidação e a decarbonatação, fatores críticos para bebidas fermentadas durante o armazenamento.

Além disso, os dados de 2016 da Datamark indicam que, em termos de valor dos materiais de embalagem para alimentos, o vidro representa o segundo menor custo relativo, correspondendo a aproximadamente 6% do valor total. Isso demonstra que a utilização de vidro na indústria alimentícia não apenas contribui para a redução de custos, mas também para o aumento do valor agregado dos produtos.

Figura 5: Divisão das embalagens por valor em 2016.



Fonte: Datamark (2016)

Outro benefício significativo das embalagens de vidro na indústria é sua capacidade de reciclagem e reutilização. As garrafas de vidro, especialmente as retornáveis utilizadas na indústria de bebidas, podem ser reutilizadas inúmeras vezes após o primeiro uso. Além disso, os fragmentos de vidro resultantes de quebra durante o processo de envase ou após o consumo podem ser reciclados na totalidade, sendo reintegrados como matéria-prima nos fornos de produção de vidro.

Dessa forma, a indústria de vidro promove a sustentabilidade ambiental ao reduzir a quantidade de resíduos em aterros e lixões, além de ajudar a economizar energia e matérias-primas ao reaproveitar o vidro reciclado. (ABIVIDRO, 2019)

3.1. Tipos de vidro

A definição de vidro é objeto de diversas controvérsias, porém, é amplamente aceito que o vidro é um sólido não cristalino que exhibe o fenômeno de transição vítrea (Zanotto, 2017). Ele possui uma vasta gama de aplicações, tendo sido inicialmente criado para objetos de corte e armamento, mas ao longo do tempo encontrou uso em ornamentos, utensílios domésticos, lentes e até mesmo fibras óticas. Devido à sua

capacidade de variação de composição, uso e métodos de produção, o vidro pode ser categorizado em diversos tipos, incluindo sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros sodo-cálcicos, vidros de chumbo, vidros de borossilicato e vidros alumino-borossilicato.

A sílica vítrea é obtida ao aquecer areia de sílica ou cristais de quartzo a uma temperatura acima do ponto de fusão da sílica, que é de 1725°C. Esse tipo de vidro é comumente utilizado em aplicações que requerem alta resistência, como janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos e na produção de fibras óticas. Para reduzir a viscosidade do vidro fundido à base de sílica, óxidos alcalinos são adicionados para atuar como modificadores de rede, formando o vidro silicato alcalino. Essa adição diminui a resistência química do vidro, tornando-o adequado para adesivos, produtos de limpeza e películas protetoras.

Os vidros borossilicatos, que substituem os óxidos alcalinos por óxido de boro, são conhecidos por sua resistência à corrosão química e baixo coeficiente de expansão térmica. São usados na fabricação de utensílios domésticos, instrumentos de laboratório, lâmpadas e vidros resistentes ao fogo. Já os vidros de chumbo, reconhecidos por sua nobreza, são utilizados em copos e taças finas, caracterizando-se por suas baixas temperaturas de fusão e trabalho, alto índice de refração e densidade. Os vidros de silicato de alumínio, com alta concentração de alumínio, apresentam durabilidade química devido à presença de óxido de boro, sendo empregados em tubos de combustão, fibras de reforço e vidros de alta resistência química.

Segundo Akerman (2000), os vidros sodo-cálcicos, que substituem o material alcalino do vidro silicato alcalino por um material estabilizante, são os mais antigos e amplamente utilizados. O cálcio é o material estabilizante mais comum, muitas vezes combinado com óxido de magnésio para reduzir a solubilidade do vidro e o ponto de fusão da sílica. Outros aditivos, como alumina, podem ser usados para ajustar as propriedades do vidro conforme necessário. Esse tipo de vidro é amplamente utilizado na fabricação de garrafas, frascos, potes, janelas e lâmpadas, sendo o foco deste estudo.

3.2. Matérias primas

Para a produção de garrafas de cerveja, é utilizado vidro sodo-cálcico, que é composto por uma variedade de matérias-primas desempenhando funções específicas na composição da garrafa. Esses materiais podem ser categorizados de acordo com suas funções na formação do vidro: vitrificantes, fundentes, estabilizantes, afinadores, oxidantes, redutores e colorantes (Costa, 2023).

Na produção de garrafas, utiliza-se o vidro do tipo alcalino, que tem o silicato como seu principal componente. O dióxido de silício (SiO_2) é o óxido fundamental para a formação do vidro. Além deste, o óxido de sódio (Na_2O) atua como agente fundente, facilitando a fusão do vidro. O óxido de alumínio, que também participa da formação do vidro na forma de silicato duplo de alumínio, é adicionado à mistura. O óxido de cálcio é utilizado como estabilizador e modificador, desempenhando um papel crucial na produção de vidro.

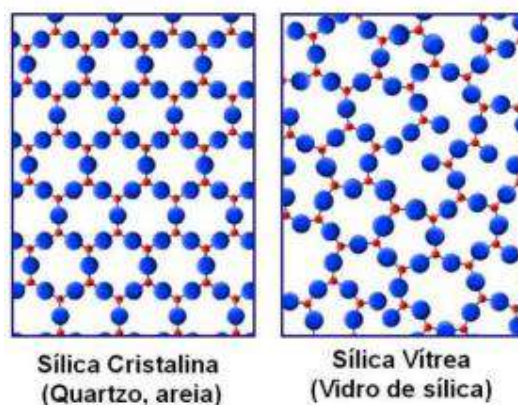
Tabela 1: Composição típica de garrafas de vidro.

Material	Porcentagem
SiO_2	70%
Na_2O	15%
CaO	11%
Al_2O_3	2%
Outros componentes	2%

Fonte: MAIA, 2003

A sílica, ou óxido de silício (SiO_2), é o principal vitrificante utilizado na produção de garrafas de vidro e é obtida principalmente a partir de areia. Na estrutura da sílica, um átomo de silício é rodeado por quatro átomos de oxigênio, formando um tetraedro. Durante o processo de fusão, a estrutura da sílica se desorganiza e, ao resfriar rapidamente, os átomos permanecem desorganizados, formando uma estrutura amorfa, como acontece na produção das garrafas de vidro (Akerman, 2013).

Figura 6: Comparativo da organização estrutural da sílica encontrada na natureza versus sua estrutura vitrificada.



Fonte: Akerman, 2013

Conforme observado por Costa (2023), a sílica, por si só, é capaz de gerar vidro, mas possui um ponto de fusão extremamente alto devido à forte e rígida ligação entre o silício e o oxigênio, o que requer um grande consumo de energia. Para reduzir esse ponto de fusão, é comum adicionar um material fundente, como o sódio proveniente da barrilha (Na_2CO_3), que tem alta afinidade com o oxigênio. Assim, o sódio reage com o oxigênio do silício, formando Na_2O e diminuindo o ponto de fusão, uma vez que as ligações Si-O são quebradas. A reação é representada pela equação:



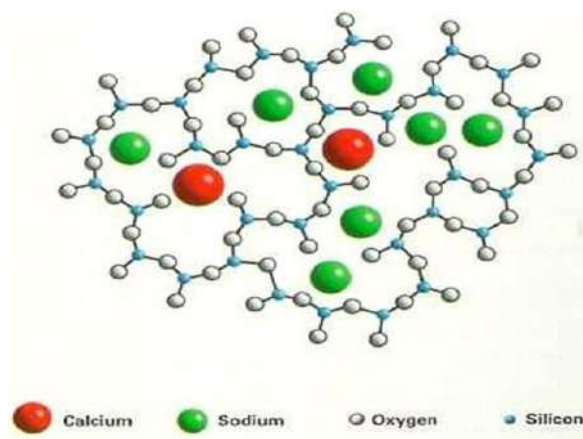
Essa adição de sódio também resulta em uma menor viscosidade, uma vez que enfraquece a rede do vidro. No entanto, isso pode aumentar a solubilidade do vidro formado, o que pode ser um problema.

Para resolver a questão da solubilidade, entra em cena o estabilizante. Em conjunto com a soda, é comum o uso de cálcio, derivado do calcário. Substituindo parte da soda pelo cálcio, que não atua como um fundente tão forte por ser bivalente, é possível compensar parcialmente a redução na durabilidade química, já que o cálcio é pouco solúvel em água e resulta em um vidro com uma temperatura de fusão razoável. A reação é representada pela equação:



Portanto, a cal influencia na viscosidade, assim como a soda, e geralmente busca-se maximizar seu teor enquanto se reduz a soda. No entanto, o uso excessivo de cal aumenta a propensão do vidro à desvitrificação, portanto há um limite para sua utilização.

Figura 7: Estrutura química do vidro sodo cálcico.



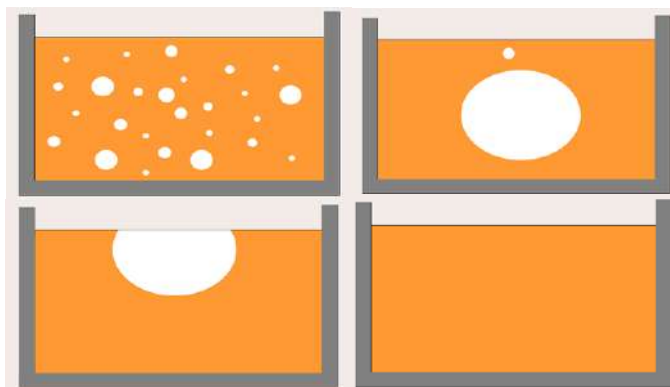
Fonte: Costa, 2023

Segundo Shelby (2005), durante a produção do vidro, podem se formar bolhas devido à captura física de gases da atmosfera durante a fusão inicial ou à decomposição de substâncias geradas, como o CO_2 . Para mitigar esse problema, é comum utilizar agentes conhecidos como afinantes. Esses agentes liberam uma quantidade considerável de gases, formando bolhas maiores que ascendem rapidamente à superfície do vidro em fusão, levando consigo as bolhas menores que se deseja eliminar, conforme ilustrado na Figura 12. Dentre esses agentes, destacam-se óxidos de arsênio e antimônio, nitrato de potássio e de sódio, cloreto de sódio (utilizado em vidros borossilicatos), alguns fluoretos e diversos sulfatos.

No processo de fabricação do vidro sodo-cálcico, emprega-se o sulfato de sódio (Na_2SO_4), que funde a uma temperatura em que os demais componentes já estão bem misturados à massa fundida. Por ser insolúvel no vidro derretido, o sulfato se acumula na superfície das bolhas. Com o aumento da temperatura, o sulfato se decompõe, liberando uma quantidade considerável de SO_2 gasoso, o que promove o crescimento das bolhas existentes. Dessa forma, as bolhas podem ascender até a superfície do vidro em fusão, diminuindo a presença de inclusões gasosas. Esse refinamento ocorre em uma faixa de temperatura entre 1400°C e 1600°C , período

durante o qual as bolhas se expandem e a viscosidade do líquido diminui, facilitando a remoção das bolhas (GONÇALVES, 2023, citado por MÜLLER-SIMON, 2011).

Figura 8: Processo de remoção de bolhas com o uso de afinantes.

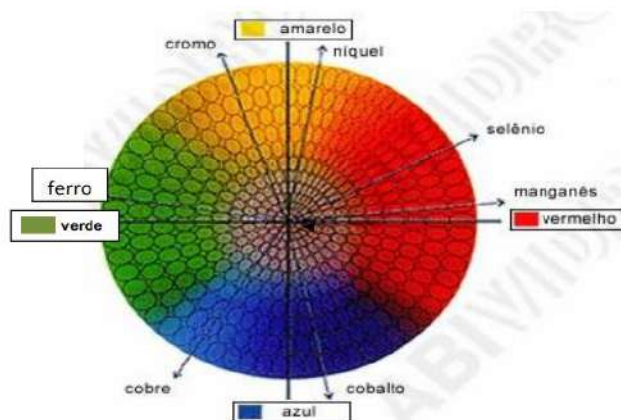


Fonte: Costa, 2023

Dada a presença de diversos óxidos na composição do vidro, seus estados de oxidação desempenham um papel crucial, influenciando a fusão, afinidade, coloração e descoloração do material. Nesse sentido, a adição de agentes oxidantes ou redutores é essencial. Os oxidantes fornecem átomos de oxigênio, enquanto os redutores têm maior afinidade com o oxigênio do que outros componentes na mistura, induzindo uma falta de oxigênio no vidro fundido. Materiais com essa finalidade, como sulfato de sódio, nitrato de sódio e carvão, são comumente utilizados (Felisberto, 2006).

Além disso, os colorantes desempenham um papel crucial na conferência de tonalidade aos vidros. Geralmente, os vidros coloridos são obtidos pela incorporação de compostos de metais de transição 3d ou terras raras 4f. No entanto, a coloração final é determinada pelo estado de oxidação do metal, sua concentração, a composição do vidro e os tratamentos térmicos aos quais é submetido (Alves, 2001).

Figura 9: Efeito de cada colorantes e a cor que se obtém a partir deles.



Fonte: Akerman, 2013

A coloração marrom em vidros é atribuída à presença de ferro, enxofre e, comumente, carbono como agente redutor, garantindo a presença de íons sulfeto. Um cromóforo específico, chamado âmbar, composto por um íon Fe^{3+} cercado por quatro ânions, pelo menos um S^{2-} e três O^{2-} , é sugerido como responsável por essa coloração (Shelby, 2005). A formação desse cromóforo está diretamente ligada à concentração de íons ferrosos (Fe^{2+}) e sulfitos (SO_3^{2-}), que se associam aos álcalis para manter a eletro neutralidade. Quanto maior a quantidade de álcali, mais intensa a tonalidade âmbar, uma vez que favorece a estabilidade do complexo formado (Sasso, 2018). Assim, conclui-se que o vidro âmbar pode ser produzido adicionando matérias-primas como carvão e hematita (Fe_2O_3).

A coloração verde no vidro pode ser alcançada pela adição de ferro, geralmente proveniente da hematita, ou de cromo, através da cromita (Cr_2O_3). Esses elementos podem apresentar diferentes estados de valência, resultando em diferentes impactos na coloração do vidro, dependendo de sua presença na composição. O ferro predominando no estado Fe^{2+} e o cromo no estado Cr^{3+} contribuem para a coloração esverdeada do vidro (Silva, 2017).

Para a fabricação do vidro Flint, considerado incolor, são utilizados descolorantes que neutralizam a coloração verde resultante do teor residual de ferro nas matérias-primas. Os descolorantes mais comuns são o selênio e o óxido de cobalto (Costa, 2023). A produção desse tipo de vidro ocorre em condições oxidantes, sendo crucial controlar o estado de oxidação da mistura e a presença de impurezas

para garantir a transparência do vidro. Os óxidos de metais de transição nas matérias-primas podem variar em valência de acordo com o estado de oxidação da mistura (AKERMAN, 2007).

Embora não seja considerado matéria-prima no sentido estrito, o caco de vidro desempenha um papel importante na fabricação de novos vidros. Este material, que resulta do produto acabado, é adicionado de forma homogênea à mistura de matérias-primas antes de ser colocado no forno. A principal função do caco de vidro é reduzir a quantidade de componentes brutos necessários na produção. Além disso, seu derretimento requer menos energia do que a fusão de uma mistura pura, resultando em maior eficiência energética e redução das emissões de carbono (GONÇALVES, 2023).

O caco de vidro pode ser classificado em três categorias: caco interno: gerado na própria vidraria, com a mesma composição química dos materiais utilizados na produção; caco externo: produzido em outras fontes e que deve ser analisado quanto à sua composição para ser integrado corretamente no processo; caco pós-consumo: originado da reciclagem e de sistemas de logística reversa, com composição muitas vezes desconhecida (JAIME, 2007).

A qualidade do caco de vidro é crucial antes de sua inclusão no processo de fabricação. Cacos pós-consumo, por exemplo, podem conter impurezas que afetam a qualidade do vidro produzido. Algumas dessas impurezas, como fragmentos de porcelana, podem não atingir as temperaturas necessárias de fusão nos fornos, levando a problemas de qualidade, especialmente na produção de garrafas.

Todas as matérias-primas utilizadas na produção de vidro devem ser submetidas a testes de composição química e granulometria antes de serem introduzidas no processo. A análise química é crucial, pois variações naturais nas matérias-primas podem exigir ajustes na composição para garantir a qualidade do vidro produzido. Os agentes colorantes são misturados uniformemente com a areia para assegurar uma distribuição homogênea da cor na massa do vidro.

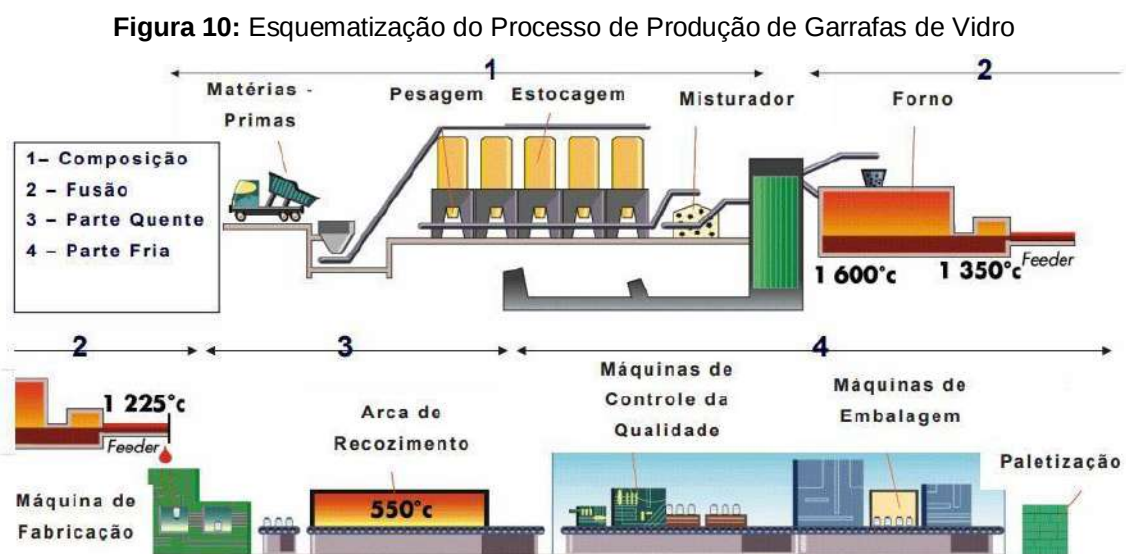
Além disso, é fundamental armazenar os materiais de forma adequada para protegê-los de intempéries e contaminação. Os lotes de matérias-primas devem ser

estocados conforme a previsão de uso no forno, evitando grandes quantidades em estoque que poderiam levar à degradação dos materiais. Para prevenir a segregação, as misturas são preparadas com uma umidade controlada, geralmente entre 2% e 4% (MAIA, 2003; PFAENDER, 1996).

3.3. Processo produtivo de garrafas de vidro

O processo de fabricação de vidro compreende quatro fases principais: preparação da carga (batching), fusão (melting), refinamento (fining) e formação (forming). Todas essas etapas exigem fornos de alta capacidade e linhas de produção extensas para operações iniciais. Em uma linha de produção típica, a produção de garrafas pode chegar a cerca de 10 por segundo. Mudanças contínuas são implementadas para atender à crescente demanda por capacidade, flexibilidade, disponibilidade e qualidade do vidro. As operações de preparação da carga, fusão e refinamento são comuns a todos os processos de fabricação de vidro, com algumas variações dependendo do tipo de forno utilizado, enquanto as etapas de formação e pós-processamento são específicas para o produto desejado (Bourhis, 2014).

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.

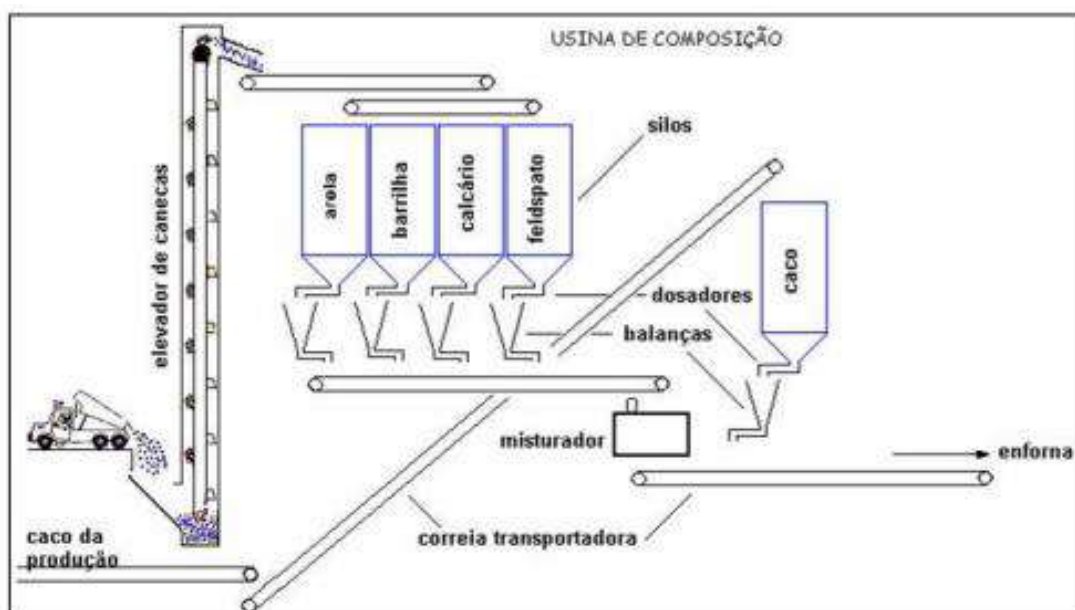


Fonte: Mansano (2007)

A preparação da carga inclui a seleção de matérias-primas com base em suas propriedades químicas, pureza, uniformidade e tamanho de partícula; o cálculo da composição para determinar a quantidade necessária de cada material para alcançar uma composição de vidro específica; a pesagem; e a mistura desses materiais para obter uma carga inicial homogênea (Baino et al, 2021). Nesta fase, é importante considerar a umidade das matérias-primas, controlada por meio de análise por infravermelho em linhas de produção modernas, bem como verificar a presença de impurezas. A reciclagem de cacos de vidro é crucial, pois oferece benefícios energéticos (Bourhis, 2014) e é geralmente mais econômica do que as matérias-primas, o que ajuda a reduzir o custo final da garrafa. Normalmente, as plantas de vidro utilizam dois tipos diferentes de cacos como matéria-prima. Os cacos externos, provenientes de fontes externas, são limpos por unidades de beneficiamento, que podem ser parte da planta ou operar externamente, para produzir cacos beneficiados ou limpos. Esses cacos podem conter contaminantes orgânicos, que devem ser considerados ao calcular a composição desejada, pois afetam a cor da garrafa durante o processo de fusão. O outro tipo de caco usado é o caco interno ou caco de rejeito. Este material é composto por vidro que não é transformado em garrafas utilizáveis e é descartado durante uma das etapas de produção. Geralmente, as fábricas de vidro têm sistemas para reciclar esse material, que é devolvido ao processo de preparação da carga. Esses cacos não afetam a composição química do produto, pois têm a mesma composição que as garrafas utilizáveis.

Quando as matérias-primas chegam à fábrica, são direcionadas para a usina de composição. Os componentes são transportados para seus respectivos silos por elevadores de canecas e esteiras, tubulações ou manualmente, dependendo da escala de uso e fornecimento. Cada silo tem uma balança que dosa o material de acordo com a composição calculada. Os materiais pesados são então misturados para obter uma mistura homogênea, à qual os cacos são adicionados antes de serem levados ao forno (Akerman, 2013). A sincronização entre a mistura das matérias-primas e a adição dos cacos é crucial para garantir que estes se depositem sobre a mistura pronta, formando uma camada uniforme. Uma falha nesse processo aumenta o risco de defeitos estéticos na garrafa, uma vez que a homogeneização dentro do forno pode não ser suficiente para corrigir essa inconsistência.

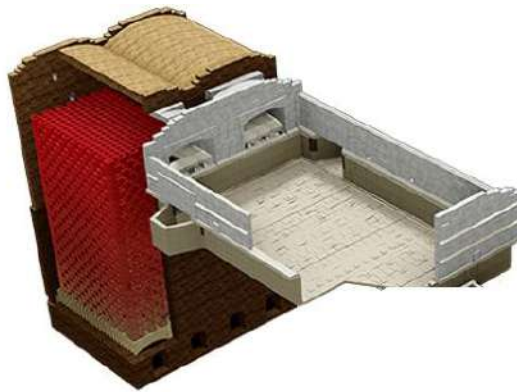
Figura 11: Esquema de uma usina de composição



Fonte: Akerman, 2013

Após a etapa de preparação da carga, segue-se a fusão, um processo descrito por Bourhis (2014) como um fenômeno físico-químico complexo que requer considerável quantidade de energia para a produção de vidro sodo-cálcico. Na indústria vidreira, é comum o uso de fornos regenerativos, conforme mencionado por Akerman (2013), que aproveitam o calor dos gases residuais da queima. Estes gases são tratados antes de serem descartados e utilizados para aquecer o ar, que em conjunto com o gás, participa do processo de combustão. No forno regenerativo, uma estrutura refratária revestida com camadas de tijolos refratários, destina-se a fundir as matérias-primas do vidro. Projetado para suportar as altas temperaturas alcançadas durante a fusão, esses fornos operam continuamente ao longo de vários anos, exigindo que os materiais refratários permaneçam intactos durante todo esse período, conforme observado por Ekpo (2022).

Figura 12: Vista lateral de um regenerador



Fonte: TECOGLAS (2024)

Após sair dos misturadores, a mistura é conduzida para o interior do forno, que pode ter duas configurações diferentes. Os fornos do tipo "side port" ou de fogo cruzado possuem um arranjo em que a alimentação é realizada na parede traseira, e a queima superficial ocorre ao longo do banho, através de uma série de maçaricos posicionados nas laterais. Geralmente, esses fornos são empregados em volumes de produção superiores a 400 toneladas diárias, devido à necessidade de maior eficiência na fusão, devido ao alto volume pretendido. Já os fornos do tipo "end port" têm os queimadores localizados na parte traseira, e a alimentação é distribuída para as duas laterais. A capacidade desses fornos normalmente não ultrapassa 400 toneladas por dia, devido à disposição menos favorável dos maçaricos, o que diminui consideravelmente sua área de atuação.

Figura 13: Visão interna de fornos side port e end port



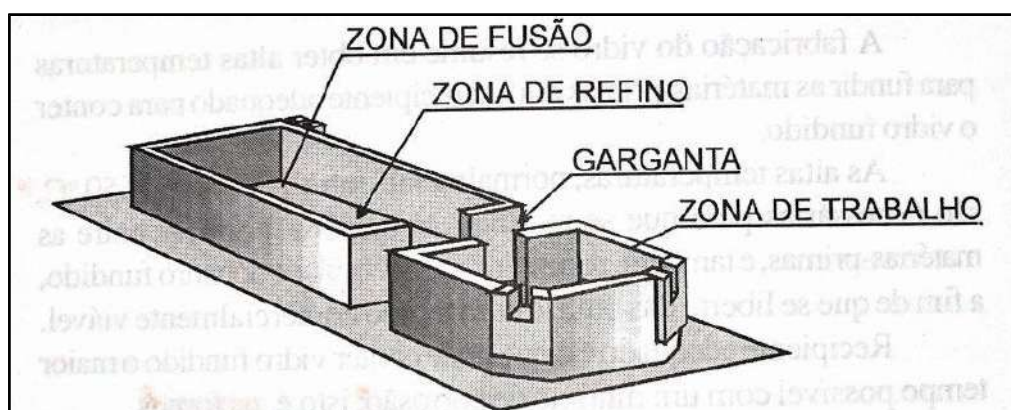
Fonte: Autoria própria (2024)

Os fornos de fluxo contínuo operam de forma ininterrupta, 24 horas por dia, e têm uma vida útil estimada de 8 a 10 anos (MAIA, 2003). Após esse período, é

recomendada a reforma do forno devido ao desgaste natural do material refratário causado pelas condições extremas a que o forno é submetido. A vida útil dos fornos pode ser prolongada se forem adotadas boas práticas operacionais, como minimizar variações na temperatura interna e manter a estabilidade do nível do forno.

Nos fornos contínuos, a área de trabalho é dividida em zonas específicas. Segundo Maia (2003) e Jaime e Dantas (2009), as principais zonas são a zona de fusão, a zona de refino, a garganta e o alimentador. Cada uma dessas zonas desempenha uma função específica no processo de fabricação e estão detalhadas nas imagens a seguir.

Figura 14: Representação de forno contínuo de vidro



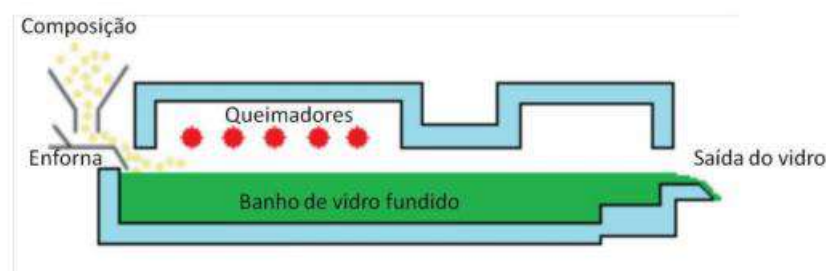
Fonte: Maia (2003)

Após a preparação, a mistura finalizada entra no forno por meio de uma estrutura conhecida como "casinha de cachorro", localizada na parte traseira da câmara de fusão, ou zona de fusão. É então alimentada por transportadores helicoidais ou calhas vibratórias, iniciando o processo de fusão. 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. Uma mistura combustível de gás natural e ar pré-aquecido é injetada na câmara do forno para alcançar uma temperatura de aproximadamente 1580°C. Essa combinação produz chamas que se assemelham a tochas, impactando o material e causando sua fusão em questão de minutos. Alternativamente, outros gases, como biogás ou biometano, podem ser empregados como fonte de calor, reduzindo os custos energéticos do processo, tornando-se uma opção atraente. A temperatura é ajustada conforme necessário, considerando o teor de umidade e a

quantidade de caco presente no lote (Ekpo, 2022).

Durante a operação do forno, ele se assemelha a uma piscina de material fundido, onde, de um lado, o vidro é retirado para produzir o produto desejado, enquanto, do outro, a quantidade da composição é reposta. O controle preciso da quantidade de vidro no forno é essencial e é realizado por um sistema que mede o nível do banho com precisão milimétrica (Akerman, 2013).

Figura 15: Esquema de corte longitudinal de um forno de fusão side port.



Fonte: Akerman (2013)

Durante a conversão de um lote, comumente composto por pós óxidos, carbonatos e outros sais, uma série de reações químicas é desencadeada. Isso inclui a liberação de água, a formação de carbonatos duplos, como $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ e $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, a decomposição térmica de carbonatos, sulfatos e nitratos, a formação de fase líquida, além da dissolução de componentes refratários, como sílica e alumina, na fase líquida (Baino et al, 2021). Durante esse processo, bolhas contendo esses produtos, principalmente CO_2 , são formadas. Nesse momento, ocorre a etapa de refinamento, em que as bolhas maiores sobem até o topo e participam da homogeneização, enquanto as bolhas menores não são eliminadas devido ao tempo requerido para sua redução. Duas alternativas são adotadas para solucionar esse problema: ou o gás se dissolve no material fundido ou as bolhas menores se agregam às maiores e ascendem até a superfície. Essas operações são aceleradas pelo uso de afinantes introduzidos em pequenas quantidades na primeira etapa do processo e/ou no vidro fundido (Bourhis, 2014).

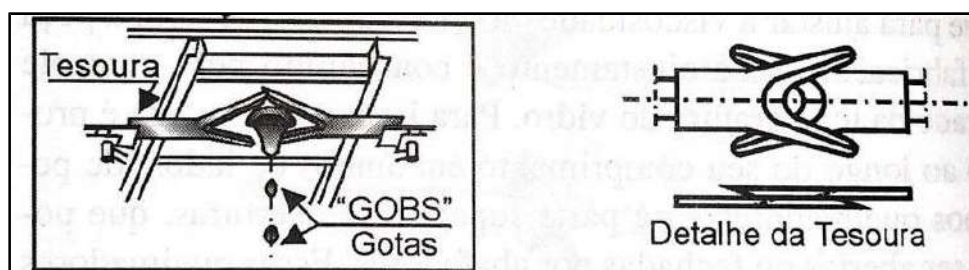
A partir da garganta, ou zona de condicionamento, o vidro fundido é gradualmente resfriado até alcançar temperaturas adequadas para a moldagem, em torno de 1100°C . Este controle de temperatura é realizado por pequenos queimadores

e abafadores, que garantem a manutenção uniforme da temperatura da massa vítrea. A qualidade das garrafas produzidas está fortemente relacionada a um condicionamento eficiente do vidro, sem variações térmicas, tornando a zona da garganta uma das mais críticas e estudadas na operação de um forno de vidro.

Finalmente, o alimentador (ou feeder) é um canal que possui em seu fim uma bacia refratária, chamada de panela, com um orifício no fundo, através do qual o vidro é extraído pela ação da gravidade. O controle do fluxo de vidro que alimenta o maquinário subsequente é assegurado por punções refratárias, que regulam o fluxo através de seu movimento e posicionamento na estrutura da zona.

Após o vidro ser fundido no forno, passa para a etapa de conformação, que varia de acordo com o produto desejado e pode ser realizada por diversos processos diferentes. O processo de formação do vidro começa quando ele ainda está viscoso e, ao mesmo tempo em que adquire uma forma, esfria, aumentando sua viscosidade. A conformação é concluída quando o vidro se torna rígido, assumindo o formato desejado (Akerman, 2013).

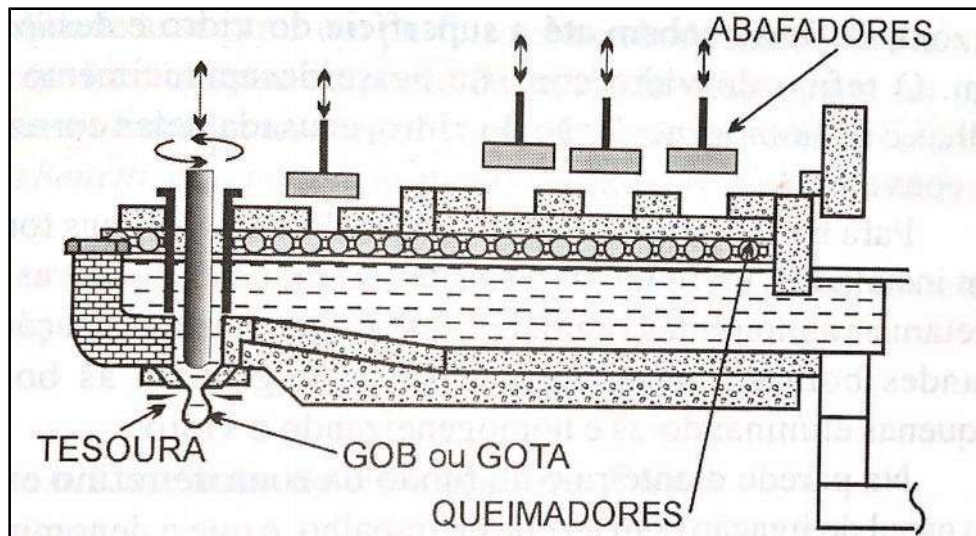
Figura 16: Formação e corte das gotas



Fonte: Maia (2003)

Para iniciar o processo de conformação, o vidro fundido na temperatura adequada possui a aparência de um xarope espesso de cor vermelho-alaranjado. As garrafas de vidro são frequentemente moldadas pela máquina de seção individual (IS). Para alcançar o molde, o vidro fundido, em sua temperatura plástica, é expelido por um orifício ao sair dos canais e passa por um sistema de tesouras para formar um cilindro sólido de vidro alongado, chamado de gota, contendo um peso predefinido e a quantidade exata de vidro necessária para formar a garrafa (Ekpo, 2022).

Figura 17: Representação do feeder.



Fonte: Maia (2003)

Em seguida, a gota é direcionada para um pré-molde por meio de um sistema de distribuição, dando início à produção, que pode seguir dois diferentes processamentos: Neck Narrow Press and Blow (NNPB) ou Blow and Blow (B&B), que darão forma à garrafa.

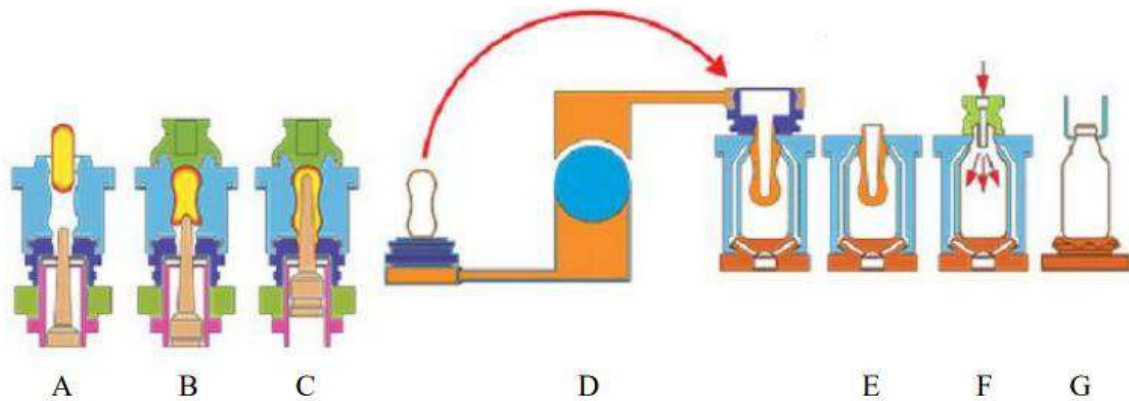
Figura 18: Máquina IS utilizada na produção de garrafas de vidro.



Fonte: Autor desconhecido (2024)

No processo NNPB, um êmbolo penetra na gota para pressioná-la contra o pré-molde. Em seguida, o parison, que é a peça de vidro em seu formato inicial, é virado e colocado em um molde para a fase de sopro, que dará a conformação final.

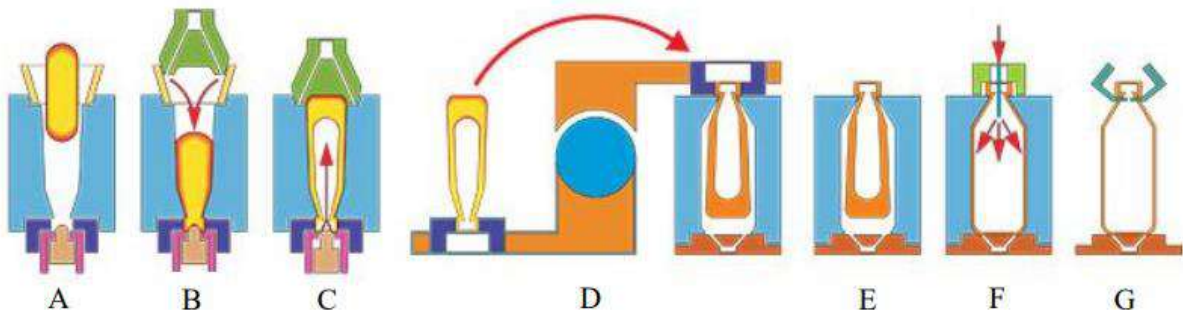
Figura 19: Passos do processo NNPB



Fonte: Manoel (2010)

O processo B&B se diferencia principalmente pela formação do parison, pois, ao invés da gota ser pressionada contra o pré-molde, ela é soprada. Em seguida, segue o mesmo caminho de molde onde recebe o segundo sopro.

Figura 20: Passos do processo B&B



Fonte: Manoel (2010)

Durante essa etapa, é importante controlar a temperatura para regular o fluxo e a distribuição do vidro. Ao concluir essa fase, o molde é aberto, e um mecanismo de garras pega a garrafa formada pelo gargalo, posicionando-a em uma placa de ventilação.

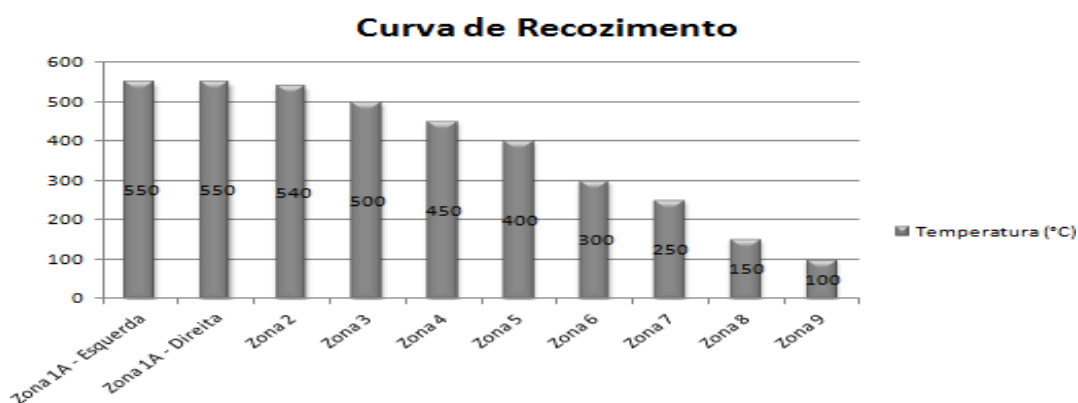
É importante observar que, devido à natureza dos processos, cada um deles apresenta uma série de defeitos específicos. No processo NNPB, a formação do fundo da garrafa é a primeira parte a ser realizada, o que implica que qualquer

oscilação no peso da gota resultará em falhas na boca. No processo B&B, ocorre o contrário, com a boca sendo formada inicialmente e o fundo por último, o que pode resultar em problemas de espessura no corpo da garrafa caso haja oscilações de peso, mudando a capacidade da garrafa. O controle preciso do nível de vidro dentro do forno e nos canais é fundamental, pois as oscilações serão transmitidas até o orifício por onde o vidro entra na máquina, afetando o fluxo de vidro. Independentemente do tipo de produção, é essencial controlar a temperatura para regular o fluxo e a distribuição do vidro.

3.3.1. Recozimento e Tratamentos superficiais

Após a fabricação utilizando um sistema de transporte composto por esteiras, as garrafas recém-formadas passam por uma etapa de recozimento. Essa etapa envolve aquecer o vidro até uma temperatura suficiente para liberar as tensões internas resultantes do resfriamento rápido e irregular durante a fabricação, seguido por um resfriamento controlado para minimizar o acúmulo de tensões e esforços permanentes.

Gráfico 1: Curva de Recozimento para garrafas Long Neck



Fonte: Autoria própria (2024)

Esse processo é realizado em equipamentos conhecidos como Lehr e pode durar de 40 minutos a 1 hora e meia, dependendo do tipo de garrafa produzida.

Figura 21: Lehr



Fonte: Akerman (2013)

As garrafas passam por dois processos distintos de tratamento superficial durante sua fabricação. Um desses procedimentos é realizado logo após a formação da embalagem de vidro, enquanto ela ainda está em altas temperaturas. Este processo, conhecido como tratamento térmico inicial, precede o resfriamento e é denominado tratamento a quente. O segundo tratamento é aplicado quando as garrafas já estão em temperaturas mais baixas, sendo denominado tratamento a frio (JAIME, 2006).

Na indústria, as garrafas de vidro são submetidas a várias fases do processo de produção, nas quais estão sujeitas a impactos repetidos entre si. Portanto, o tratamento a frio visa proteger e lubrificar a superfície externa do objeto de vidro, facilitando seu deslocamento na linha de produção e, assim, reduzindo a possibilidade de danos à superfície exterior da embalagem (JAIME, 2006). Os produtos utilizados nesse tratamento geralmente incluem polietilenoglicol, ácido oleico ou esteárico, os quais são pulverizados sobre a superfície do vidro (ORTIZ, 1996).

Por outro lado, o tratamento a quente tem como propósito aumentar a resistência superficial do vidro. Esse processo envolve a aplicação de vapores de uma solução de tetracloreto de estanho (SnCl_4) ou titânio (TiCl_4) nas garrafas, enquanto estas estão a uma temperatura em torno de 600°C , ao passarem por um pequeno túnel antes do forno de recozimento. Isso resulta na formação de uma fina camada de óxido de estanho ou titânio, que preenche os defeitos na superfície da garrafa e auxilia na adesão do tratamento a frio e oferece uma maior proteção contra a abrasão superficial (JAIME, 2006).

Figura 22: Equipamento do tratamento à quente.

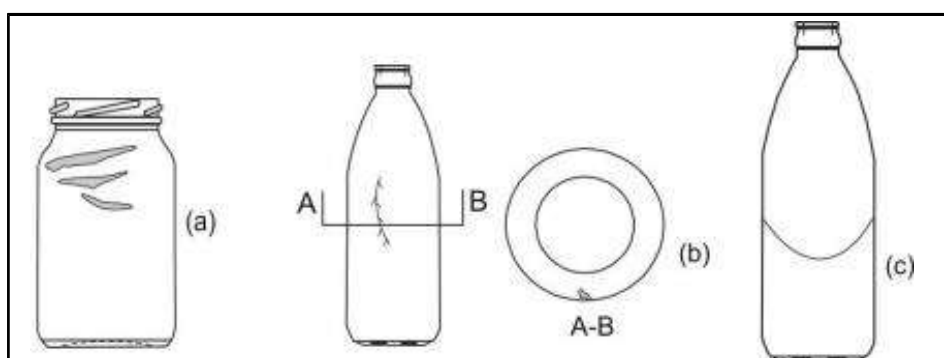


Fonte: Arkema (2017)

3.3.2. Inspeção de garrafas

De acordo com Emhart (2010), uma embalagem de qualidade é aquela que atravessa a linha de produção do cliente sem problemas e entrega o produto ao consumidor final. Portanto, é crucial que, antes de serem liberadas para venda, as embalagens de vidro passem com sucesso pela inspeção de qualidade, atendendo às normas estabelecidas para satisfazer as necessidades do cliente. Segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, cerca de 100 defeitos podem surgir nas garrafas durante o processo de produção, alguns resultantes de impurezas e pedras, fora do controle do operador, enquanto outros estão relacionados a falhas nos equipamentos. Alguns desses defeitos são explicitados na figura abaixo.

Figura 23: Tipos de defeitos em garrafas de vidro: (a) Dobra, (b) Fissura, (c) Poleiro



Fonte: Jaime (2009)

Os dados estatísticos indicam que a maioria dos defeitos normalmente ocorre devido a problemas na operação e no maquinário. Portanto, é essencial que toda a

equipe de produção seja capaz de identificar os defeitos e compreender as ferramentas disponíveis para resolvê-los.

Quando uma garrafa apresenta defeitos durante o processo de enchimento na linha do cliente, a reputação do fornecedor é prejudicada, resultando na perda de confiança do cliente. Em alguns casos, ajustes nos parâmetros de operação e substituição de equipamentos podem ser necessários para corrigir as causas fundamentais dos defeitos.

É crucial que os operadores das máquinas sejam capazes de identificar rapidamente os defeitos e corrigi-los minuciosamente para manter a eficiência da produção. Portanto, foi sugerida a criação de um manual que liste os principais defeitos, com descrições detalhadas, esboços indicando sua aparência e localização nas garrafas, causas fundamentais e soluções de correção. Os operadores devem realizar inspeções frequentes nas garrafas para garantir que nenhum defeito passe para o consumidor final.

Conforme o padrão técnico de processo, em intervalos determinados, os operadores devem separar uma garrafa de cada molde, aguardar o resfriamento e examiná-la detalhadamente em busca de defeitos. Eles devem verificar a quantidade de defeitos específicos rejeitados, identificar as causas fundamentais e determinar os ajustes necessários nas máquinas para resolver o problema. Os inspetores eletrônicos são equipamentos automáticos responsáveis por detectar e rejeitar os defeitos nas garrafas.

Figura 24: Inspetores eletrônicos da área fria.



Fonte: Tiama (2017)

3.3.3. Controle de qualidade

Conforme a definição de Campos (1992), um produto ou serviço de qualidade é aquele que satisfaz completamente, de forma confiável, acessível, segura e pontual, às necessidades do cliente. A partir desta fase do processo em diante, apenas um controle de qualidade de 100% das garrafas na linha assegura que nenhum defeito seja entregue ao cliente. Esse controle é realizado por um conjunto de máquinas inspetoras que testam diversos parâmetros, como altura, choque vertical, diâmetro interno do gargalo, defeitos físicos, planicidade, verticalidade, peso, volume, resistência à pressão interna e defeitos críticos que possam afetar a saúde do consumidor

A espessura da embalagem influencia em vários aspectos, como resistência ao choque térmico, à pressão interna e ao impacto. Por isso, são realizados ensaios em laboratório por amostragem para verificar a confiabilidade da produção. Todos os dados provenientes das análises e ensaios realizados no produto devem ser inseridos periodicamente no sistema para posterior análise e detecção de anomalias. A retenção de produtos defeituosos deve ser feita desde o momento em que uma amostra ruim é identificada até a última análise bem-sucedida, para garantir que nenhum defeito seja entregue ao cliente final.

Outro ponto sensível nessa etapa do processo são a presença de corpos estranhos ou bolsas de gás presas no corpo da embalagem. Esses defeitos estruturais conferem as garrafas um ponto crítico de estresse, que invariavelmente, passam por um processo de alívio, fazendo a garrafa estourar. Considerando o tempo que as embalagens ficam armazenadas, sejam esperando seu enchimento ou nas prateleiras dos mercados, essa possibilidade torna-se um risco considerável, tanto para clientes como para a credibilidade da marca. Por isso, é imprescindível que esse tipo de defeitos seja removido durante o processo de fabricação.

Após verificar a conformidade da embalagem com todas as especificações requeridas, ela segue para a paletização. As embalagens defeituosas são retidas ou imediatamente redirecionadas para o refugo, que leva o vidro de volta ao silo de cacos para ser reaproveitado. Para identificar possíveis defeitos recorrentes, as garrafas possuem um código de pontos que caracteriza o molde de origem, conhecido como

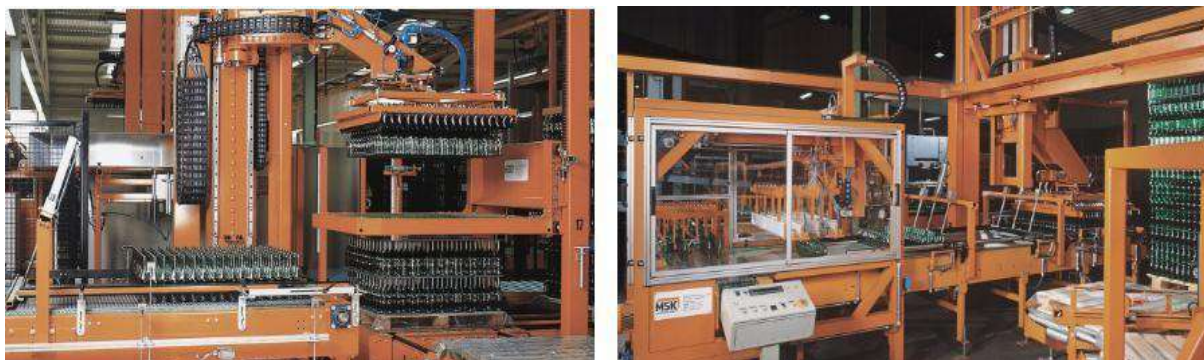
DOT, facilitando assim sua rastreabilidade. Dessa forma, é possível identificar anomalias na produção em tempo hábil e substituir os moldes defeituosos.

3.3.4. Embalagem

Após o rigoroso controle de qualidade na área de inspeção, as garrafas são encaminhadas pelos transportadores até a paletizadora, onde são organizadas em fileiras e gradualmente agrupadas em camadas para formar os bulks. A primeira camada é montada sobre um pallet com um filme plástico, onde a primeira fileira de garrafas é disposta. Em seguida, intercala-se uma fileira de chapatex e outra de garrafas alinhadas por um centralizador automático, garantindo assim a estabilidade e alinhamento da estrutura. Ao término do empilhamento, é adicionado um chapatex e um quadro de topo.

Após essa etapa, o bulk é direcionado para a cintadora vertical, onde é cintado para garantir uma pressão mínima de 80 lbs, conforme especificado no manual da MSK, a fim de evitar desorganização das garrafas durante o transporte. Em seguida, o bulk cintado é encaminhado para uma máquina envolvedora de filme, que realiza a embalagem de forma a protegê-lo contra impurezas do ambiente externo.

Figura 25: Paletizadora de Garrafas.



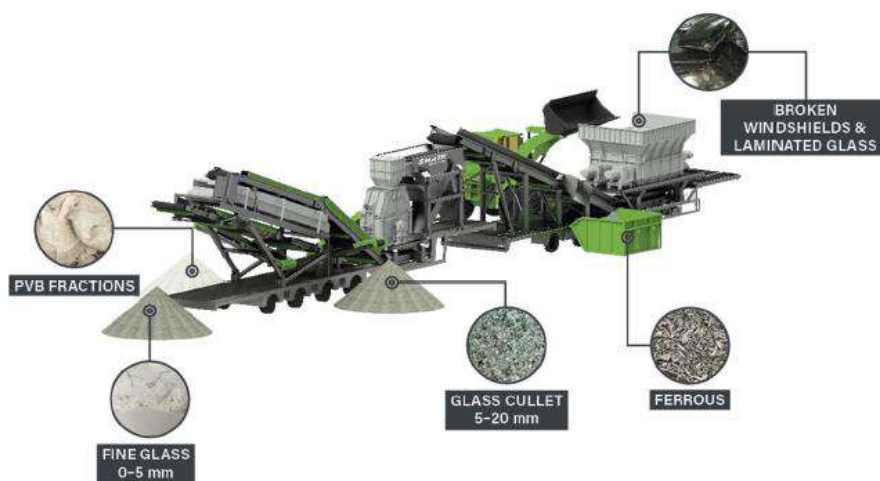
Fonte: MSK (2017)

3.4. Processo de Beneficiamento de caco de vidro

A reintegração de fragmentos de vidro na produção de garrafas inclui como etapa final e essencial o tratamento do material coletado. De acordo com a definição da Conama (2002), o tratamento refere-se ao conjunto de operações e processos aos quais os resíduos são submetidos antes de serem utilizados como matéria-prima ou

produto. Para os resíduos de vidro, essas operações incluem principalmente a lavagem, separação por granulometria e magnetismo, trituração, aspiração e separação por cor dos materiais recolhidos (MAIA, 2013).

Figura 26: Vista de uma linha de beneficiamento de caco



Fonte: CelSian (2024)

Com isso em mente, uma variedade de processos de beneficiamento foi desenvolvida a fim de melhorar o caco disponível para a reutilização no processo de produção de embalagens.

O beneficiamento manual é uma abordagem artesanal que não utiliza equipamentos especializados. Este processo envolve a seleção manual de impurezas, especialmente metais e cerâmicas, e a separação dos fragmentos por cores. Devido à sua menor eficiência e ao menor volume de material tratado, é recomendado utilizar vidro coletado por meio de sistemas de coleta seletiva, que geralmente contêm menos contaminantes (ABIVIDRO, 2019).

Já o processo semiautomatizado combina a catação manual com o uso de tecnologia para o beneficiamento do vidro. Esse método é amplamente adotado no Brasil por empresas de beneficiamento e fabricantes de vidro. Inclui a utilização de máquinas específicas para a lavagem (como tambores ou tanques), trituração (moinhos) e separação magnética (séries de ímãs permanentes) do vidro pós-consumo. A parte manual do processo ocorre em esteiras localizadas entre os ímãs permanentes e o triturador, onde trabalhadores, usando equipamentos de proteção individual, removem materiais indesejados como cerâmicas, plásticos e metais que

possam ter passado pelos ímãs (ABIVIDRO, 2019). Um exemplo desse tipo de operação pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 27: Catação manual em processo semiautomatizado de beneficiamento de caco



Fonte: Bernardo (2017)

O processo automatizado de beneficiamento se distingue dos métodos anteriores pela ausência de intervenção manual na separação dos contaminantes. Este sistema utiliza tecnologias avançadas para reconhecer e diferenciar o vidro apto para reintegração no processo de produção de vidro e as impurezas que devem ser descartadas. A implementação desse tipo de processo exige altos investimentos iniciais, o que faz com que seja adotado por um número reduzido de indústrias no Brasil (ABIVIDRO, 2019).

Um exemplo de usina com beneficiamento automatizado é a Vidroporto, situada em Porto Ferreira (SP). A fábrica instalou uma planta automatizada de beneficiamento em 2013, sendo pioneira no país a adotar essa tecnologia. A planta possui uma capacidade de produção de 20 toneladas por hora e utiliza uma técnica fornecida pela empresa espanhola Picvisa. Esta tecnologia baseia-se na separação óptica dos resíduos de acordo com sua cor, material e forma (VIDROPORTO, 2021). A imagem a seguir ilustra a linha de beneficiamento automatizado na Vidroporto.

Figura 28: Usina automatizada de beneficiamento de caco na Vidroporto



Fonte: Vidroporto (2021)

É fundamental destacar que o processamento de fragmentos de vidro é majoritariamente conduzido por empresas especializadas que coletam resíduos de vidro de catadores, associações e sistemas de coleta. Estas empresas realizam a separação e a trituração dos resíduos, e depois comercializam o vidro processado para as fábricas de vidro, que o utilizam na sua produção. Um exemplo de uma empresa que executa esse tipo de processamento é a Comércio de Cacos de Vidro Mazzeto. Com um sistema semiautomatizado, essa empresa é capaz de produzir uma quantidade suficiente de material para abastecer grandes fabricantes de vidro, como a Owens Illinois e a Saint Gobain.

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 suplantiar esse custo adicional do processo. (CAETANO, 2017).

A terceirização das operações de coleta e beneficiamento de cacos de vidro exige a implementação de um sistema de controle de qualidade para o material adquirido pelas indústrias vidreiras. Assim, toda a carga de vidro recebida nas vidreiras passa por uma triagem antes de ser integrada às matérias-primas, incluindo

análises por amostragem e verificação dos parâmetros estabelecidos para a quantidade de impurezas. Se o material não atender a esses critérios de qualidade, pode ser devolvido à empresa beneficiadora, que então arca com os custos logísticos do produto não aceito. Isso explica a necessidade de repetir o processo de beneficiamento com os lotes que não atendem aos padrões estabelecidos.

É importante notar que os lotes de vidro que não atendem às especificações de qualidade para a indústria de vidro, seja por apresentarem altas quantidades de impurezas ou por terem uma composição química diferente da desejada, podem ser reutilizados em outros processos produtivos. Cacos de vidro podem ser transformados em espuma e fibra de vidro, incorporados em asfalto, utilizados em tintas refletivas, bijuterias, ou em concreto para a construção civil. Dessa forma, a capacidade de reciclagem do material é preservada, mesmo que não seja reaproveitado na indústria vidreira (CAETANO, 2018).

Além disso, algumas indústrias vidreiras optam por realizar o beneficiamento de seus próprios cacos de vidro para garantir a qualidade do material que será incorporado na produção. Empresas como VidroPorto (SP) e Ambev Vidros (RJ) possuem suas próprias linhas de beneficiamento, investindo recursos financeiros e alocando funcionários especializados para operar essas instalações. Essas atividades de separação podem ser realizadas de forma independente, utilizando cacos sujos provenientes de cooperativas, ou em série, com cacos adquiridos de empresas beneficiadoras, assegurando que os requisitos de qualidade sejam atendidos.

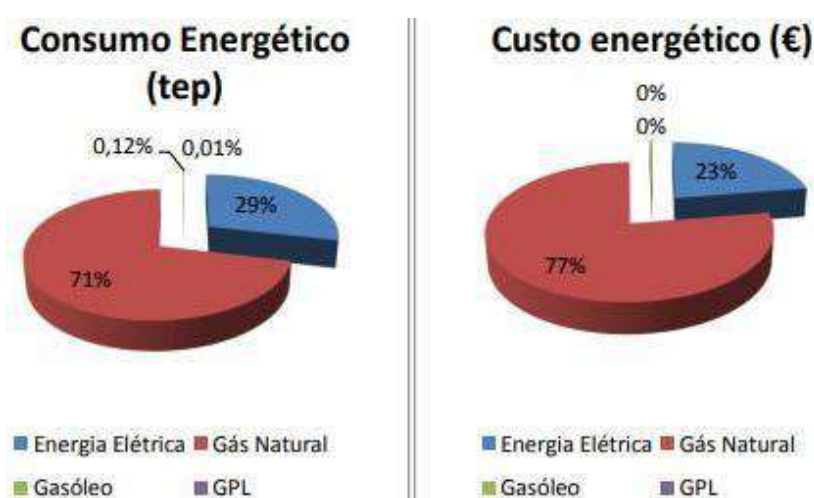
3.5. Consumo energético no processo vidreiro

A fabricação de vidro é um processo intensivo em energia (BNDES, 2007), e em 2007 foi classificada como o 13º maior consumidor de energia no setor industrial brasileiro (EPE/MME, 2008). Isso ocorre porque uma planta de vidro consome, em média, cerca de 2,5 milhões de kcal por tonelada de garrafas produzidas em energia térmica, além de mais de 400 kWh/t de energia elétrica ao longo da cadeia produtiva de embalagens (GAINES e MINTZ, 1994). Portanto, uma parte significativa dos custos associados à produção de embalagens de vidro está relacionada à obtenção de recursos energéticos.

Uma análise mais detalhada do consumo energético em plantas vidreiras revela que a maior parte da energia é utilizada nas etapas de fusão e refino. Estudos indicam que aproximadamente 70% do gasto energético é direcionado para essas fases, devido à necessidade constante de energia para manter as altas temperaturas (acima de 1500°C) necessárias para a fusão das matérias-primas e a produção do vidro (D'ANTONIO et al., 2003).

No que diz respeito à matriz energética utilizada nas plantas vidreiras, observa-se que o gás natural é predominantemente empregado como fonte térmica, enquanto a energia elétrica é usada para outras aplicações dentro da fabricação das embalagens. Um estudo de caso revelou a distribuição do uso das diferentes fontes de energia, considerando suas quantidades e custos associados. Para análise, utilizou-se um fator de conversão de energia elétrica de $1 \text{ kWh} = 215 \times 10^{-6} \text{ tep}$ (toneladas equivalentes de petróleo), com o preço da energia elétrica a 0,0713 €/kWh e o preço do gás natural a 0,0355 €/kWh (PEREIRA, 2015).

Figura 29: Consumos e custos energéticos.

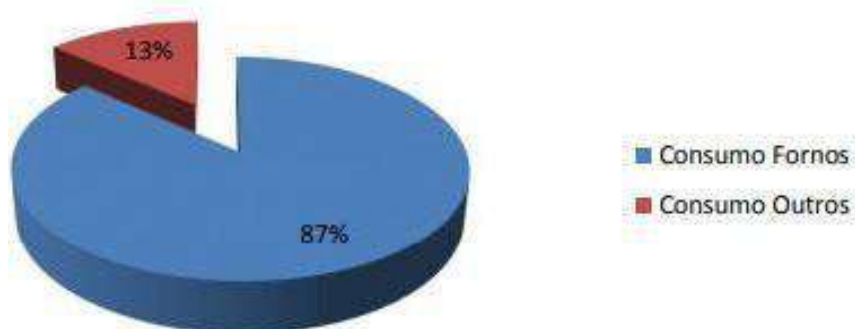


Fonte: Pereira (2015)

Os gráficos mostram claramente que o gás natural é a principal fonte de energia na fabricação de garrafas de vidro, representando aproximadamente 71% do consumo energético total da planta, devido ao seu uso na fusão das matérias-primas nos fornos. Embora o custo unitário da energia elétrica seja mais alto, o impacto financeiro do consumo de gás natural é mais significativo, correspondendo a cerca de 77% dos gastos com energia na planta (PEREIRA, 2015).

O gás natural é preferido como fonte de energia térmica devido a suas vantagens sobre outros combustíveis, incluindo uma queima mais uniforme, melhor controle das variáveis do processo, manutenção mais eficiente dos queimadores e menores taxas de emissão de poluentes (BNDES, 2007; MAIA, 2003). Dado o elevado consumo energético dos fornos, cerca de 87% do gás natural é utilizado especificamente no processo de fusão das matérias-primas.

Figura 30: Consumo de gás natural em planta vidreira



Fonte: Pereira (2015)

O gás natural é utilizado nos fornos de vidro como combustível para os queimadores, fornecendo o calor necessário para as transformações físico-químicas das matérias-primas dentro do equipamento. Na indústria vidreira, os queimadores são equipados com estruturas chamadas regeneradores, que reaproveitam a energia dos gases de combustão para pré-aquecer o ar que será utilizado na queima subsequente. Os fornos contínuos regeneradores, que incorporam essas estruturas, apresentam maior eficiência térmica em comparação a outros tipos.

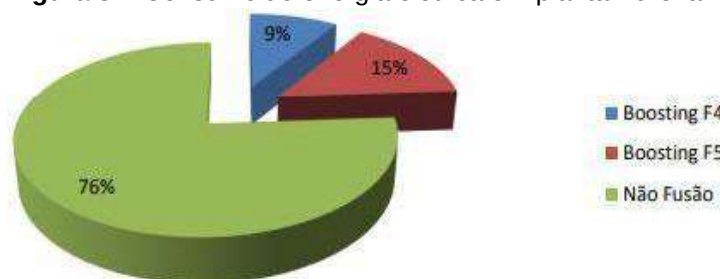
No entanto, é importante observar que os fornos de vidro atuais ainda apresentam baixa eficiência térmica. Em média, apenas cerca de 50% do calor fornecido é aproveitado, resultando em aproximadamente 100 kcal por quilo de vidro produzido. Para reduzir essas perdas, os fabricantes de vidro empregam diversas medidas, como o uso de regeneradores, isolamento térmico das paredes, da abóbada e do fundo dos fornos, e minimização das paradas de produção (MAIA, 2003).

Além do uso principal do gás natural para a fusão das matérias-primas, ele também é aplicado em processos secundários dentro da planta, como nos canais de troca de calor, onde o gás ajuda a manter a temperatura desejada no vidro até a

camisa, e no recozimento das garrafas no Lehr, que trata termicamente as tensões intrínsecas ao vidro moldado.

Embora o gás natural seja a principal fonte de energia, a energia elétrica é a segunda maior em termos de matriz energética. Esse consumo é dividido entre o forno e outros processos da planta na proporção de 75% para o forno e 25% para demais aplicações. No forno, a energia elétrica é utilizada principalmente para os Boostings, estruturas auxiliares que aumentam a capacidade de extração do forno e auxiliam na obtenção das altas temperaturas necessárias para a fusão do vidro (PEREIRA, 2015; MAIA, 2003).

Figura 31: Consumo de energia elétrica em planta vidreira



Fonte: Pereira (2015)

Conforme ilustrado no esquema anterior, mais de 75% do consumo de energia elétrica na produção de embalagens de vidro é destinado a processos que não envolvem diretamente a fusão das matérias-primas. A maior parte dessa energia é utilizada para alimentar compressores de baixa pressão, que são cruciais para a moldagem das garrafas e o funcionamento das máquinas IS. Além disso, uma quantidade significativa de energia elétrica é empregada em ventiladores responsáveis pelo resfriamento dos moldes e pré-moldes (PEREIRA, 2015).

Embora o gás natural e a energia elétrica sejam os principais recursos energéticos no processo de fabricação de vidro, outras fontes devem ser consideradas. Com o aumento da demanda por fontes renováveis e a instabilidade no fornecimento de gás natural no Brasil, a indústria de vidro está começando a explorar a cogeração de energia através do uso de biogás. Estudos indicam que o biogás pode substituir o gás natural nos fornos de fusão sem comprometer a qualidade do vidro nem causar danos ao refratário dos fornos. Contudo, a disponibilidade limitada de biogás e os altos custos de adaptação dos fornos para essa tecnologia ainda são obstáculos significativos, levando a indústria a utilizar uma combinação de ambos os combustíveis.

Além disso, o consumo de GLP (gás liquefeito de petróleo) e combustível veicular também faz parte dos custos associados à produção de garrafas de vidro. Esses combustíveis são utilizados no transporte do produto, tanto interno, por meio de GLP em empilhadeiras, quanto externo, com diesel e gasolina nas frotas de distribuição. No entanto, o gasto energético associado a esses combustíveis é relativamente pequeno em comparação com as principais fontes de energia utilizadas (PEREIRA, 2015).

4. Metodologia

A realização deste trabalho ocorreu mediante um amplo levantamento bibliográfico, utilizando como fontes as Associações formadas ao redor do universo vidreiro e das cooperativas de recolhimento e beneficiamento de caco, para a construção de um panorama atual do uso do caco pós consumo como insumo de processo. A escolha das fontes foi baseada na relevância e atualidade das publicações, utilizando de textos de autores e instituições responsáveis.

5. Análise Técnica sobre o uso de caco de vidro

O vidro e suas embalagens são fundamentais para o desenvolvimento sustentável a longo prazo na indústria. Suas propriedades físico-químicas permitem que o vidro seja reutilizado repetidamente, mantendo suas características de resistência mecânica e química. Além disso, o vidro pode ser totalmente reciclado, com seus resíduos sendo reintegrados no processo de fabricação, o que minimiza a geração de resíduos pós-consumo.

No que diz respeito à não geração de resíduos, as garrafas retornáveis desempenham um papel destacado na indústria de bebidas e alimentos. Embora o custo de produção dessas embalagens seja mais alto, elas podem ser reutilizadas entre 20 e 30 vezes sem perda de qualidade no armazenamento. Isso traz benefícios ecológicos, pois reduzem a necessidade de descarte e eliminação em aterros, econômicos, em função de evitar a necessidade de produzir ou adquirir novos recipientes e energéticos, devido ao fato de diminuir a demanda por produção de novas garrafas, reduzindo o consumo de energia nas vidreiras.

No entanto, a viabilidade econômica do sistema de garrafas retornáveis depende de manter a taxa de quebra abaixo de 5% do total. Custos adicionais

associados à reutilização, como transporte e lavagem, e a necessidade de substituir recipientes danificados podem impactar a eficiência do sistema. Devido aos altos custos de logística e à suscetibilidade das garrafas à quebra durante o transporte em grandes distâncias, a adoção de garrafas retornáveis tem diminuído na indústria contemporânea (ROSA et al., 2007).

Nesse contexto, a reciclagem do vidro pós-consumo torna-se ainda mais relevante, especialmente com o aumento do uso de embalagens descartáveis. A reciclagem de vidro envolve a reintegração de fragmentos vítreos, conhecidos como cacos, ao processo de fabricação. Embora o caco não seja tecnicamente considerado matéria-prima no processo vidreiro, ele desempenha um papel crucial. De fato, cacos de vidro podem ser usados para produzir novas embalagens em uma proporção de quase 1:1, o que significa que 100 kg de cacos podem gerar praticamente 100 kg de nova massa de vidro para produção.

Sob uma perspectiva ecossustentável, a reutilização de cacos de vidro contribui significativamente para a redução das emissões de gases no processo de fabricação de vidro, especialmente o dióxido de carbono. Isso ocorre porque as matérias-primas utilizadas na produção do vidro, como carbonatos (por exemplo, barrilha, que é carbonato de sódio), liberam CO₂ durante o processo de fusão. Esse gás é emitido na forma de bolhas e absorve parte da energia fornecida no processo. Em contraste, os fragmentos de vidro já processado não passam por essa decomposição e, portanto, não produzem CO₂, resultando em uma menor liberação de gases de efeito estufa e redução do impacto ambiental.

Além disso, a utilização de cacos reduz a necessidade de matérias-primas virgens como areia, barrilha e feldspato, que são extraídas de fontes naturais. A substituição dessas matérias-primas por cacos de vidro reduz a demanda por extração mineral, minimizando o impacto ambiental associado à mineração e ao processamento desses recursos. Isso também leva a uma menor necessidade de energia para introduzir essas matérias-primas no mercado.

Economicamente, o uso de vidro reciclado é vantajoso para a produção, pois reduz os custos com matérias-primas, especialmente areia e barrilha, e diminui o consumo de combustíveis necessários para a fusão do vidro. O menor consumo energético ocorre porque a reciclagem permite operar os fornos a temperaturas mais

baixas e reduz a perda de energia associada à emissão de CO₂, em comparação com o uso de matérias-primas puras. (KOVACEC et al., 2011; RUTH et al., 1997)

No Brasil, os fornos de vidro frequentemente utilizam uma proporção de caco em sua composição, variando entre 30% e 80%, dependendo da disponibilidade e da qualidade dos cacos. Cacos com alta impureza podem causar problemas no processo produtivo, exigindo um controle de qualidade rigoroso. (KOVACEC et al., 2011)

No entanto, o aumento da utilização de cacos enfrenta desafios devido à baixa qualidade do material disponível. O sistema de logística reversa no país ainda é deficiente, tanto na coleta quanto no beneficiamento e transporte dos cacos de vidro. A coleta seletiva é limitada e frequentemente não separa adequadamente os materiais recicláveis, resultando em perda de valor e destinação inadequada para aterros.

Além disso, a infraestrutura logística para coleta e transporte é ineficiente, com altos custos associados à coleta de cacos, o que torna economicamente inviável manter rotas de cadeia reversa. Isso reduz a quantidade de material reciclado disponível para a indústria do vidro.

A qualidade do caco também é comprometida pelas técnicas rudimentares de beneficiamento, que são predominantemente manuais e semiautomáticas. Isso resulta em menor qualidade e quantidade de caco processado, tornando o investimento em novas tecnologias menos atraente devido ao baixo valor de venda do caco reciclado em relação aos altos custos de investimento e operação. (CAETANO, 2017)

Além disso, a avaliação do ciclo de vida das embalagens de vidro sugere que, ao contrário do que ocorre com garrafas retornáveis, a reciclagem de vidro pode não levar a uma economia global de energia. As economias de energia dependem de fatores como a localização dos aterros, pontos de coleta e plantas de vidro, e podem ser reduzidas por distâncias longas e infraestrutura ineficiente. (GAINES e MINTZ, 1994)

Portanto, apesar dos benefícios energéticos da reciclagem de cacos de vidro, a melhoria da logística reversa é essencial para garantir uma redução efetiva no consumo de energia e aumentar a sustentabilidade do setor. É crucial investir no

desenvolvimento dessas cadeias reversas tanto localmente quanto nacionalmente para atender às necessidades da indústria e promover a sustentabilidade a longo prazo.

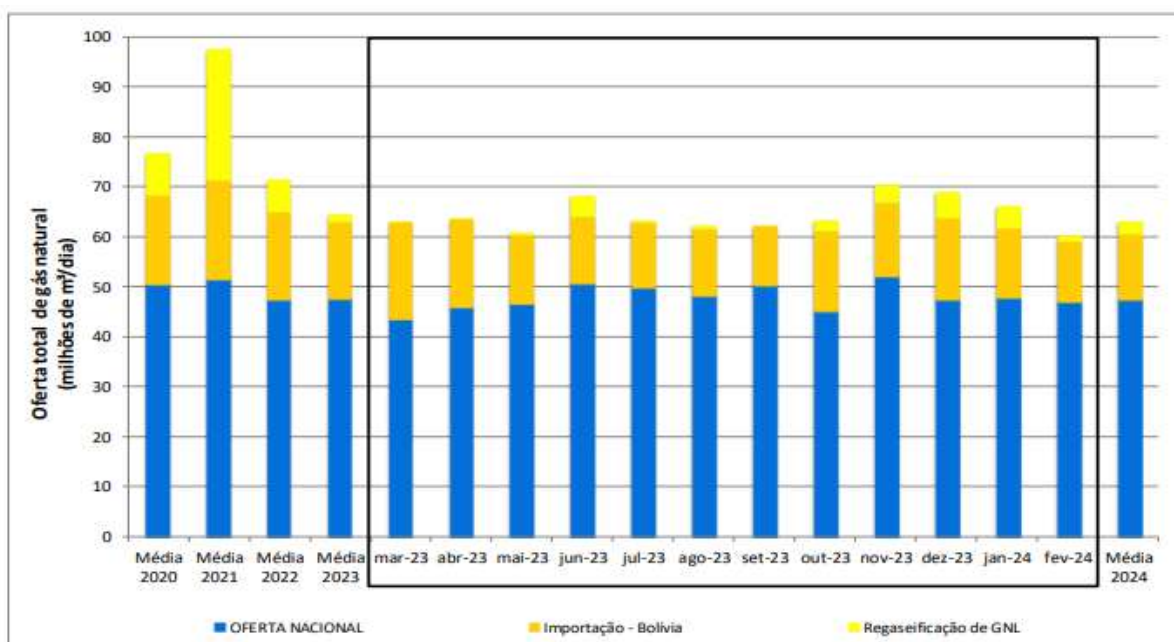
5.1. Análise econômico da utilização de caco

Outro aspecto importante da incorporação de cacos de vidro nos fornos é o impacto econômico favorável para as fábricas. Com o setor de produção de embalagens de vidro enfrentando uma concorrência crescente de alternativas como os plásticos, reduzir os custos de produção é crucial para manter a participação de mercado do vidro.

O principal benefício econômico da reciclagem de vidro é a redução nos gastos com energia, especificamente com a compra de insumos caloríficos. Devido à alta demanda energética da produção de vidro, as fábricas consomem grandes volumes de gás natural. Por exemplo, conforme o estudo de Kovacec (2011), um forno de vidro com capacidade de 150 toneladas por dia, que utiliza apenas matéria-prima bruta, requer cerca de 60.000 MJ de energia por dia. Considerando o poder calorífico do gás natural de 9.400 kcal/m³ (COMGAS, 2021), esse forno hipotético consumiria aproximadamente 1.525 m³ de gás natural diariamente.

Esse elevado consumo representa um desafio significativo, especialmente em um cenário de instabilidade no fornecimento de gás natural no Brasil. Com reservas limitadas e uma alta demanda, o país depende da importação do gás, principalmente de países sul-americanos como a Bolívia (EPE/MME, 2015). O último Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural (GOV, 2024) revelou que cerca de 13% da oferta de gás foi proveniente de importações, seja por gasoduto boliviano ou pela regaseificação de GNL, como ilustrado na imagem a seguir.

Gráfico 2: Oferta de gás natural para a indústria no país



Fonte: GOV (2024)

A alta dependência de gás natural para a produção de vidro resulta em um aumento significativo nos custos de fabricação. Em um cenário onde o preço médio do gás natural era de aproximadamente 14 US\$/MMBTU em 2020 (BARROSO et al., 2020), uma fábrica de vidro com capacidade para produzir 150 toneladas de vidro por dia, utilizando apenas matéria-prima bruta, gastaria cerca de 796 US\$/dia em gás natural. Isso equivale a um custo anual de aproximadamente 1,55 milhões de reais, considerando uma taxa de conversão em 5,52, apenas para a compra de combustível necessário para o processo produtivo.

A introdução de cacos de vidro nos fornos pode reduzir significativamente a demanda energética e, conseqüentemente, os custos com gás natural. De acordo com o estudo de Kovacec (2011), substituir 10% da matéria-prima bruta por cacos de vidro pode resultar em uma redução de cerca de 3% no consumo de gás natural. Para uma fábrica que produz 150 toneladas de vidro por dia, isso representa uma economia de aproximadamente 23,7 US\$/dia. Ao longo de um ano, essa economia pode alcançar cerca de 50 mil reais.

Considerando a prática comum no Brasil de utilizar em média 60% de cacos nos fornos vidreiros, a economia anual no custo de gás natural pode chegar a 313 mil reais. Com grande parte das despesas de manutenção das fábricas voltadas para o

consumo de energia, a redução desses custos representa uma vantagem competitiva significativa e contribui para a sustentabilidade do negócio de produção de garrafas de vidro.

Além dos benefícios econômicos, a utilização de cacos também reduz a necessidade de matéria-prima bruta. Os cacos substituem materiais puros, como areia, barrilha e feldspato, necessários para a fabricação de vidro. Como 1 tonelada de cacos de vidro pode produzir 1 tonelada de vidro, e é necessária cerca de 1,17 tonelada de matéria-prima bruta para produzir a mesma quantidade de vidro, a utilização de cacos resulta em uma redução imediata na quantidade de matéria-prima bruta necessária (KOVACEC, 2011).

Do ponto de vista econômico, o impacto da incorporação de cacos de vidro está fortemente relacionado com os custos das matérias-primas para a fusão do vidro. Em geral, os insumos necessários para a produção de vidro são relativamente abundantes, uma vez que provêm de fontes naturais. No entanto, há uma exceção significativa: a barrilha. Esta representa mais de 60% dos custos com matérias-primas, apesar de corresponder a apenas 15% do volume total utilizado. Esse alto custo se deve ao fato de que o carbonato de cálcio, que compõe a barrilha, é importado, já que o único produtor nacional, a Companhia Nacional de Alcális, está inativa desde 2006 (BNDES, 2007).

Para entender a economia de recursos proporcionada pela utilização de cacos de vidro, é útil considerar os custos das matérias-primas. Utilizando os valores dos insumos apresentados por Maccari et al. (2019) e o preço de venda de cacos mistos conforme descrito por Sabião et al. (2015), foi elaborada a tabela a seguir que ilustra os custos totais relacionados à produção de artigos de vidro.

Tabela 2: 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 (2024)

Com base nos valores apresentados, é possível observar que a cada tonelada de caco reintegrado ao processo de produção de vidro resulta em uma economia aproximada de 700 R\$, o que representa uma redução de 78% no custo unitário da tonelada de vidro novo. Para um forno vidreiro com capacidade de produção de 150 toneladas de vidro por dia e que utiliza 60% de caco em seu processo, a economia diária pode atingir cerca de 63 mil reais, somando aproximadamente 22 milhões de reais anuais em redução de custos.

Entretanto, é importante notar que essas estimativas são preliminares e não consideram custos adicionais relacionados à caracterização do caco, beneficiamento adicional ou outras despesas associadas à substituição de matéria-prima por vidro reciclado. Portanto, é fundamental realizar uma análise econômica mais detalhada para obter uma estimativa precisa dos custos e benefícios relacionados ao uso de cacos.

Apesar disso, os números demonstram claramente as vantagens econômicas da reciclagem de vidro na indústria. Além da redução nos custos de energia e aquisição de matérias-primas, a utilização de caco também contribui para a diminuição do custo unitário total do vidro ao longo de seu ciclo de vida. Isso ocorre porque a reincorporação de embalagens recicladas reduz a necessidade de extração de matérias-primas, resultando em menores custos associados a essas atividades.

Além das vantagens econômicas, a sustentabilidade a longo prazo da indústria de garrafas de vidro depende fortemente da reciclagem para enfrentar futuros cenários de escassez de recursos. Os principais insumos para a fabricação de vidro, como a barrilha e o gás natural, são altamente dependentes de importação, o que os torna vulneráveis às flutuações do mercado externo e do câmbio do dólar. Crises econômicas podem levar à escassez desses recursos, destacando a importância da criação de um sistema de logística reversa eficiente e bem estruturado.

Portanto, a construção de uma cadeia reversa robusta é crucial para garantir a redução de custos e a sustentabilidade da indústria vidreira. Embora o investimento inicial para estabelecer uma cadeia reversa funcional seja elevado, os benefícios a

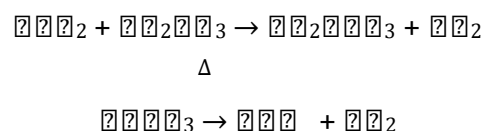
longo prazo, tanto em termos de economia de custos quanto de sustentabilidade, tendem a justificar o investimento.

5.2. Análise da utilização de caco no processo de fusão

A produção de garrafas de vidro é um processo que exige um alto consumo energético, principalmente devido às elevadas temperaturas necessárias para a fusão e condicionamento do vidro, que podem ultrapassar 1600°C. Essa demanda por energia resulta da necessidade de manter temperaturas extremamente altas para derreter a mistura de matérias-primas, com destaque para a areia (SiO₂), que é a principal substância utilizada na fabricação do vidro. A sílica possui um ponto de fusão de 1710°C, o que requer a adição de outros óxidos para reduzir a temperatura necessária para a fusão.

Apesar da adição desses óxidos, uma quantidade significativa de calor e, portanto, de energia, é necessária para alcançar a temperatura adequada nos fornos de fusão. Segundo estudos de Ruth et al. (1997), entre 55% e 65% da energia total consumida no processo de fabricação de vidro é utilizada nas etapas de fusão e refino da massa vidreira. Portanto, estas etapas são prioritárias para a redução do consumo energético nas instalações de produção.

Além do consumo energético direto, uma parte do calor nos fornos é perdida devido à emissão de gases durante a fusão e o refino. Isso ocorre porque as matérias-primas, que incluem carbonatos como o carbonato de sódio (Na₂CO₃) e o carbonato de cálcio (CaCO₃), são inicialmente introduzidas na forma de carbonatos. Durante o processo de descarbonatação, esses carbonatos se decompõem para formar óxidos, liberando CO₂. Este processo de descarbonatação é ilustrado pelas reações seguintes:



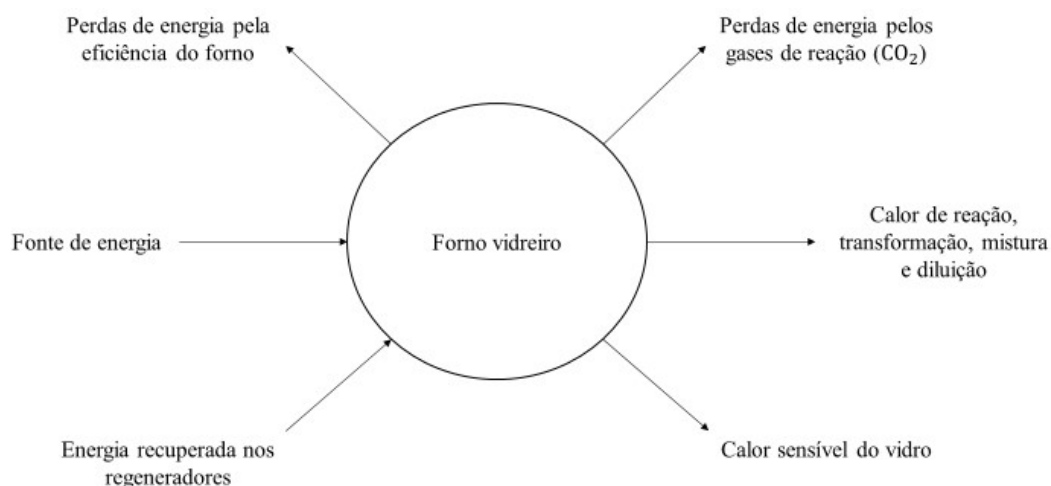
Durante o processo de produção de vidro, o gás carbônico (CO₂) é gerado e liberado na forma de bolhas, que desempenham um papel crucial na homogeneização do vidro fundido dentro do forno. No entanto, essas bolhas também causam a perda

de parte da energia fornecida ao processo, resultando em uma redução na eficiência global da produção e na geração de perdas energéticas (KOVACEC, 2011).

Outra demanda energética significativa nos fornos de vidro é a manutenção da massa fundida a temperaturas elevadas. Esse requisito é necessário para manter o vidro na forma de um "xarope" grosso e avermelhado, facilitando a moldagem das garrafas com a máquina IS e garantindo a produção de artigos de alta qualidade. Portanto, uma parte considerável da energia é empregada para preservar o calor sensível do vidro (KOVACEC, 2011; LOREDO et al., 1968).

Adicionalmente, os fornos de fusão modernos têm uma eficiência energética relativamente baixa quando se considera o processo como um todo. Estudos mostram que apenas cerca de 50% da energia fornecida aos reatores é efetivamente aproveitada. Portanto, as plantas de fabricação têm potencial para reduzir essas grandes perdas de eficiência, por exemplo, através da implementação de regeneradores de calor (MAIA, 2003). A seguir, é apresentado um diagrama que ilustra o balanço energético nos fornos vidreiros.

Figura 32: Balanço de energia simplificado para fornos vidreiros



Fonte: Adaptado de Loredo et al (1986)

Toda a elevada demanda energética nos fornos de vidro é atendida principalmente pelo uso de gás natural como fonte de combustível. O gás natural é preferido nas fábricas de vidro devido às suas vantagens, que incluem uma queima mais uniforme, melhor controle das variáveis do processo, manutenção mais eficaz dos queimadores e menores taxas de emissão de poluentes em comparação com outros combustíveis (MAIA, 2003).

Adicionalmente, alguns fornos de vidro utilizam eletricidade como apoio energético para complementar o fornecimento de energia necessário e para obter uma troca térmica mais uniforme. Esse suporte elétrico é realizado por meio de sistemas chamados Boostings, que introduzem eletricidade no processo, estabilizando melhor a temperatura e aumentando a capacidade de produção dos fornos (BNDES, 2007; MAIA, 2003).

Dada a necessidade significativa de energia, a indústria vidreira investe em pesquisas para reduzir o consumo energético nos fornos. Além das considerações de sustentabilidade associadas às fontes de energia, o alto custo do gás natural e da eletricidade representa um gasto significativo para a operação dos fornos (PEREIRA, 2015).

Uma das principais práticas para reduzir o consumo energético é a incorporação de cacos de vidro na mistura a ser fundida. A reciclagem de vidro, utilizando tanto cacos originados de rejeitos internos da planta quanto vidro pós-consumo, é amplamente aplicada. Fornos de vidro podem utilizar com sucesso até 85% de cacos na produção, sendo que a maioria das plantas opera com porcentagens variando de 30% a 70% do volume total inserido no forno.

A inclusão de cacos de vidro oferece benefícios significativos no processo de fusão. Como a fusão de cacos reciclados não exige energia para a reação endotérmica necessária para derreter areia e óxidos adicionais, a utilização de cacos permite operar os fornos a temperaturas mais baixas e reduz o tempo necessário para a fusão. Isso resulta em uma menor demanda de energia térmica e maior eficiência dos fornos.

Além disso, o uso de cacos diminui a geração de CO₂, uma vez que não há reação de descarbonatação das matérias-primas brutas. Sem a formação de bolhas de CO₂, a energia que seria perdida é preservada no processo de produção da massa vidreira (KOVACEC, 2011; LOREDO et al., 1968; RUTH et al., 1997).

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

Tabela 3: Economia 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

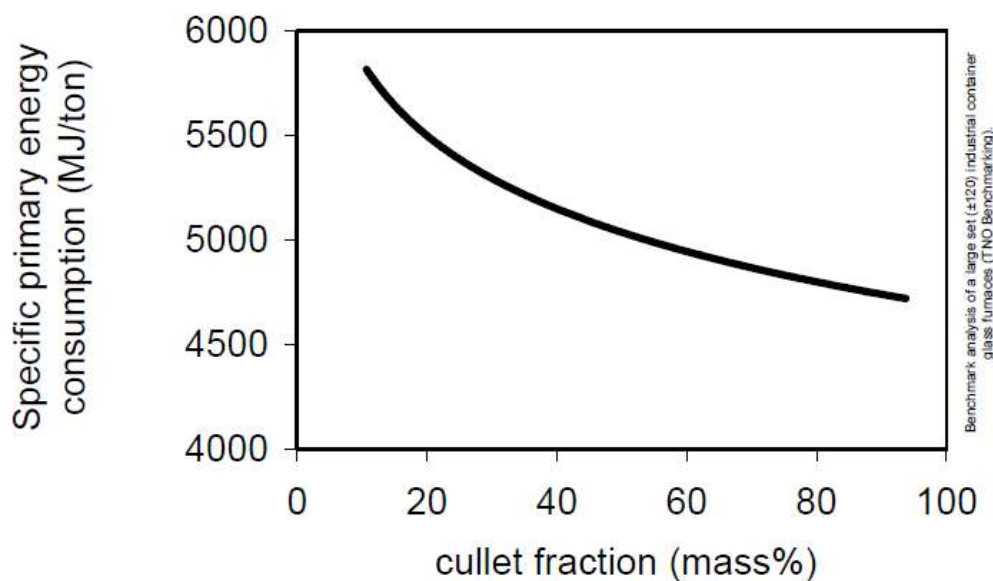
FONTE: Adaptado de Kovacec (2011)

Observa-se que a incorporação de cacos de vidro pode resultar em uma economia de até 30% no processo de fusão e refino do vidro, conforme indicado pelos estudos de Deng et al. (2019). Além disso, ao considerar todas as necessidades energéticas envolvidas nos fornos de vidro, a utilização de cacos pode reduzir o consumo energético total em até 25%, focando apenas na manutenção das reações dentro dos fornos vidreiros.

No entanto, devido à inviabilidade de produzir novos artigos de vidro exclusivamente a partir de cacos, o estudo de Kovacec (2011) revela que substituir 10% das matérias-primas virgens por vidro fragmentado pode reduzir o consumo energético em 2,5% a 3,3%. Esse dado é corroborado pela Abividro (2019), que

promove a reincorporação de cacos no processo produtivo de garrafas de vidro para otimizar a eficiência energética. A imagem a seguir ilustra a relação entre a economia de energia e o aumento na utilização de cacos de vidro.

Gráfico 3: Relação entre energia de fusão (em MJ/kg de vidro) e % de caco em fornos



Fonte: CelSian (2024)

É importante ressaltar que a redução da temperatura dos fornos não só diminui o consumo energético, mas também prolonga a vida útil dos fornos e reduz os custos de manutenção. Temperaturas mais baixas e controladas diminuem o desgaste do refratário dos fornos, resultando em menor deterioração das estruturas. Como consequência, há uma melhora na eficiência das trocas térmicas e uma extensão do tempo de operação dos fornos, além de uma economia nos custos de manutenção (MAIA, 2003).

No entanto, os benefícios da utilização de cacos de vidro nos fornos dependem fortemente da qualidade do material reciclado. Altos níveis de impureza podem afetar os parâmetros do processo e a compatibilidade dos fragmentos de vidro com a composição do vidro produzido. Portanto, é essencial ter um sistema de logística

reversa bem regulamentado e estruturado, que garanta a captação e o beneficiamento adequados dos cacos, para atender às exigências de qualidade e maximizar os benefícios para a indústria vidreira.

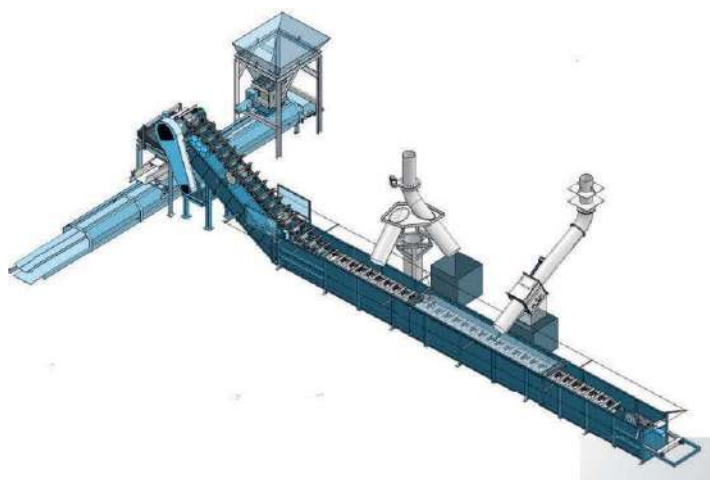
5.3. Análise da utilização de caco para a qualidade das embalagens

A reintegração de fragmentos de vidro na produção de novas garrafas exige, como etapa essencial, o tratamento adequado do material coletado. De acordo com a definição da Conama (2002), o tratamento envolve um conjunto de operações e processos pelos quais os resíduos são submetidos antes de sua utilização como matéria-prima ou produto final. No caso dos resíduos de vidro, o tratamento inclui atividades como lavagem, separação por granulometria e magnetismo, trituração, aspiração e separação por cor dos materiais recolhidos (MAIA, 2013).

A complexidade da estrutura necessária para o tratamento dos fragmentos de vidro varia conforme a origem do material a ser processado. O estudo realizado pelo Instituto de Tecnologia de Alimentos (2019) categoriza esses resíduos de vidro em três principais grupos com base em sua procedência: resíduos provenientes do mesmo tipo de vidraria e forno; resíduos do mesmo tipo de vidraria, mas de forno diferente; e resíduos de origem desconhecida, também conhecidos como pós-consumo.

Para os dois primeiros grupos, os fragmentos de vidro coletados são originários da própria vidraria que irá reintegrar o vidro no processo produtivo. O vidro rejeitado na área quente resulta de paradas na IS Machine, que podem ser programadas, como a troca de produtos ou manutenção preventiva, ou não programadas, como substituição de moldes devido a problemas de qualidade ou falhas nos equipamentos. Esse vidro, que ainda não passou pelo processo de formação da garrafa, é encaminhado para um sistema de coleta através de calhas e transportadores resfriados por água, devido às altas temperaturas. O material vítreo é então processado por um sistema de raspadores, conhecidos como *scraper*, que fragmenta o vidro em pedaços menores. Após essa etapa, o vidro é submetido a novas fases de trituração antes de ser reincorporado à matéria-prima. Esse sistema chamado *scraper* pode ser visto abaixo.

Figura 33: Sistema de *scraper* de rejeito de vidro de área quente



Fonte: ZIPPE (2021)

O vidro rejeitado na área fria é geralmente oriundo dos sistemas de inspeção de qualidade, que podem incluir tanto máquinas quanto inspeção manual. Todos os artigos que não atendem aos requisitos de qualidade estabelecidos pela vidreira são descartados e direcionados para a transformação em caco, que será utilizado nos fornos. Essa coleta é realizada por sistemas de esteiras e transportadores, podendo ser finalizada em caçambas de armazenamento ou enviada diretamente para britadores e trituradores, que ajustam a granulometria do material para sua incorporação à matéria-prima usada na produção da massa vidreira.

A principal vantagem de utilizar esse caco é o conhecimento exato de sua composição química, uma vez que ele provém do próprio forno em que será reincorporado. Além disso, não é necessário um sistema de transporte externo para o funcionamento desse processo. Contudo, a quantidade de caco gerado é relativamente pequena em fábricas com alta produtividade, tornando necessária a complementação com vidro obtido através de canais reversos.

O tratamento de fragmentos de vidro provenientes da própria vidraria é relativamente simples, pois a fábrica já conhece a composição química do material recolhido. Portanto, apenas a trituração dos vidros, sejam inteiros ou quebrados, é necessária para reduzir a granulometria dos fragmentos antes que sejam reincorporados ao processo de fabricação. Isso facilita a mistura com a nova matéria-prima que será fundida. No entanto, para vidro oriundo de outros fornos, é fundamental considerar a composição do vidro incluído no processo para ajustar a composição química da matéria-prima bruta utilizada (MAIA, 2013; JAIME, 2019).

Os fragmentos de vidro de origem desconhecida, por sua vez, são obtidos através da coleta de vidro pós-consumo em sistemas de logística reversa. Devido à variedade de procedências desses fragmentos, é necessário realizar uma análise da composição química para adequar o material ao processo de fabricação da fábrica. Além disso, o sistema de logística reversa ainda não garante a obtenção de vidro de alta qualidade, o que pode resultar na presença de impurezas orgânicas e inorgânicas.

A presença significativa de impurezas no vidro coletado por meio de logística reversa exige sistemas de beneficiamento mais sofisticados. O processo de fabricação de vidro demanda que os fragmentos incorporados tenham alta qualidade, ou seja, poucos contaminantes, pois cada tipo de impureza pode gerar diferentes dificuldades técnicas na produção das garrafas (MAIA, 2013).

Por exemplo, grandes quantidades de matéria orgânica podem alterar o equilíbrio redox durante a fusão da matéria-prima, resultando em problemas de refino e variações na cor final do vidro. Impurezas metálicas e ligas metálicas também podem causar variações na cor e aumentar o desgaste dos refratários do forno, reduzindo sua vida útil. O excesso de alumínio pode causar “bolhas de silicone” devido à redução de SiO_2 em Si. Partículas refratárias, como porcelanas e cerâmicas, não se fundem devido às suas altas temperaturas de fusão, gerando defeitos de inclusão nas garrafas e reduzindo sua resistência mecânica (MAIA, 2013; JAIME, 2019).

Figura 34: Impureza cerâmica no corpo da garrafa

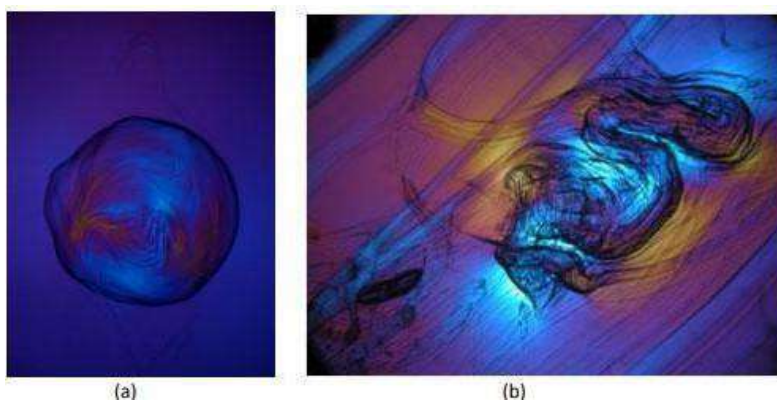


Fonte: Autoria própria (2024)

Além dos contaminantes metálicos e orgânicos presentes nos fragmentos de vidro, é importante considerar que vidros com diferentes composições químicas também atuam como impurezas significativas e podem afetar a qualidade dos produtos. Vidros destinados a aplicações específicas, como aqueles usados em laboratórios, possuem uma composição de matéria-prima diferente da utilizada na produção de embalagens. Portanto, esses vidros não devem ser reintegrados ao processo de fabricação de garrafas.

A inclusão de vidro de borossilicato, por exemplo, em fornos destinados à produção de embalagens pode resultar em inclusões e defeitos conhecidos como “defeitos de corda”. Esses defeitos ocorrem devido às diferenças nas temperaturas de fusão entre os tipos de vidro, criando pontos de estresse heterogêneos na massa vidreira (JAIME, 2019). Abaixo, uma imagem microscópica ilustra a heterogeneidade causada por inclusões vítreas e defeitos de corda em vidro.

Figura 35: Inclusão vítrea (a) e defeito de corda (b) visualizadas por microscópio ótico



Fonte: Jaime (2019)

Outro aspecto importante do uso de caco de vidro externo após o beneficiamento no processo de produção de embalagens remete a coloração desse caco. Normalmente, o caco que é direcionado para as usinas de processamento não passa por um processo de segregação de acordo com sua cor, constituindo uma mistura que é enviada para as fábricas de vidro. Vidro verde, âmbar e branco, que são os mais comumente encontrados no mercado brasileiro, possuem, além das diferenças provenientes dos aspectos químicos causados por suas origens serem distintas, a característica preponderante que confere a eles a cor diferente: o teor de ferro.

Vidros de coloração branca, ou flint, geralmente possuem um teor de ferro que fica abaixo de 0,1%, enquanto o caco verde possui 0,4% e o caco âmbar apresenta 0,5%. Tendo isso em mente, a quantidade que cada caco de cada uma dessas colorações possui, considerando o quantitativo total a ser usado no forno de vidro, pode determinar o sucesso ou o fracasso de uma produção. Caso o objetivo seja produzir um vidro branco, adicionar vidro verde ou âmbar, mesmo que em quantidades bem pequenas, causa uma interferência bastante brusca no controle do processo e na coloração do vidro. É esperado, para esses casos, que o forno passe por um processo semelhante ao que ocorre num primeiro momento de uma transição de cor: a coloração do vidro tende a escurecer e, pela quantidade consideravelmente maior de ferro, o vidro tende a borbulhar devido a interação entre os vidros de diferente faixa de redox. Isso confere ao banho o aspecto de espuma, o que isola o vidro que está submerso do calor da superfície e, em casos mais graves, pode causar o “congelamento” do forno e a sua inutilização. A imagem abaixo exemplifica um forno com espuma em sua superfície.

Figura 36: Vista de um forno com espuma.



Fonte: Autoria própria (2023)

Em contrapartida, vidros verde e âmbar permitem que essa contaminação ocorra de forma menos impactante. Normalmente, essas colorações aceitam algo na faixa de 15 a 20% de caco de colorações diferentes da objetiva, justamente por já apresentarem um teor de ferro superior. A tabela abaixo descreve os tipos de misturas de cores de caco que são aceitas pelo vidro sem causar impacto em performance.

Figura 37: Possibilidades de mistura de caco

		CACO		
		FLINT	VERDE	AMBAR
P R O D U T O	FLINT	SIM	NÃO	NÃO
	VERDE	SIM	SIM	SIM
	AMBAR	SIM	SIM	SIM

Fonte: CelSian (2024)

6. Conclusão

O crescimento e a consolidação das embalagens de vidro na indústria alimentícia, junto com a tendência atual de utilização de garrafas de uso único,

destacam a necessidade de desenvolver uma estrutura de reciclagem capaz de lidar com o volume de resíduos gerados por esse setor. A reintegração de cacos de vidro no processo produtivo surge como uma alternativa sustentável, tanto do ponto de vista ecológico quanto financeiro. Essa prática oferece benefícios significativos para a indústria, como a redução do consumo de energia e de matérias-primas, e para a sociedade como um todo, promovendo a conservação de recursos e a diminuição do impacto ambiental.

A estrutura atual de logística reversa de vidro precisa de uma reorganização para melhorar a eficiência. As quantidades e a qualidade do caco retornado à indústria vidreira frequentemente não atendem aos requisitos necessários para um aproveitamento efetivo e benéfico.

As vantagens energéticas, ecológicas e econômicas da reciclagem de cacos de vidro são parcialmente limitadas pelo sistema atual. A baixa cobertura da logística reversa no país resulta em um uso reduzido de cacos nas fábricas, e a baixa qualidade desse material, frequentemente contaminado, provoca problemas operacionais nos fornos. Como resultado, os benefícios potenciais não são plenamente aproveitados. Por exemplo, a introdução de apenas 10% de caco nos fornos pode levar a uma redução de 3% no consumo de energia e gerar uma economia diária superior a 10 mil reais, além de diminuir a dependência de matérias-primas importadas e reduzir os custos de manutenção dos fornos vidreiros. Hoje, por conta dessa deficiência múltipla que o sistema de reciclagem de caco possui, fornos de vidro não produzem com teor de reciclados acima dos 85%.

É importante destacar que o presente trabalho foi conduzido utilizando uma pesquisa exploratória baseada em métodos bibliográficos e documentais. Assim, as análises realizadas durante a elaboração do estudo são limitadas a dados preliminares e não incluem um estudo de caso prático ou evidências empíricas.

7. Referências

AB InBev: **Advanced Glass Course** by Celsian Glass & Solar BV, 2024. Acesso em 26 de jun. de 2024.

AB InBev. **Parâmetros de controle de cor**. Rio de Janeiro, 2022. Acesso em 27 de jun. 2024.

AKERMAN, Mauro. **Introdução ao Vidro Plano e sua Produção**. Escola do Vidro, mai. 2013. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3276493>. Acesso em 28 de jun. 2024.

AKERMAN, Mauro. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro), nov. 2000. Disponível em: https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut_Prop_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf. Acesso em 28 de mai. 2024.

ALVES, Luiz Oswaldo et al. Vidros. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, mai. 2001. Disponível em:

<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/02/vidros.pdf>. Acesso em mai de nov. 2024.

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

Ambev mostra que garrafas retornáveis são a melhor opção para o bolso e meio ambiente. Boteco e Cerveja. Disponível em:

<https://www.botecoecerveja.com.br/2023/05/ambev-mostra-que-garrafas-retornaveis-sao-a-melhor-opcao-para-o-bolso-e-meio-ambiente/>. Acesso em 28 de mai. 2024.

ARAUJO, Borges de Eudes. **Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 325-329, set. 1997. Disponível em:

<https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19a34.pdf>. Acesso em 28 de mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Guia de Reciclagem do Vidro**. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/>>. Acesso em: 27/07/2024.

BAINO, Francesco et al. **Ceramics, Glass and Glass-Ceramics: From Early Manufacturing Steps Towards Modern Frontiers**. Turim, Itália: Editora Springer, 2021. Disponível em: https://cloudflare-ipfs.com/ipfs/bafykbzacedjzfhhabnp766zeyx2jkeqjuuq3sl2femqcgghlqcltn2f5qawn2?filename=%28PoliTO%20Springer%20Series%29%20Francesco%20Baino%2C%20Massimo%20Tomalino%2C%20Dilshat%20Tulyaganov%20-%20Ceramics%2C%20Glass%20and%20Glass-Ceramics_%20From%20Early%20Manufacturing%20Steps%20Towards%20Modern%20Frontiers-Springer%20%282021%29.pdf. Acesso em 28 de mai. 2024.

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: 21/07/2024

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: 27/07/2024.

BOURHIS, Le Eric. **Glass Mechanics and Technology**. Weinheim, Alemanha: Editora Wiley-VCH, 2014. Disponível em: https://cloudflare-ipfs.com/ipfs/bafykbzacecjzqbktosbpaf2u3rpcrtx2tngxafpgpeardxoxw5jjek7dye6e?filename=Eric%20Le%20Bourhis%20-%20Glass_%20Mechanics%20and%20Technology-Wiley-VCH%20%282014%29.pdf. Acesso em 28 de mai. 2024.

CERVBRASIL. **Associação Brasileira da Indústria da Cerveja**. Anuário 2016. 2016.

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.

COSTA, Isabelle. **A química do vidro**. Rio de Janeiro, 2023. Acesso em 27 de mai. 2024.

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.

CRUZ, L.A. **Logística Reversa e Diminuição de Consumo Energético na Produção de Garrafas de Vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021, Rio de Janeiro.

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.

Dispersão da Luz e as Cores do Céu. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/dispersao-luz-as-cores-ceu.htm>. Acesso em 28 de mai. 2023.

DURELLO, S. Renato et al. **Química do Lúpulo**. Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, São Paulo, v. 42, n. 8, p. 900-919, set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/YmTGmBMCbC7Yr7fdPGWm6tf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 28 de mai. 2024.

DREYER, Diogo. **Como as cores das garrafas influenciam no sabor das cervejas?** Gazeta do Povo, 26 nov. 2021. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/bomgourmet/produtos-ingredientes/marrom-verde-ou-transparente-como-a-cor-da-garrafa-influencia-a-cerveja/>. Acesso em 28 de mai. 2024.

EKPO, Kelechukwu. **Glass Bottle Manufacture**. Ogun, Nigéria. Disponível em: https://www.academia.edu/22238294/GLASS_BOTTLE_MANUFACTURE. Acesso em 28 de mai. 2024.

Entenda como funciona a nova tendência de bebidas em lata. Conaq. Disponível em: [https://conaq.com.br/entenda-como-funciona-a-nova-tendencia-de-bebidas-em-lata/#:~:text=Segundo%20a%20Abralatas%20\(Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira,18%2C3%20bilh%C3%B5es%20de%20reais](https://conaq.com.br/entenda-como-funciona-a-nova-tendencia-de-bebidas-em-lata/#:~:text=Segundo%20a%20Abralatas%20(Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira,18%2C3%20bilh%C3%B5es%20de%20reais). Acesso em 28 de mai. 2024.

EPE/MME, **Balanço 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.

FELISBERTO, Camila Benini. **Rendimento e cor de selênio e seus compostos na coloração de vidros sodo-cálcicos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042007-141556/pt-br.php>. Acesso em 28 de mai. 2024.

FERNANDES, Furtado Raphael. **Sistema de logística reversa de embalagens de vidro: as alternativas de reúso e reciclagem de garrafas para pequenas**

cervejarias. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/232802/TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 28 de mai. 2024.

FERNANDES, V. O. **Controle de Manutenção Aplicado À Indústria Vidreira.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FIOROTTO, R. Nilton. **Entendendo o espaço da cor L*a*B*.** Senai Brás. São Paulo. Disponível em: <https://textil.sp.senai.br/5287/entendendo-o-espaco-de-cor-l-a-b>. Acesso em 28 de mai. 2024.

GIACOMINI, Eliana. Material: **O Vidro.** Mestrado em Construções de Edifícios – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, entre 2008 e 2014. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~vpfreita/mce04008_O_vidro.pdf. Acesso em 28 de mai. 2024.

GIACON, Nascimento Mariana. **Análise do ciclo de vida de vasilhames de cerveja utilizando o software CES Edupack.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/d915b4f2-eda0-4184-9e59-15977a7ad50f/MARIANA%20NASCIMENTO%20GIACON_TF.pdf.

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: 20/07/2024.

HESS, Cristiane. **Embalagem de vidro.** Material de aula. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Acesso em 27 de mai. 2024.

JAIME, Sandra et al. **Barreira à Luz de embalagens de vidro.** Informativo, Instituto de tecnologia de alimentos, vol. 30, nº2. Junho, 2018. Disponível em:<

https://www.ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v30n2/artigos/v30n2_artigo3.pdf>. Acesso em: 25 de mai. de 2024.

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.l.]: CETEA, 2009.

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.

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

MARTINS, João Guerra & PINTO, Emanuel Lopes. **O Vidro: série de materiais**. 1º Ed. 2004. Disponível em:< www.ufp.pt/~jguerra/pdpconstrucoes/vidros.>

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 DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Anuário da cerveja**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/anuario-da-cerveja-2022/view>>. Acesso em 25/07/2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural**. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes->

1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural. Acesso em 25/07/2024.

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: 21/07/2024

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, E. James. **Introduction to Glass Science and Technology**. Nova Iorque, Estados Unidos: Editora Royal Society of Chemistry, 1997. Disponível em: <https://belglas.files.wordpress.com/2021/01/shelbyj.e.introductiontoglassscienceandtechnology2nded.rsc20050854046399.pdf>. Acesso em 28 de mai. 2024.

SILVA, B. E. Richard. **Introdução à preparação das matérias-primas e funcionamento de um forno regenerativo de queima cruzada de vidro float**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de Lorena, São Paulo. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2017/MEM17012.pdf>. Acesso em 28 de mai. 2024.

TEIXEIRA, Vieira Tavares Flaviana; ARAÚJO, Wilson de Sérgio. **Tintas e suas aplicações: Conceitos, tecnologias e possibilidades**. Diamantina, Minas Gerais: Editora UFVJM, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Flaviana->

Vieira-

2/publication/359124452_TINTAS_E_SUAS_APLICACOES_Conceitos_Tecnologias_e_Possibilidades/links/6229525f3c53d31ba4b5c5d1/TINTAS-E-SUAS-APLICACOES-Conceitos-Tecnologias-e-Possibilidades.pdf#page=78. Acesso em 28 de mai. 2023.

VERALLIA. **Processo de fabricação**, 2021. Disponível em: <https://pt.verallia.com/o-vidro/processo-e-fluxograma-em-imagens>. Acesso em: 21/07/2024.

VIDROPORTO. **Usina de Beneficiamento de Caco**, 2021. Disponível em: <<https://vidroporto.com.br/usina-de-beneficiamento-de-caco.php>>. Acesso em: 27/07/2024.

WOOD, Ada. **Why beer bottles are usually brown glass**. CNN, 6 de abr. 2022. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2022/04/06/health/brown-beer-bottle-skunking-scn/index.html#:~:text=When%20hops%20in%20beer%20are,in%20brown%20glass%20bottles%20today>. Acesso em 28 de mai. 2024.

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

ZANOTTO, D. Edgar et al. **The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate**. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 471, p. 490-495, set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309317302685?via%3Dihub>. Acesso em 28 de mai. 2024.

ZIPPE. **Brochure Glass Recycling**. 2021. Disponível em: <https://www.zippe.de/en/glass-recycling/>. Acesso em: 27/07/2024.