

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Especialização em Saneamento e Meio Ambiente
Área de Concentração Controle Ambiental na Indústria

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS: BENEFÍCIOS E
LIMITAÇÕES. UM ESTUDO SOBRE A SITUAÇÃO ATUAL EM
TORNO DO GERENCIAMENTO DESTES RESÍDUOS NO
MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**

IGOR ULHOA SANTIAGO

Belo Horizonte

2011

Igor Ulhoa Santiago

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS: BENEFÍCIOS E
LIMITAÇÕES. UM ESTUDO SOBRE A SITUAÇÃO ATUAL EM
TORNO DO GERENCIAMENTO DESTES RESÍDUOS NO
MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Saneamento e Meio Ambiente, Área de Concentração: Controle Ambiental na Indústria da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista.

Área de Concentração: Controle Ambiental na Indústria.

Orientador: Professora Dra. Liséte Lange.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2011

“O Homem é o exercício que faz.”

Raul Santos Seixas.

DEDICATÓRIA

*Em memória das minhas queridas Vóinha e Vó Joaninha,
que deixaram infinitas saudades.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Mara, pelo exemplo, pelas constantes discussões sobre assuntos de interesse mútuo na área ambiental, pelo interesse, ajuda e apoio em todos os momentos.

Ao meu pai Guga, pelo exemplo, compreensão e por me apoiar incondicionalmente.

Aos meus irmãos Dundi, Guti, Soso e Gui pela amizade, descontrações e por me conceder o prazer de viver ao lado deles.

À Lili, pelo companheirismo, amor, e por sempre acreditar em mim e estar ao meu lado nas situações mais difíceis.

Ao meu avô José, exemplo de vida, pela amizade e carinho.

À Professora Doutora Liséte Lange por ser minha orientadora e pelos ensinamentos e discussões neste período.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a situação da coleta e destinação final dos resíduos vítreos do município de Belo Horizonte, de forma a identificar os pontos positivos, as limitações e possíveis oportunidades de melhorias. Para tal, foram realizadas diversas pesquisas na literatura nacional e internacional, além de visitas a fundações estaduais, privadas, e associações que desenvolvem atividades nesta área. No trabalho desenvolveu-se ainda uma breve revisão de literatura, buscando-se retratar a situação da reciclagem de resíduos vítreos em outros países, de forma a verificar os respectivos graus de desenvolvimento e tecnologias utilizadas. Foi constatado que a situação de Belo Horizonte é extremamente crítica. A maior parte do vidro de embalagens é enviada ao aterro diretamente pelos caminhões da coleta convencional, ou por intermédio das cooperativas, que recebem material da coleta seletiva, mas não encontram mercado para a comercialização dos mesmos. Uma pequena parcela é reutilizada por produtores artesanais, e outra enviada a indústrias do Estado de São Paulo para reprocessamento.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Vítreos, Reciclagem, Gerenciamento.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the situation of collection and final disposal of vitreous waste from the city of Belo Horizonte, in order to identify the strengths, limitations and potential opportunities for improvement. To this end, several studies were performed in national and international literature, as well as visits to state and private foundations, and associations that develop activities in this area. In the work has developed a brief literature review, seeking to portray the situation of vitreous waste recycling in other countries, in order to check their levels of development and technologies used. It was found that the situation in Belo Horizonte is extremely critical. Most of the glass packaging is sent to the landfill directly by conventional collection truck, or through cooperatives, which receive material from selective collection, but find no market for the sale thereof. A small portion is reused by artisan producers, and sent to other industries in the State of São Paulo for reprocessing.

KEY-WORDS: Vitreous Waste, Recycling Management.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
Al_2O_3	Alumina
ASMARE	Associação dos Catadores do Papel Papelão e Material Reaproveitável
As_2O_3	Óxido de Arsênio
B_2O_3	Óxido Bórico
BaO	Óxido de Bário
CaO	Cal
CEMPRE	Compromisso Empresarial Para a Reciclagem
CMRR	Centro Mineiro de Referência em Resíduos
COPEMAR	Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis da Região Oeste de Belo Horizonte
CO_2	Gás Carbônico
Co_2O_3	Óxido de Cobalto
CuO	Óxido Cúprico
Cu_2O	Óxido Cuproso
Fe	Ferro
GeO_2	Óxido de Germânio
GJ	Gigajoule
GPI	Glass Packaging Industry
H_2O	Água
K_2O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
MP	Material Particulado
N_2	Nitrogênio

Na ₂ O	Óxido de Sódio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
PbO	Óxido de Chumbo
PH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
S	Enxofre
Sb ₂ O ₃	Óxido de Antimônio
Se	Selênio
SiO ₂	Sílica
SLU	SUPERINTENDÊNCIA de Limpeza Urbana
SO _x	Óxidos de Enxofre
T	Toneladas
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

FIGURAS

Figura 1 Efeitos dos Colorantes no Vidro	15
Figura 2 Recipientes de Vidros Coloridos.....	16
Figura 3 Defeitos na Fabricação do Vidro.....	26
Figura 4 Relação da Reciclagem do Vidro e Consumo de Energia.....	30
Figura 5 Relação entre Coleta Seletiva, % de Reciclagem e Energia Consumida	31
Figura 6 Variação do consumo de energia em relação à distância	31
Figura 7 Comparação Emissões Atmosféricas	33

TABELAS

Tabela 1 Composições do Vidro	14
Tabela 2 Composições Típicas de Vidros Alcalinos	18
Tabela 3 Composições Típicas Boro-Silicatos	19
Tabela 4 Consumo e Percentual de Reciclagem do Vidro	20
Tabela 5 Equilíbrio dos NOx.....	24
Tabela 6 Típicos Padrões de Qualidade	27
Tabela 7 Coleta Seletiva por Material (toneladas)	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS.....	8
3 METODOLOGIA	9
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS E PROPRIEDADES DO VIDRO	10
4.1 <i>As Matérias Primas do Vidro</i>	11
4.1.1 <i>Vitrificantes</i>	12
4.1.2 <i>Fundentes</i>	13
4.1.3 <i>Estabilizantes</i>	13
4.1.4 <i>Afinantes</i>	14
4.1.5 <i>Colorantes</i>	14
4.1.6 <i>Cacos</i>	17
4.2 <i>Principais Tipos de Vidro</i>	17
4.2.1 <i>Vidro Alcalino</i>	17
4.2.2 <i>Vidro Chumbo</i>	18
4.2.3 <i>Vidro Boro-Silicato</i>	18
5 RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS	20
5.1 <i>Benefícios da Reciclagem do Vidro</i>	21
5.1.1 <i>Emissões Atmosféricas</i>	23
5.2 <i>Limitações na Reciclagem do Vidro</i>	25
5.3 <i>Análises de Viabilidade na Reciclagem do Vidro</i>	27
6 LOGÍSTICA REVERSA	32
7 RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS EM BELO HORIZONTE	35
8 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E INTERNACIONAL	38
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento correto dos resíduos sólidos urbanos é um desafio para a sociedade atual, tendo em vista o crescimento desenfreado da população mundial, que faz com que cresça proporcionalmente os resíduos gerados pela mesma. Atualmente o Brasil envia para os aterros bilhões de toneladas mensais de resíduos, sendo que grande parte dos mesmos poderiam ser reaproveitados.

O vidro é um material com características únicas. Não é biodegradável, é estável a altas temperaturas, o que possibilita sua higienização sem desconformação da embalagem. Se reciclado, com um quilo de vidro (cacos) produz-se outro quilo de vidro (embalagens) sem perdas, mas com diversos ganhos econômicos e ambientais. Suas matérias primas são de diversas composições, na sua maioria, abundantes, possuindo baixo valor econômico, o que facilita a produção e dificulta a reciclagem, tendo em vista o baixo valor agregado aos resíduos.

O Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, utilizando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Parte deles foi gerada como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta seletiva. Em 2009, o setor faturou cerca de 1,5 bilhões de reais. Nos EUA, o índice de reciclagem em 2009 foi de 40%, correspondendo a 2,5 milhões de toneladas. A Alemanha reciclou 81% no mesmo período, correspondendo a 2,2 milhões de toneladas (CEMPRE,2011).

No Brasil, e mais especificamente em Belo Horizonte, há uma carência de legislações sobre o assunto. As indústrias não são responsabilizadas pelos resíduos gerados e o poder público deixa o problema a cargo das cooperativas, que recebem os materiais vítreos e não sabem o que fazer com os mesmos. É necessário que o poder público tome as rédeas do problema e influencie a solução dos problemas, de maneira que aquelas indústrias utilizadoras das embalagens passem a ser responsabilizadas pelos seus resíduos, pois só assim será possível sustentar o desenvolvimento.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Verificar o cenário atual no município de Belo Horizonte no que tange à reciclagem de resíduos vítreos, suas limitações e possibilidades futuras.

Objetivos Específicos

- Verificar as matérias primas da produção do vidro e a influência das mesmas na reciclagem;
- Esclarecer os benefícios ambientais e econômicos da reciclagem do vidro;
- Verificar a situação mundial de reciclagem de resíduos vítreos;
- Comparar a situação de Belo Horizonte a outras localidades na reciclagem de resíduos vítreos.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente estudo buscou-se, inicialmente, dados secundários através de pesquisa na literatura, de forma a obter-se uma caracterização dos seguintes segmentos.

- Dados mundiais e nacionais sobre a reciclagem de resíduos vítreos;
- Tipos de vidros, composições, usos;
- Sistemas de reciclagem de resíduos vítreos;
- Identificação das empresas recicladoras em âmbito nacional e regional.

Tendo desenvolvido a parte introdutória do estudo, foi iniciada uma pesquisa mais específica, focando na situação atual municipal e regional, através das seguintes atividades.

- Visita a cooperativas que recebem os resíduos em Belo Horizonte (Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis da Região Oeste de Belo Horizonte e Associação dos Catadores do Papel Papelão e Material Reaproveitável);
- Obtenção de dados sobre a coleta e destinação final de resíduos vítreos em Belo Horizonte através de visita à SLU;
- Contato com empresas que compram o vidro das cooperativas.

4. CARACTERÍSTICAS GERAIS E PROPRIEDADES DO VIDRO

O vidro é um importante material industrial; suas principais utilizações são em vidraças e em embalagens de alimentos. Resíduos vítreos têm suas origens tanto no meio doméstico (principalmente embalagens) quanto no industrial (principalmente vidro plano). É de grande importância se conhecer profundamente as características e os tipos de vidros existentes, uma vez que nem todos podem ser reciclados (WRAP, 2004).

A maioria dos vidros podem ser considerados como compostos de óxidos, embora seja possível se obter vidros não-óxidos em alguns casos. Os principais óxidos formadores de vidro são: sílica (SiO_2), óxido bórico (B_2O_3) e pentóxido de fósforo (P_2O_5). Quando esses vidro-formadores são combinados com dois ou mais óxidos modificadores e fundentes, como soda (Na_2O), potássio (K_2O), cal (CaO), magnésio (MgO), óxido de bário (BaO), óxido de chumbo (PbO), alumina (Al_2O_3), entre outros, formam estruturas que compreendem a maioria dos vidros comerciais (TOOLEY, 1953).

A definição do estado dos corpos vítreos gera grande discussão, tendo em vista diferenças estruturais e comportamentais em comparação aos três principais estados: sólido, líquido e gasoso.

A respeito do estado vítreo, procede a seguinte afirmativa:

Sob a ampla denominação genérica de vidros ou de corpos vítreos, está compreendida uma grande variedade de substâncias que, embora à temperatura ambiente tenham a aparência de corpos sólidos proporcionada por sua rigidez mecânica, não podem se considerar como tais, já que carecem da estrutura cristalina que caracteriza e define o estado sólido. Se pela estabilidade de sua forma os vidros podem assimilar-se a sólidos, do ponto de vista estrutural suas semelhanças são muito menos evidentes. Este fato que constitui uma limitação para incluir os vidros entre os sólidos, por outro lado resulta insuficiente para autorizar a aceitá-los como líquidos, ainda que possa justificar a designação de líquidos de viscosidade infinita, que em muitas vezes é aplicado (AKERMAN,2000).

Sendo assim, existem diversas definições a respeito do estado dos corpos vítreos, sendo algumas delas citadas a seguir.

Morey (1938) define o vidro como “uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual, porém, como resultado de uma

mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos e rígidos”.

A definição dada por Maia (2003) é que o vidro é um “produto inorgânico resultante de uma fusão que resfriou até um estado rígido sem haver cristalização. Os vidros também podem ser obtidos por deposição de vapores, desde que estes sejam bruscamente resfriados em contato com o substrato aonde irão se depositar”.

Resumindo pode-se dizer que o vidro pertence a um estado particular da matéria conhecido como Estado Vítreo, que tem as seguintes propriedades:

- Ausência de estruturas cristalinas, as substâncias pertencentes ao Estado Vítreo são Amorfas;
- Não tem ponto de fusão definido. O vidro quando é aquecido vai amolecendo até ter sua viscosidade tão reduzida, que se comporta como um líquido;
- O vidro não desvia o plano da luz polarizada quando é por esta atravessado;
- O vidro não é estável a altas temperaturas. Mantido por longo tempo a uma temperatura acima do seu ponto de amolecimento, pode cristalizar. A este fenômeno se dá o nome de Desvitrificação.
- Geralmente transparentes, existindo também os translúcidos e os opacos;
- Mau condutor de calor e eletricidade (MAIA, 2003).

4.1. As Matérias-Primas do Vidro

O principal componente é a sílica (SiO_2). Esta, fundida isoladamente, produziria o vidro ideal para a maior parte das aplicações. No entanto, devido à necessidade de altas temperaturas encontradas para a sua fusão e às dificuldades encontradas para a sua conformação, seu uso limita-se a algumas aplicações especiais (CEMPRE, 2000).

Para reduzir a temperatura de fusão da sílica são utilizados fundentes, sendo o mais comum o óxido de sódio (Na_2O). Como o sistema $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ é solúvel em água, adiciona-se um terceiro componente, óxido de cálcio (CaO), que confere ao vidro a estabilidade química necessária. O vidro, assim obtido, é denominado vidro soda-cal, também chamado de “vidro comum”, que representa 90% de todo o vidro produzido no mundo. Cerca de 90% do vidro soda-cal é constituído de SiO_2 , Na_2O e CaO , apresentando ainda outros óxidos em sua composição. Alguns desses óxidos são provenientes da própria matéria-prima utilizada, como o óxido de ferro (Fe_2O_3), enquanto que outros

são adicionados propositalmente, com intuito de conferir ao produto características específicas. O óxido de alumínio (Al_2O_3), por exemplo, é adicionado para conferir ao vidro resistência ao ataque químico, para inibir a cristalização durante o resfriamento e para controlar a viscosidade, esta última, uma propriedade muito importante em todas as etapas de fusão, conformação e cozimento do vidro (IPT; CEMPRE, 2000).

O óxido de ferro é uma impureza presente na maioria das matérias-primas naturais. Para os vidros incolores de alta qualidade é necessário minimizar a quantidade deste óxido na formulação, devido à sua grande influência sobre a coloração do produto. Para a produção de vidros transparentes de alta qualidade utilizam-se areias com teores de Fe_2O_3 inferiores a 0,01% (IPT APUD ROUSE, 2000).

Conforme descrito, várias são as possibilidades de formação do vidro, existindo diversas categorias que desempenham diferentes papéis na constituição deste material. Desta forma, as matérias-primas podem ser classificadas em grupos conforme a função que desempenham, apresentados a seguir:

4.1.1. Vitrificantes

São aquelas matérias passíveis de se transformar em vidro. Esses são elementos cujos átomos tem tamanho suficiente para serem rodeados por quatro átomos de oxigênio cada um, formando um arranjo tetraédrico, gerando cadeias que podem se dispor aleatoriamente e podem produzir vidros. Conforme citado anteriormente, na grande maioria dos vidros a matéria vitrificante é a sílica ou dióxido de silício, encontrada na natureza livre ou combinada, sendo sua forma mais comum o quartzo. O quartzo alfa é estável a baixas temperaturas, passa a quartzo beta quando aquecido a 573°C . A 870°C passa a tridimita, que a 1470°C passa a cristobalita. A cristobalita funde a 1725°C e quando resfriada se transforma na sílica vítrea, não mais um cristal mas um sólido amorfo (MAIA, 2003).

Maia (2003) cita outros vitrificantes, denominados, pelo mesmo, de vidro-formadores. São eles o óxido de germânio (GeO_2), óxido bórico B_2O_3 e o pentóxido de fósforo (P_2O_5), usados comumente na constituição de vidros especiais utilizados em dispositivos óticos, eletrônicos, dentre outros.

Tooley (1953) ressalta o óxido bórico como um importante vidro-formador, mas apenas como constituinte de vidros silicatos para formar borosilicatos, extremamente importante na manufatura de utensílios resistentes ao calor, recipientes farmacêuticos, e vários outros itens que necessitam de vidros com baixa deformação térmica e grande resistência ao ataque químico. Vidros fosfatados são produzidos em pequenas quantidades para usos especiais como para filtros incolores de radiação infravermelha e ultravioleta, e para resistência a alguns químicos, os quais prontamente atacam vidros silicatos.

4.1.2. Fundentes

A sílica sozinha produz um vidro de ótima qualidade, porém com um inconveniente: necessita de temperaturas extremamente altas para fundir e para poder ser conformado, o que torna o vidro extremamente caro. Para contornar este problema se adicionam matérias-primas fundentes, que apresentam a características de se fundirem a temperaturas muito inferiores à sílica, gerando um líquido que dissolve os grãos de areia, produzindo vidro a temperaturas tecnologicamente compatíveis.

O principal fundente é a barrilha, um carbonato de sódio produzido industrialmente a partir da salmoura ou pela purificação de um mineral chamado trona, conhecida também como barrilha natural (AKERMAN, 2000).

4.1.3. Estabilizantes

Os fundentes tendem a produzir vidros de resistência química precária, requerendo assim a adição de substâncias estabilizadoras. Tooley (1953) cita os óxidos de alumínio, cálcio e magnésio como os principais estabilizantes. O autor cita que a principal fonte de alumina é o feldspato, material composto apenas por substâncias não-voláteis, não havendo assim perdas oriundas de sua utilização. A cal, o estabilizante mais utilizado, é proveniente, na maioria das vezes, do calcário, e a magnésia, da dolomita.

Os principais formadores do vidro e de suas características específicas foram descritos nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 acima. Esses são os constituintes presentes em maiores percentuais, conforme Tabela 1. Cabe ressaltar que esses valores servem apenas para se

ter uma idéia dos percentuais de composição, tendo em vista a enorme variação dependendo do tipo de vidro a ser formado, suas especificidades e utilização.

Tabela 1 Composições do Vidro

	Mínimo (%)	Máximo (%)
Vitrificantes	55	94
Fundentes	1,5	22
Estabilizantes	2	30

Fonte: Tooley, 1953

Os constituintes acessórios, não menos importantes na formação do vidro, são divididos em dois grupos, afinantes e colorantes.

4.1.4. Afinantes

No processo de fusão das matérias primas altas temperaturas são alcançadas, gerando liberação de gases em grandes quantidades. Para afinar, isto é, retirar as bolhas, se acrescenta à composição pequenas quantidades de afinantes, como por exemplo o sulfato de sódio, que possui a propriedade de seliquefazer, mas não se mistura ao vidro, ficando acumulado em torno das bolhas. Quando se atinge um determinado valor de temperatura o sulfato se decompõe violentamente, gerando gás em grande quantidade que entra nas bolhas e as faz crescer, desta maneira fornecendo força suficiente para subir à superfície, arrastando consigo outras menores que se encontrem no seu caminho (AKERMAN, 2000).

Maia (2003) cita o óxido de arsênio (As_2O_3), e o óxido de antimônio (Sb_2O_3) como outras substâncias utilizadas na remoção das bolhas.

4.1.5. Colorantes

Pode-se dividir os materiais utilizados como colorantes em dois grupos. O primeiro inclui óxidos metálicos dissolvidos na solução dos vidros, quando não combinados aos silicatos através de uma reação. O segundo inclui aquelas poucas substâncias que

possuem efeitos corantes devido à sua presença em tamanhos coloidais (SCHOLES, 1948).

A Figura 1 apresenta a faixa de coloração obtida pela adição de alguns óxidos metálicos. Cabe ressaltar que a coloração indicada para cada um dos elementos não é exata, podendo variar devido a outros fatores tais como concentração, fórmula estrutural, pH do meio, presença de reagentes, dentre outros. A exemplo desta variação de coloração tem-se o ferro, que fornece coloração verde amarelada caso esteja na forma trivalente, Fe^{3+} , e azul esverdeada se na forma divalente, Fe^{2+} (MAIA, 2003).

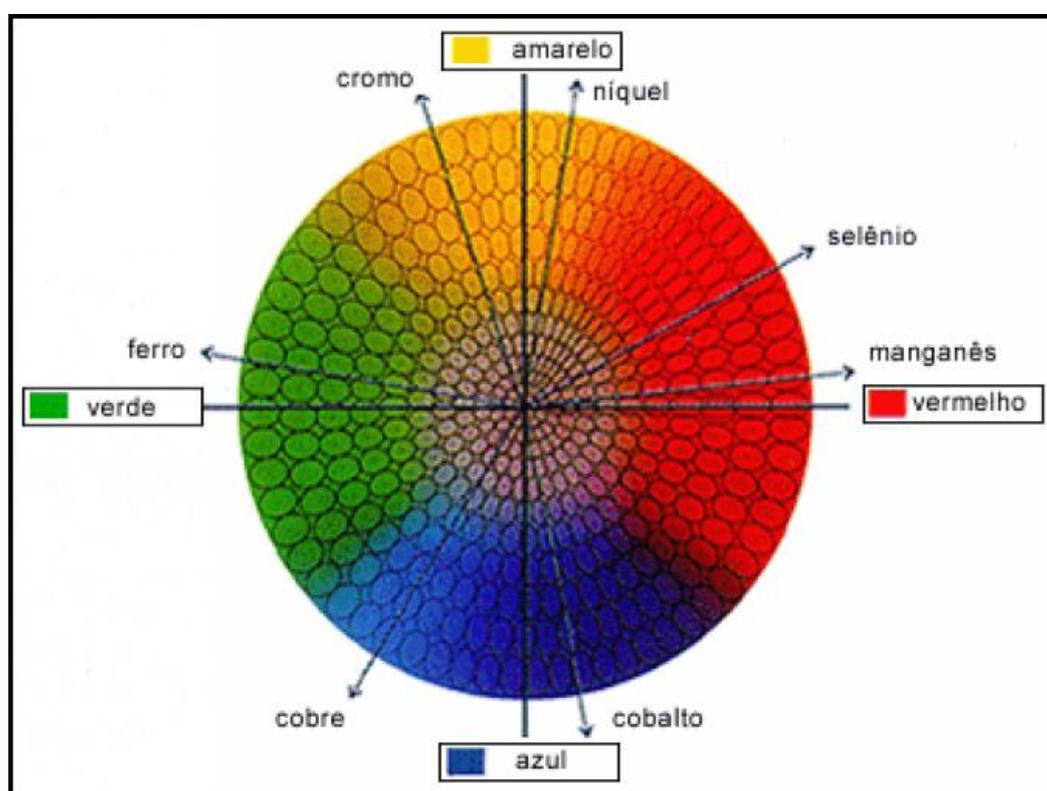


Figura 1 Efeitos dos Colorantes no Vidro

Fonte: ABIVIDRO, 2011.

O cobre se apresenta como outro importante corante, e também varia de coloração de acordo com sua forma e condições do meio. De acordo com Tooley (1953), quando na forma de óxido cuproso (Cu_2O) possui coloração vermelha, diferente de óxido cúprico (CuO), que é preto. Quando fundido, o cobre apresenta uma coloração azul-esverdeada, conforme Figura 1. Tal coloração azul será mantida sob meio neutro ou oxidante.

Outras cores podem ser obtidas pela combinação de dois ou mais elementos. No caso de se requerer vidros incolores ou transparentes, agentes descolorantes devem ser utilizados, conforme citação a seguir.

O vidro de cor âmbar, coloração usualmente empregada no segmento de frascos de vidro para garrafas e produtos farmacêuticos, é obtido pela combinação dos elementos ferro (Fe) e enxofre (S) em fornos com atmosfera fortemente redutora, obtida usualmente pela adição de compostos contendo carbono. Para obtenção do vidro transparente, entretanto, são utilizados agentes descolorantes, uma vez que dependendo da pureza da matéria-prima utilizada na fabricação do vidro, poderá ser favorecida a obtenção de um vidro com tonalidade amarelo-esverdeada, característica da presença do óxido de ferro como impureza na matéria-prima. Para minimizar esse efeito, são adicionados ao vidro agentes descolorantes que “mascaram” o efeito da cor amarelo-esverdeada do ferro. Os elementos descolorantes mais utilizados são o selênio (Se) combinado ao óxido de cobalto (Co_2O_3) e o processo consiste em sobrepor as cores complementares à coloração indesejável. Nesse caso, o selênio promove uma cor vermelha, enquanto o cobalto introduz uma cor azul que, associada à coloração amarelo-esverdeada, leva à percepção de um tom acinzentado ao vidro transparente que, para o olho humano representa ausência de coloração (ALVES,2008 APUD JAIME ET AL., 2003).

É importante observar o papel da coloração dos vidros, que não possuem apenas uma função decorativa, podendo desempenhar funções de proteção ao conteúdo da embalagem de vidro. Um exemplo são as garrafas de cor verde, que tem como objetivo proteger o vinho da deterioração causada pela incidência de raios ultravioleta. O mesmo acontece com garrafas de cerveja, embalagens de perfume, dentre outros. A Figura 2 ilustra alguns recipientes de vidro colorido utilizados na conservação de bebidas, alimentos e perfumes.



Figura 2 Recipientes de Vidros Coloridos

Fonte: USP, 1998.

O mesmo princípio da coloração está presente nos vidros planos, utilizados em janelas de prédios e veículos. Colore-se o vidro de maneira que ele impeça a passagem da radiação responsável pelo aquecimento (infravermelha), mas permita a passagem da luz

visível, possibilitando a visão através das janelas. Desta maneira, o ambiente aquece menos, e ao mesmo tempo não se torna necessário utilizar iluminação artificial durante o dia, economizando energia na iluminação e no ar condicionado. Uso semelhante aplica-se aos vidros reflexivos, que são empregados nos prédios modernos. Durante o dia parece um enorme espelho, mas na verdade, estes vidros refletem boa parte da radiação solar que de outra forma estaria entrando e aquecendo o ambiente. Nota-se que nestes mesmos prédios, durante a noite, quando as salas estão iluminadas, é possível enxergar de fora o seu interior, pois não há a radiação intensa do sol que se reflete e ofusca a luz visível que sai do interior para o exterior (ABIVIDRO, 2011).

4.1.6. Cacos

Outra matéria prima importante na fabricação atual do vidro são os cacos, provenientes da reciclagem dos resíduos vítreos. Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é justamente a verificação sobre a utilização dos mesmos, o capítulo 5 irá discutir especificamente as suas formas de aproveitamento, assim como as oportunidades e limitações do processo.

4.2. Principais Tipos de Vidros

Existem infinitas formulações de vidros em função da aplicação, processo de produção e disponibilidade de matérias-primas. Porém, este estudo tem como objetivo abranger apenas aqueles mais utilizados e passíveis de serem reciclados, descritos a seguir.

4.2.1. Vidro Alcalino

O vidro alcalino é o vidro mais produzido no mundo, atingindo índices superiores a 95% do total. Também chamado de vidro cal, é empregado na produção de garrafas, frascarias, vidros planos da construção civil e da indústria automobilística, dentre outros vários produtos. Possui baixas resistências térmicas e mecânicas.

A Tabela 2 apresenta as composições típicas dos vidros alcalinos. Observa-se a baixa variação dos percentuais dos óxidos utilizados e a presença de óxidos de magnésio

apenas nos bulbos de lâmpada incandescentes, o que confere ao material maior resistência termomecânica (CEBRACE, 2011).

Tabela 2 Composições Típicas de Vidros Alcalinos

	SiO ₂ (%)	Na ₂ O(%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)
Lâmpada Incandescente	72	16	2	6	4
Vidro de Garrafa	70	15	2	11	-
Vidro Plano	71	17	1	11	-

Fonte: Maia, 2003

4.2.2. Vidro Chumbo

Chamado também de cristal, é caracterizado por ter na sua composição altos teores de óxido de chumbo que variam geralmente de 10 a 29%. Sua presença faz com que o índice de refração do vidro seja maior, conferindo-lhe mais brilho que vidros comuns, diminuindo, porém, sua dureza. Possui alta densidade e uma longa faixa de trabalho devido à pequena alteração da viscosidade com a diminuição da temperatura. O óxido de chumbo não diminui a resistividade elétrica do vidro, o que lhe confere excelentes propriedades elétricas isolantes, além de aumentar o efeito do vidro de blindagem aos raios X, podendo, assim, ser largamente utilizado em aplicações eletrônicas tais como funil de tubo de televisor a cores, além de tubos de termômetro, bulbos de lâmpadas e selantes. Com relação à toxicidade do chumbo ao organismo humano, este tipo de vidro não proporciona riscos para a saúde, uma vez que o elemento químico fica retido na estrutura do vidro (USP, 1998).

4.2.3. Vidro Boro-Silicato

Caracterizados pela presença de quantidade significativa de óxido bórico, os vidros borossilicatos apresentam alta resistência ao choque térmico e por isso são empregados em produtos de mesa que podem ser levados ao forno. É o caso do Pyrex® e do Marinex®. Devido à menor quantidade de óxidos modificadores, além da resistência a choques térmicos, vidros borossilicatos são também muito resistentes ao ataque

químico, e por isso são utilizados em vários equipamentos de laboratório (AKERMAN,2000).

A Tabela 3 relaciona as composições dos vidros boro-silicatos com suas utilizações. O vidro I é usado em vidraria de laboratório, enquanto os vidros II e III são utilizados na fabricação de ampolas para injetáveis.

Tabela 3 Composições Típicas Boro-Silicatos

	(I)	(II)	(III)
SiO ₂ %	80	74	70
B ₂ O ₃ %	13	10	7
Al ₂ O ₃ %	2	5	6
Na ₂ O %	4	6	6
BaO %	-	1	3
CaO %	-	3	-

Fonte: Maia, 2003

Seguem outros tipos de vidro, menos utilizados, mas não menos importantes. Buscou-se fazer uma breve descrição da variação da composição dos mesmos, o que lhes conferem as características necessárias às suas aplicações.

- Fibra de Vidro: elevado teor de Al₂O₃, o que lhe confere grande estabilidade, necessária por terem grande superfície exposta a intempéries;
- Vidro Opalino: presença de flúor na massa, possivelmente sob a fórmula de minúsculos cristais de CaF₂, causando opalescência;

Existem ainda outros tipos de vidros para diversas aplicações, como vidro de termômetro, espelhos, vidro de sílica, vidro oftálmico, vidro de segurança, que não serão descritos devido suas baixas influências no setor da reciclagem de resíduos.

5. RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS

A reciclagem do vidro é uma atividade, a princípio, economicamente viável. No Brasil a reciclagem ainda é vista como uma atividade marginal, de subsistência e, como tal, carece de uma mentalidade empresarial. Dentro deste modelo, a reciclagem é um nicho de mercado inexplorado, com grande potencial de lucratividade (ABVIDRO, 2011).

O Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, utilizando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Parte deles foi gerada como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta seletiva. Em 2009, o setor faturou cerca de 1,5 bilhões de reais (CEMPRE,2011).

De acordo com CEMPRE (2011), 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2009 no Brasil, somando 470 mil ton/ano.

WRAP (2004) cita que em termos de produção de resíduos, recipientes e embalagens são dominantes, com grandes quantidades de resíduos vítreos gerados pelas famílias e pelo setor comercial (bares e restaurantes). Há também significativas quantidades de resíduos de vidros planos geradas no seu processo de fabricação, em demolições de construções, sucata de motor de veículos e substituição de pára-brisas de automóveis. Atualmente, apenas a sucata de vidro plano e processo pós-uso de recipientes de vidro são recicladas em quantidades significativas, enquanto todos os outros tipos acabam no fluxo de resíduos.

Nos EUA, o índice de reciclagem em 2009 foi de 40%, correspondendo a 2,5 milhões de toneladas. A Alemanha reciclou 81% no mesmo período, correspondendo a 2,2 milhões de toneladas. A Tabela 4 retrata o consumo e a reciclagem de vidro em diversos países da Europa.

Tabela 4 Consumo e Percentual de Reciclagem Anuais do Vidro

País	Consumo Nacional (Toneladas)	Reciclado (Toneladas)	Percentual Reciclado
AUSTRIA	250.300	226.000	90
BÉLGICA	311.732	300.334	96

DINAMARCA	142.400	124.900	88
FRANÇA	3.100.000	1.960.000	63
ALEMANHA	2.723.620	2.202.540	81
ITÁLIA	2.065.460	1.595.000	77
PORTUGAL	414.000	232.500	56
REINO UNIDO	2.686.000	1.658.470	62
TOTAL			
EUROPA	17.233.422	11.542.556	66,98

Fonte: FEVE, 2009.

O principal mercado para recipientes de vidros usados é formado pelas vidrarias, que compram o material de sucateiros na forma de cacos ou recebem diretamente de suas campanhas de reciclagem. Além de voltar à produção de embalagens, a sucata pode ser aplicada na composição de asfalto e pavimentação de estradas, construção de sistemas de drenagem contra enchentes, produção de espuma e fibra de vidro, bijuterias e tintas reflexivas (CEMPRE,2011).

5.1. Benefícios da Reciclagem do Vidro

Embalagens de vidro podem ser totalmente reaproveitadas no ciclo produtivo, sem nenhuma perda de material. Com um quilo de vidro se faz outro quilo de vidro, com perda zero e sem poluição para o meio ambiente. Além da vantagem do reaproveitamento de 100% do caco, a reciclagem permite poupar matérias primas naturais, como areia, barrilha, calcário (ABIVIDRO, 2011).

A produção a partir do próprio vidro também consome menor quantidade de energia e água, emite menos resíduos, materiais particulados, gás carbônico, o que também contribui para a preservação do meio ambiente. Outro aspecto é o menor descarte de lixo, reduzindo os custos de coleta urbana, e aumentando a vida útil dos aterros sanitários.

Considerações específicas a respeito dos benefícios na reciclagem do vidro:

Redução dos custos da matéria prima: o custo total das matérias primas na produção do vidro varia de um local para outro. Embora os cacos possam ser comprados a custos inferiores, deve-se levar em conta a coleta, transporte e processamento. Devido à falta

de incentivo do governo à reciclagem, muitas vezes o investimento para a produção do vidro a partir de matérias-primas virgens é mais barato, tendo em vista a grande abundância do principal constituinte do vidro, a sílica.

Economia de Energia: Em teoria, a energia necessária para produzir vidro soda-cal a partir de matérias-primas virgens é de aproximadamente 2,7 GJ/tonelada. A energia requerida para apenas derreter o vidro é de 1,9 GJ/tonelada. Portanto, o uso de vidro reciclado como matéria prima representa uma significativa economia de energia, na prática para cada aumento de 10% de cacos no forno de fusão o consumo de energia será reduzido em aproximadamente 2,5% (WRAP, 2004).

É importante observar que a cada dia se busca incansavelmente novas tecnologias, de forma a se encontrar possibilidades de melhorias na eficiência energética dos fornos utilizados na indústria. A utilização de resíduos vítreos se apresenta como uma alternativa simples e eficaz, que possibilitaria reduções energéticas, de matérias-primas utilizadas, lixo aterrado, emissões geradas, dentre outros.

Benefícios Ambientais: Há reduções nas emissões de dióxido de carbono associada à economia de energia resultante do aumento do uso de cacos. Há também reduções adicionais de CO₂ por meio de se evitar o uso de carbonato de sódio, calcário e dolomita, tendo em vista que todos são carbonatos, e liberam CO₂ durante o processo de fabricação do vidro. Para cada tonelada de vidro produzido a partir de matérias- primas virgens, cerca de 200 kg de CO₂ são liberados da quebra de elementos carbonatados. O aumento do uso de cacos irá ainda reduzir as emissões de materiais particulados e óxidos de nitrogênio (WRAP, 2004).

De acordo coma ABIVIDRO 2011 há diversos benefícios oriundos do agregamento do caco na fusão:

- 10% de "cacos" resultam em 2,5% de ganho energético;
- 1 tonelada de "cacos" gera a economia de 1,2 toneladas de matérias-primas;
- 10% de "cacos" reduz em 5% a emissão de CO₂.

Segundo o Glass Packaging Institute – GPI, a cada aumento de 10% de utilização de vidro reciclado tem-se:

- 10% menos emissão de dióxido de enxofre (SO₂);
- 6% menos de óxidos de nitrogênio (NO_x);
- 17% de redução de gás carbônico (CO₂);
- 2,5% de redução de combustíveis (energia);
- 6°C de redução na temperatura do forno, aumentando sua vida útil;
- 9,5% de redução no consumo de matérias primas.

5.1.1. Emissões Atmosféricas

O sistema de produção do vidro possui várias etapas que podem gerar emissões atmosféricas como a manipulação das matérias primas, operações na planta, forno, e equipamentos de controle da poluição.

A fusão das matérias primas para a produção do vidro se apresenta como a atividade com maior potencial de geração de poluentes atmosféricos como materiais particulados, dióxido de enxofre, e pequenas quantidades de monóxido de carbono. Emissões também são geradas durante a formação e acabamento de produtos de vidro como um resultado da decomposição térmica de lubrificantes durante a rotulagem da cerâmica. Tais emissões incluem compostos orgânicos voláteis, amônia, cloro e ácido clorídrico. Podem ainda haver pequenas emissões de metais e poluentes orgânicos (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2004).

Os materiais particulados são liberados quando os materiais da fusão volatilizam e se combinam com gases para formar condensados. Partículas emitidas a partir de vidro soda-cal são essencialmente compostas por sulfato de sódio. Podem ainda ser liberados materiais particulados na etapa de recebimento e armazenamento de matérias primas.

Óxidos de Nitrogênio (NO_x) são uma questão de especial preocupação para os fabricantes de vidro, por serem assunto de regulação cada vez mais rigorosas. Fornos de fusão do vidro geram NO_x por:

- reação de fase homogênea de gases de N₂ e O₂ na combustão, que produz principalmente NO;
- evolução do NO₂ a partir de compostos de nitrato presentes nas matérias primas;

- oxidação de nitrogênio no combustível (U.S.DEPARTMENT, 2002).

A formação de NOx é diretamente dependente da temperatura de combustão e das concentrações de nitrogênio e oxigênio no meio, conforme Tabela 5.

Tabela 5 Equilíbrio dos NOx

Temperatura (°F)	Ar		Fluxo de Gás	
	NO	NO ₂	NO	NO ₂
80 (condições ambiente)	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
980 (temperatura de saída do forno)	2,3	0,7	0,8	0,1
2.910 (temperatura dentro do forno)	6.100	12	2.000	1,8

Fonte: EPA, 1994.

NOx são formados por uma série de reações. A reação dominante ocorre no contato do ar de combustão com a chama, no forno com temperaturas entre 1500°C e 1700°C. Esta reação requer uma grande energia de ativação. Por esse motivo apenas NOx é formado, não se decompondo facilmente para formar nitrogênio e oxigênio.

Óxidos de Enxofre (SOx) são formados pela decomposição dos sulfatos e pelo enxofre dos combustíveis durante a combustão.

5.1.1.1. Influência da Utilização de Cacos nas Emissões Atmosféricas

O modo mais efetivo para a reciclagem dos resíduos vítreos é o derretimento dos mesmos novamente nos fornos de vidro, e sua utilização na formação de novas peças de vidro. Além de diminuir a extração de matérias primas e aumentar a capacidade dos aterros, tal atividade possui efeitos benéficos nas emissões atmosféricas:

- Redução das emissões de CO₂ como resultado da diminuição do uso de combustíveis e carbonatos: sílica, soda, dolomita, que em suas decomposições geram gás carbônico (220Kg/tonelada de cacos);
- Redução das emissões de SOx. Por exemplo a produção de vidro verde, que poderia ser realizada sem as substâncias colorantes;

- Redução das emissões de cloro e flúor, uma vez que a concentração dos mesmos em cacos é menor em comparação a matérias primas;
- Redução das emissões de particulados graças à redução da utilização de matérias primas, que contem mais de 25% das emissões de partículas menores que 0,1mm;
- Redução das emissões de NOx devido à menor combustão no forno.

Portanto, utilizando-se apropriadamente os cacos é possível obter-se uma redução significativa da utilização de matérias primas, diminuindo os impactos ambientais. A produção do vidro com utilização de cacos tem um consumo de energia inferior em relação à sem utilização de cacos. A cada 10% de cacos a energia é reduzida de 2,3 a 2,8%. É possível reduzir o consumo de energia em 25% com a adição de cacos, resultado de menores temperaturas necessárias. A temperatura no caso da utilização de cacos é de 1000°C, em comparação a 1300°C da não utilização (DSS, 2011).

5.2. Limitações na Reciclagem do Vidro

Existem alguns possíveis efeitos negativos na reciclagem do vidro, todos os quais relacionados à logística e a impurezas que podem ser introduzidas no forno de vidro. Pequenos pedaços de materiais cerâmicos podem não derreter no forno, dando origem a “pedras” no produto acabado. Metais podem reagir no forno, dando origem a bolhas de gás no vidro derretido, mais uma vez podendo influenciar no produto final. Ainda mais problemáticos são os materiais cerâmicos resistentes, os borosilicatos (pyrex®), difíceis de detectar junto aos cacos, causam defeitos nos produtos, além de poder bloquear o fluxo de vidro líquido através dos equipamentos de modelagem (Wrap,2004).

Maia (2003) cita que as partículas refratárias (cerâmicas, porcelanas, minerais) diminuem a resistência mecânica do vidro, aumentando o índice de quebra em serviço; as substâncias orgânicas alteram o equilíbrio Redox do banho fundido, podendo causar grandes alterações no processo; os metais e ligas metálicas causam variação da cor, e em alguns casos contribuem para aumentar o ataque aos refratários do forno. A Figura 3 ilustra possíveis danos causados a embalagens de vidro relacionadas a impurezas existentes nos cacos.



Figura 3 Defeitos na Fabricação do Vidro

Fonte: ABIVIDRO, 2011.

A maioria dos processadores são equipados com separadores magnéticos para a remoção de metais ferrosos e não ferrosos, além de separação dos resíduos por cor. Segundo WRAP (2004), recentemente a Berryman, empresa britânica, instalou um sistema de detecção capaz de remover materiais do tipo pyrex®. Todos esses são investimentos de alto custo, viáveis se aplicado em plantas de alto rendimento.

Uma vez que o vidro passe pela planta de processamento se torna um material mais homogêneo, e sua composição pode ser facilmente especificada. A especificação para cacos, aprovados pelos fabricantes de vidros está relacionada à coloração, contaminação por metais, cerâmicos e orgânicos. A distribuição de tamanho das partículas também é importante, com um tamanho em torno de 20 mm preferencialmente, uma vez que tamanhos maiores são mais difíceis de manusear, e menores têm uma tendência a causar poeira no forno.

A Tabela 6 demonstra as várias composições dos diversos constituintes em embalagens vítreas, potenciais impurezas no caso da reciclagem.

Tabela 6 Típicos Padrões de Qualidade

Classe	Limites Típicos	Níveis Típicos
Metais Ferrosos	<50g/T	transp. 20-40 g/T ambar 20-35 g/T verde 20-35 g/T
Metais Não-Ferrosos	<20g/T	< 1 g/T
Cerâmicos	<20g/T	transp. 20-40 g/T ambar 20-35 g/T verde 20-35 g/T
Orgânicos	3g/T	transp. 1,0-1,5 g/T ambar 1,0-1,8 g/T verde 1,2-1,8 g/T
Tamanho da Partícula	<50mm	<50mm
Cor Principal	Limites Típicos	Níveis Típicos
Transparente	ambar<2% verde <2%	ambar desprezível verde 0,5%
Ambar	verde <10% transp. <12%	verde 0-10% transp 2-8%
Verde	ambar<10% transp. <12%	ambar 0-10% transp. 0-10%

Fonte: Wrap 2004

A partir dos dados relacionados na Tabela 6 é possível observar que o parâmetro que se apresenta como o principal limitante na mistura de vários vidros é a coloração, uma vez que os níveis de materiais ferrosos e não-ferrosos, orgânicos e cerâmicos são praticamente equivalentes para as três variações de vidros analisados.

5.3. Análises de Viabilidade na Reciclagem do Vidro

Uma consideração a ser levada em conta ao se analisar os benefícios da reciclagem, é que esses podem ser compensados pelo consumo de energia excessivo associado à gestão de resíduos, e há, portanto, a necessidade de se desenvolver comparações de forma a analisar racionalmente as alternativas de coleta, separação e processamento das frações de resíduos (Krivtsov, 2005).

De acordo com ABIVIDRO 2011 alguns fatores devem ser levados em conta na análise da viabilidade de implantação da reciclagem de resíduos vítreos:

- Comunicação: vital para o início e manutenção do programa, estimulando a comunidade local a participar ativamente da separação seletiva dos resíduos.
- Logística: fundamental para o sucesso do programa. Mensurar a captação de cada ponto e determinar se a frequência de coleta viabiliza a sua continuidade. O fluxo de material reciclável deve ser fácil, fluente e permanente, assim como a estrutura de coleta, transporte e armazenamento.
- É fundamental se ter conhecimento do mercado com antecedência e garantir a compra dos resíduos a preços que justifiquem a operação. A captação deverá ser planejada, respeitando a legislação pertinente e analisando-se a facilidade de acesso.

Segundo CRETATEC 2011 a viabilidade financeira de reciclagem é definida pela adequação de três fatores:

Volume: para se projetar o potencial de coleta de um programa, deve ser levado em conta o consumo de 0.5 Kg/mês/habitante, que é a média de consumo brasileira. Poder aquisitivo e hábitos regionais também influenciam o consumo de determinados alimentos ou bebidas embalados em vidro.

Distância: é preciso considerar a distância dos pontos de captação até as usinas de beneficiamento e respectivas vidrarias. Sendo um país de proporções continentais, a distância máxima aceitável a percorrer dependerá da quantidade de vidro captado e das condições de negociação de preços de venda e de custo de frete. Deverão ser computados custos de combustível, custo de mão-de-obra de motorista, além do desgaste do veículo e sua depreciação.

Custos Operacionais: formados basicamente pelos custos de captação de vidro, beneficiamento e transporte de caco, deverão ser claramente definidos para garantir o sucesso da operação.

O negócio só irá funcionar se forem atendidas plenamente todas as etapas do processo: captação, coleta, beneficiamento, transporte e venda do material.

O transporte do material nas etapas de coleta, seleção e produção, esvaziamento dos recipientes, trituração, dentre outros, envolvem processos com alto consumo de energia, devendo os custos ambientais ser levados em conta na conveniência da reciclagem(Vellini, 2008).

KRIVTSOV (2005) realizou uma análise da pegada energética envolvida no processo de produção e reciclagem do vidro, de forma a comparar a energia consumida em cada uma das etapas do processo produtivo. A análise é iniciada a partir do ponto no qual o vidro torna-se resíduo, e segue até a disposição final e/ou reprocessamento. Fundamentalmente, este modelo não leva em conta apenas a energia consumida durante o processamento/disposição, mas também aquela necessária ao transporte. É constituída por várias etapas interligadas, desenvolvendo em cada uma delas uma parte do processo global. As etapas mais importantes são coleta de lixo, transferência ao aterro, transporte estágio I (domicílio à base de coleta), transporte estágio II (base de coleta para usina de processamento), planta de processamento do vidro, transferência dos cacos, fabricação do vidro.

Na etapa de coleta e transferência ao aterro a metodologia utilizada calculou o consumo energético não apenas da fração de resíduos vítreos, mas sim de todo o lixo urbano coletado, tendo em vista que na maioria dos casos o lixo não é separado antes de ser enviado ao aterro.

Dentre todas as etapas consideradas, o forno provou ter, de longe, a maior demanda de energia, conforme Figura 4. A parcela principal do consumo está no processo de fabricação do vidro, e as economias conquistadas no mesmo através da maior utilização de cacos compensam eventuais aumentos no consumo de energia nas etapas de transporte e processamento (Krivtsov, 2005).

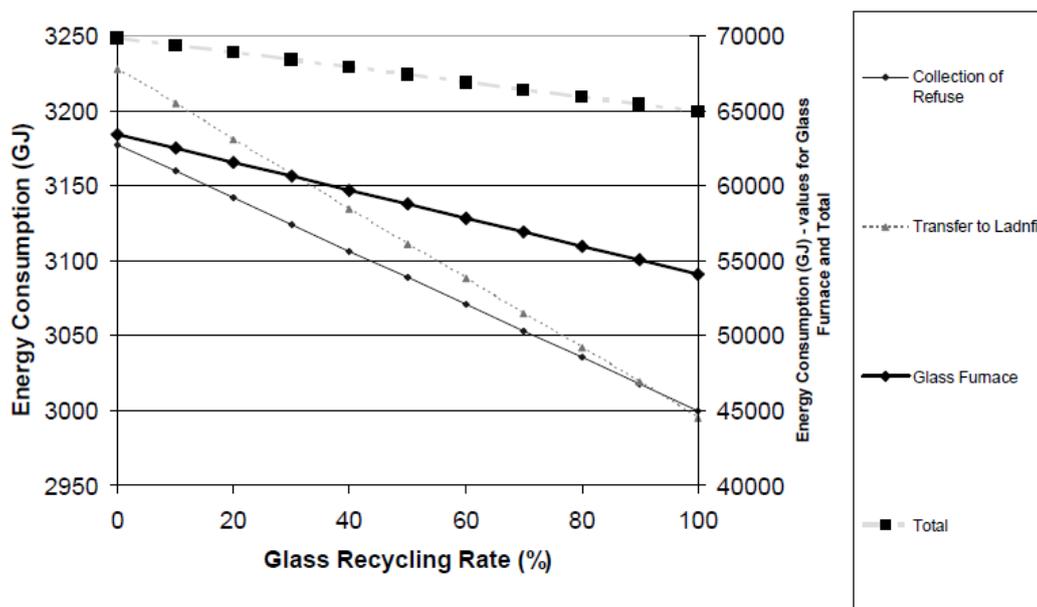


Figura 4 Relação da Reciclagem do Vidro e Consumo de Energia

Fonte: Krivtsov, 2005

Existem várias alternativas que podem resultar no aumento da taxa de reciclagem. Um fato que afeta esta taxa é o número de receptores de garrafas: em teoria, aumentando o número de pontos receptores deveria aumentar o percentual de reciclagem, uma vez que facilita a entrega voluntária. No entanto, este aumento de pontos resultaria também em vários problemas de logística, incluindo manutenção nas estruturas receptoras, dificuldades na obtenção de locais de implantação, recolhimento de resíduos, dentre outros.

Conforme verificado na Figura 5, a implantação de sistemas de coleta seletiva representa uma das melhores alternativas, pois gera aumento nas taxas de reciclagem e ainda economia no consumo de energia.

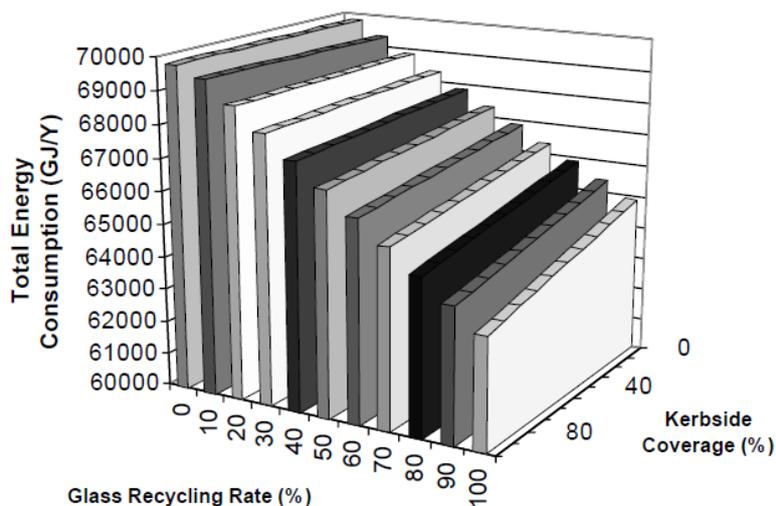


Figura 5 Relação entre Coleta Seletiva, % de Reciclagem e Energia Consumida

Fonte: Krivtsov, 2005

Outro fator que se deve levar em conta é a distância dos locais de coleta até a planta de beneficiamento do vidro. Se esta for aumentada, a economia de energia na produção do vidro pode ser compensada pelo aumento das necessidades de transporte, conforme Figura 6. Sendo assim, cuidados devem ser tomados na escolha da localização das plantas de beneficiamento, e no caso de impossibilidade de redução dos percursos, usinas de triagem deverão ser instaladas de forma a transportar apenas os resíduos realmente reaproveitáveis.

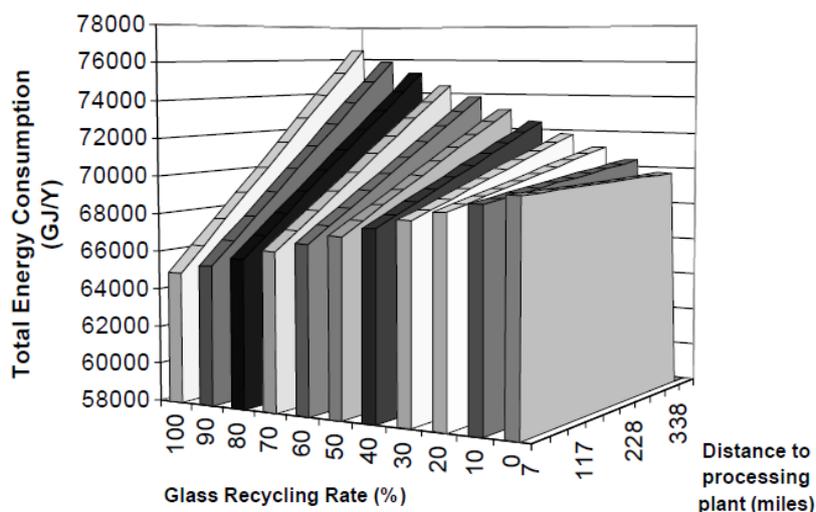


Figura 6 Variação do consumo de energia em relação à distância

Fonte: Krivtsov, 2005

6. LOGÍSTICA REVERSA

Muito se fala em reciclagem de resíduos sólidos urbanos, sendo esta uma atividade amplamente desenvolvida nos dias de hoje. No entanto, maior enfoque deveria ser dado às possibilidades de reuso dos resíduos, sem a necessidade de desconformação para posterior reprocessamento mesmo.

Ao se reciclar resíduos vítreos muita energia é utilizada, tendo em vista as altas temperaturas necessárias para se alcançar a fusão dos mesmos. Sendo assim, o foco principal no que se diz respeito à gestão do vidro deveria ser a reutilização, uma vez que, diferentemente dos outros tipos de materiais, o vidro pode ser submetido a altas temperaturas para higienização e desinfecção sem que seja desconformado.

Os principais materiais utilizados como recipientes de produtos domésticos são o vidro e o PET. Sendo assim, buscou-se realizar, conforme Figura 7, uma comparação dos impactos ambientais entre quatro diferentes tipos de materiais.

- “GLASS”: vidro totalmente produzido a partir de matérias-primas virgens;
- PET: politereftalato de etileno, conhecido como PET, plástico utilizado na produção de embalagens;
- “GLASS I”: vidro com 25% de reuso;
- “GLASS II”: vidro com 80% de reuso.

Foram especificados os encargos ambientais dos quatro materiais descritos acima, em termos de emissões atmosféricas, tendo como referência principal os seguintes efeitos: aquecimento global (CO_2 , CH_4 , NO_2 , CO , SO_x , VOC , CO_2 equivalente em 100 anos de emissões), acidificação (SO_2 , NO_x e VOC), smog fotoquímico e formação de ozônio troposférico (NO_x , NH_3 , CO , CH_4), redução do ozônio estratosférico (CFC), poluição olfativa (mercaptanos e H_2S), efeitos diretos sobre a saúde humana (CO , H_2S , mercaptanos, hidrocarbonetos aromáticos, gases ácidos (HCl , HF e compostos organoclorados).

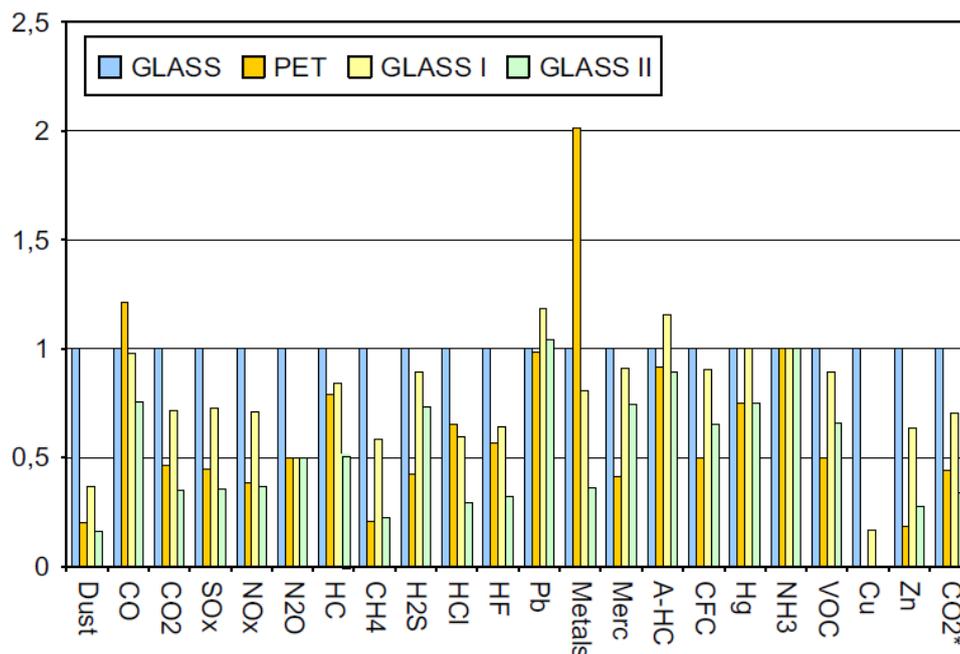


Figura 7 Comparação Emissões Atmosféricas

Fonte: Vellini, 2008.

Se levados em conta a recuperação e reciclagem de materiais utilizados, os benefícios devem ser atribuídos apenas ao vidro, uma vez que o PET não pode ser reciclado no processo em questão. Utilizando cacos de vidro, se pode de fato levar a um menor consumo de energia, devido à menor temperatura de fusão, e a redução do consumo de combustíveis e matérias-primas para a produção e transporte.

É possível observar que na grande maioria dos parâmetros analisados a produção do vidro sem reciclagem apresenta maiores índices de emissão. Ao se comparar os processos utilizando cacos de vidro e baixo percentual de reuso (GLASS I), observa-se uma grande diminuição nas emissões, mas, neste caso, os maiores benefícios são a economia de matérias-primas e energia necessárias ao processo. É importante ressaltar que a melhor alternativa na utilização de embalagens de vidro seria, neste caso, a reutilização em 80% (GLASS II), que apresenta menores emissões em quase todos índices analisados. Para tal, seria de grande importância o desenvolvimento da logística reversa, tal como ocorre em embalagens de cerveja, que são retornadas ao produtor após seu consumo.

No Brasil a implantação da Logística Reversa para resíduos vítreos é um desafio um tanto complexo, devido às dimensões continentais do país. Em determinadas regiões, principalmente em São Paulo, esta atividade é facilitada pela existência das indústrias responsáveis pelas diversas etapas da produção dos materiais, diminuindo assim a distância do local de produção até os locais de consumo e conseqüente geração dos resíduos. Mas este é um cenário específico de poucas regiões do país, sendo a realidade da maioria bastante diversa.

Em Belo Horizonte, ao se tratar de resíduos vítreos a situação não é muito favorável, uma vez que os fabricantes de embalagens estão a uma grande distância, excedendo os limites do estado de Minas Gerais. As embalagens são então adquiridas pelas empresas envasadoras aqui presentes, que possuem interesse apenas nas embalagens virgens, deixando de lado aquelas geradas no pós-consumo. As cooperativas, por sua vez, ficam sem alternativas. O vidro é formado por matérias primas de baixo valor econômico, o que desvaloriza o valor agregado aos resíduos vítreos. Desta forma, o transporte para as empresas fabricantes de embalagens se torna inviável economicamente, e muitas vezes ambientalmente, restando às cooperativas enviar estes resíduos para o aterro.

7. RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS EM BELO HORIZONTE

A coleta seletiva em Belo Horizonte é realizada pela SLU (Superintendência de Limpeza Urbana) através de duas tipologias de coletas: ponto a ponto e porta a porta. Na primeira, também conhecida como LEV (Local de Entrega Voluntária), o material é separado nas diversas tipologias dos recicláveis (metal, plástico, papel, papelão, vidro). Já na segunda, o resíduo é proveniente diretamente das residências e estabelecimentos comerciais, que realizam uma primeira segregação do material, enviando apenas aqueles que podem ser reciclados, porém, todos misturados.

Em ambas as tipologias de coleta, a SLU realiza a distribuição do material coletado às cooperativas, que são responsáveis por dar a destinação correta a esses resíduos. O material da coleta porta a porta é enviado às cooperativas diretamente pelo caminhão da coleta, chegando totalmente misturado, o que impossibilita caracterizações qualitativas por parte da SLU. Sendo assim, é possível se estimar apenas a quantidade total dos resíduos, todos em conjunto, mas não separadamente. Seria óbvio deduzir que as cooperativas fossem responsáveis por essa quantificação, mas, de acordo com aquelas visitadas, esse relatório não é obrigatório.

Belo Horizonte possui seis cooperativas cadastradas na SLU para recebimento dos materiais oriundos da coleta seletiva, apresentadas na Tabela 7. É importante observar que a referida tabela retrata a distribuição de todos os resíduos recicláveis em conjunto, e não apenas dos vítreos separadamente.

Tabela 7 Coleta Seletiva de Papel, Metal, Plástico e Vidro

COOPERATIVA	TOTAL RECEBIDO (T)
Asmare	5.326,66
Coopersoli Barreiro	1.030,83
Coopersol Venda Nova	265,19
COMARP	1.077,75
ASSOCIRECICLE	224,57
Coopemar Oeste	1.301,79
TOTAL	9.226,79

Fonte: SLU – Relatório Anual de Atividades 2008.

Com o objetivo de se pesquisar a realidade das cooperativas foram realizadas visitas às duas que mais recebem resíduos: Asmare e Coopemar Oeste. Foi verificado que alguns materiais vítreos que chegam às mesmas intactos tais como embalagens de azeite, pimenta, leite de coco, longneck de cerveja, são negociados com produtores artesanais, que as utilizam para armazenar e vender seus produtos (doces, pimentas, azeites, cachaças, etc). Já no caso do vidro danificado, foi verificado que este é quebrado de forma a ocupar menos espaço, sendo os cacos enviados para reprocessamento em São Paulo. É importante ressaltar a responsabilidade das cooperativas a respeito da falsificação de produtos, uma vez que recebem materiais extremamente visados para esta atividade, como garrafas de whisky, vodca, perfumes, dentre outros.

A Tabela 8 abaixo apresenta a distribuição quantitativa e qualitativa dos materiais oriundos da coleta seletiva em Belo Horizonte no ano de 2008, de acordo com a SLU.

Tabela 8 - Coleta Seletiva por Material (toneladas)

	Papel	Metal	Plástico	Misto	Vidro	Total
Janeiro	430,03	7,25	96,91	256,04	66,69	856,92
Fevereiro	452,26	3,86	88,39	271,97	51,21	867,69
Março	410,97	4,37	83,92	265,88	56,51	821,65
Abril	398,44	4,96	209,26	163,65	56,18	832,49
Maiο	463,78	5,38	91,41	285,88	58,49	904,94
Junho	385,7	4,76	88,69	254,71	52,07	785,93
Julho	426,84	4,89	88,49	304,81	58,8	883,83
Agosto	422,8	13,23	86,06	273,31	59,57	854,97
Setembro	370,38	11	66,91	335,59	56,78	840,66
Outubro	331,58	4,53	61,5	402,8	63,4	863,81
Novembro	301,93	9,56	68,98	403,09	55,64	839,2
Dezembro	39,59	4,06	28,8	413,73	61,34	547,52
Total	4.434,30	77,85	1.059,32	3.631,46	696,68	9.899,61

Fonte: SLU – Relatório Anual de Atividades 2008.

É possível verificar a total falta de controle do município de Belo Horizonte no que se diz respeito à quantificação destes materiais, tendo em vista que a classificação “Misto”, a qual diz respeito aos materiais coletados conjuntamente para posterior separação, apresenta cerca de 37% do total, impossibilitando quaisquer análises confiáveis à respeito dos tipos de materiais contidos no mesmo.

Ao se analisar o referido Relatório Anual de Atividades de 2008 da SLU é possível verificar uma falta de credibilidade nos dados apresentados. De acordo com a Tabela 8 acima foram coletadas quase 700 toneladas de vidro no ano de 2008. No mesmo relatório supracitado obtiveram-se informações de que somente o LEV coletou 672,82 toneladas de materiais vítreos em Belo Horizonte, sendo esta apenas uma pequena parcela do total. Segundo a COOPEMAR, segunda cooperativa que mais recebe materiais recicláveis em Belo Horizonte, a mesma recebe 50 t/mês de vidro, e estima que o município colete em torno de 250 t/mês.

É importante ressaltar ainda que apenas 30 bairros de Belo Horizonte são atendidos pela coleta seletiva, o que corresponde a 354 mil habitantes (cerca de 15% do total), de acordo com a SLU. Assim sendo, a grande maioria da população (mais de 80%) não é atendida pela coleta porta a porta, contribuindo para a coleta seletiva apenas pela modalidade ponto a ponto, o que se induz a concluir que a maior parte dos resíduos recicláveis de Belo Horizonte é enviada ao aterro, sem qualquer forma de caracterização qualitativa.

É possível se constatar que a situação do município de Belo Horizonte a respeito da gestão dos resíduos vítreos deixa muito a desejar. A SLU se isenta de quaisquer responsabilidades na destinação final destes resíduos, deixando a cargo das cooperativas, que possuem dificuldade na obtenção de compradores de cacos de vidro. Alguns outros fatores dificultam o desenvolvimento desta gestão, como por exemplo a ausência de grandes produtores de vidro em Minas Gerais, que faz com que diminua o preço de compra deste material, que deverá ser enviado a São Paulo para beneficiamento, e também o baixo custo das matérias primas, o que diminui o valor agregado ao resíduo.

Tendo em vista a série de barreiras apresentadas no setor não foi constatada nenhuma empresa beneficiadora do vidro em Belo Horizonte. Antigamente existia um empreendimento chamado Caco Limpo, que veio à falência ao se aventurar nesta área isolada dos interesses capitalistas. As empresas que compram os resíduos vítreos no município são filiais, geralmente de São Paulo e Rio de Janeiro, mas, de acordo com algumas cooperativas, é normal se ter que enviar toneladas de resíduos vítreos já separados para o aterro sanitário.

8. LEGISLAÇÃO

A atual legislação brasileira no que diz respeito à reciclagem de resíduos vítreos é totalmente escassa, não havendo qualquer legislação voltada especificamente para o gerenciamento destes resíduos. A Lei 12.305 é a que mais se aproxima de trazer soluções para tal problemática, sancionada em agosto de 2010, regula a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta é uma Lei que não é específica para resíduos vítreos, mas bem ampla, sendo direcionada para todos os tipos de resíduos sólidos urbanos.

Na Lei 12.305 a indústria é tida como responsável solidária pelo resíduo, sendo convidada em conjunto ao poder público, cooperativas, catadores, população, a executar a gestão de forma a se encontrar a destinação ambientalmente mais adequada dos resíduos sólidos.

O Decreto 7.405 de 2010 também direciona ações para o setor de reciclagem, tendo como objetivo promover a capacitação, assessoria, incubação, aquisição de equipamentos e implantação de infraestrutura física aos catadores, através da disponibilização de verba. As partes elegíveis para o recebimento de tal recurso seriam órgãos e entidade públicas, cooperativas e entidades sem fins lucrativos com atuação no setor de reciclagem. No entanto, em contato à Coopemar foi verificada a dificuldade da cooperativa em levantar verba para a aquisição de equipamentos, o que contradiz referido decreto.

É importante observar que regulamentações mais específicas são extremamente necessárias, em virtude da diferença nas características específicas dos diversos materiais e mercados. As embalagens de vidro, por exemplo, se diferem muito das outras principalmente devido à sua grande resistência física e às mudanças de temperaturas, facilitando assim o seu reuso. Desta forma, deveria se incentivar a Logística Reversa, uma vez que tais embalagens de vidro necessitam apenas de um processo de higienização a altas temperaturas para retornar ao mercado.

Um exemplo de Legislação interessante e eficaz é citada por WRAP 2004, esclarecendo que na Inglaterra, as empresas que fabricam, enchem ou vendem recipientes (cervejarias e supermercados, por exemplo) têm a obrigação de reciclar os resíduos das embalagens de vidro, sob as “Regulações das Obrigações e Responsabilidades do Produtor” (Producer Responsibility Obligations Regulations), de 1997. A cada tonelada reciclada, a empresa recebe um certificado, denominado Packaging Waste Recovery Notes, ou PRN’s, que poderá ser comercializado. Seu valor depende diretamente da demanda, flutuando em torno dos 20 euros.

É importante observar que é papel do Estado a criação de novas legislações que busquem incentivar as empresas a se responsabilizarem pelos produtos que vendem, desta forma incentivando também o desenvolvimento de setores de reciclagem. As empresas privadas, grandes produtoras de resíduos, devem ser responsabilizadas por tal geração, uma vez que utilizam as mesmas para vender seus produtos. Não é possível se deixar a cargo das cooperativas a solução para tais problemas, uma vez que essas não possuem poder e qualificação técnica para criar um novo ciclo de produção.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reciclagem de resíduos vítreos é uma atividade que tem potencial para gerar diversos benefícios, tanto ambientais como econômicos. Com a inserção de cacos no forno são necessárias menores temperaturas em relação à produção a partir de matérias-primas virgens, o que resulta em economia de energia, e das próprias matérias-primas. Economia também dos aterros sanitários, grande vantagem econômica, tendo em vista o alto preço que se calcula para a destinação nos mesmos (R\$13,00/tonelada).

As emissões atmosféricas também são reduzidas com o aumento na utilização de cacos. Estima-se, que para cada tonelada de vidro produzido a partir de matérias-primas virgens, cerca de 200 kg de CO₂ é liberado da quebra de elementos carbonatados. O aumento no uso de cacos contribuirá ainda para a redução as emissões de materiais particulados e óxidos de nitrogênio, devido às menores temperaturas necessárias à fusão, promovendo também o aumento da vida útil do forno.

Foi constatado que em diversos países europeus o índice de reciclagem de resíduos vítreos já atinge os 90%, fato fortemente influenciado pelas dimensões geográficas e disponibilidade de matérias-primas. No Brasil é estimado que o índice atual de reciclagem de vidros chegue a 45%. Conforme discutido não há credibilidade nestas projeções, uma vez que não se tem acesso aos resíduos segregados em nenhuma etapa do processo desde a coleta até a disposição final. O caminhão da coleta convencional envia, na grande maioria das vezes, o resíduo todo misturado para o aterro, e as cooperativas que recebem o material da coleta seletiva nem sempre levantam tais informações.

Em Belo Horizonte a situação é crítica. Devido aos fatores supramencionados não é possível sequer se estimar a quantidade de vidro reciclado. Em visita a algumas cooperativas foi constatada a total falta de capacidade da maioria delas em articular oportunidades de reciclagem. Deve-se dar valor ao trabalho realizado pelas mesmas, uma vez que muitos resíduos que possuem maior valor econômico são vendidos, mas os vítreos não possuem mercado, e são muitas vezes enviados para o aterro. As únicas oportunidades de venda são para produtores artesanais, quando da embalagem intacta,

ou enviar os cacos para São Paulo para reprocessamento, a distâncias que muitas vezes não compensam financeiramente, e nem ambientalmente.

É necessário que haja um esforço do poder público na articulação de novas Leis que responsabilizem os produtores, envazadores, distribuidores, consumidores pelos resíduos gerados. Especificamente no caso dos resíduos vítreos deve-se promover o reuso, desenvolvendo a logística reversa, tendo em vista a alta resistência física e térmica deste material. A indústria deve incentivar o consumidor a devolver a embalagem, e assim receber um desconto na compra do mesmo produto, tal como ocorre com garrafas de cerveja.

A situação de Belo Horizonte deve ser estudada mais a fundo. Pôde-se verificar que a implantação de usinas beneficiadoras de vidro no município é dificultada pela inexistência de grandes indústrias produtoras de embalagens, sendo as mesmas importadas do Norte do país. Tal fato dificulta a evolução do gerenciamento destes resíduos, uma vez que seria necessária a implantação de todas as etapas da produção, desde a extração das matérias-primas, uma vez que o percentual máximo de cacos de vidro no forno de reprocessamento é de 80%.

Seria interessante ainda se obter informações sobre preços que as grandes empresas envazadoras pagam pelo recipiente, se estimar os equipamentos e custos necessários à instalação de uma planta de reciclagem de resíduos vítreos, dentre outros. Buscou-se investigar todos estes fatores, mas sem sucesso, tendo em vista que as empresas privadas não dão oportunidades para se conversar sobre o assunto.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVIDRO – ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. Disponível em <www.abividro.org.br>. Acesso em 22 Ago. 2011.

AEKERMAN, M. A Elaboração do Vidro. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain, 2000.

AEKERMAN, M. Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain, 2000.

ALVES, M. Embalagens plásticas e de vidro para produtos farmacêuticos: avaliação das propriedades de barreira à luz. Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada, v. 29, n.2, p. 167-178, 2008.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. National Pollutant Inventory: Emissions Estimations Technique Manula for Glass and Glass Fibre Manufacturing, 2004.

CEBRACE. Disponível em <www.cebrace.com.br>. Acesso em 01 de Outubro de 2011.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. Disponível em <www.cempre.org.br>. Acesso em 23 Ago. 2011.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL COM A RECICLAGEM; IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. Segunda Edição. Editora Páginas & Letras, São Paulo 2000.

CMRR – CENTRO MINEIRO DE REFERÊNCIA EM RESÍDUOS. Disponível em <cmrrmg.webnode.com.br>. Acesso em 25 Ago. 2011.

CRETATEC – CRETA TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM. Disponível em <www.cretatec.com.br>. Acesso em 01 de Outubro de 2011.

DSS RecyklingCompany. Disponível em <www.dss-recykling.pl/en/index.php>. Acesso em 04 de Novembro de 2011.

FEVE – THE EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. Disponível em: <www.feve.org>. Acesso em 26 Ago. 2011.

GPI – GLASS PACKAGING INDUSTRY. Disponível em <www.gpi.org>. Acesso em 29 de Setembro de 2011.

KRIVTSOV, V. Analysis of energy footprints associated with recycling of glass and plastic—case studies for industrial ecology. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Southampton, Suíça, 175–189, 2004.

LORYUENYONG, V. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. Waste Management, 2009.

MAIA, SAMUEL BERG. O vidro e sua fabricação. Rio de Janeiro 2003. Editora Interciência.

SCHOLES, R.S. Modern Glass Practice. Revised Edition. Chicago 1948. Industrial Publications.

SHAND, ERROL B. Glass Engineering Handbook. Nova Iorque, McGraw-Hill, 1958.

Shi, C. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, China, 2005.

SU, N. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, 2001.

TOOLEY, FAY VANISLE. The Handbook of Glass Manufacture: a book of reference for the plant executive , technologist and engineer, 1953.

USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis /3/3133/tde.../DissertacaoVRev.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde.../DissertacaoVRev.pdf)>. Acesso em 23 de Setembro de 2011.

VELLINI, MICHELA. Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. Department of Industrial Engineering, Roma, 2137–2143,2008.

WRAP. Recycled Glass Market Study & Standards Review. Enviros, Inglaterra, 2004.