



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de Licenciatura

Aproveitamento de Caco para a Produção de Material Vítreo

Autora:

Hamina Feleciano Magaia

Supervisor:

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o

Maputo, Fevereiro de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de Licenciatura

Aproveitamento de Caco para a Produção de Material Vítreo

Autora:

Hamina Feleciano Magaia

Supervisor:

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o

Maputo, Fevereiro de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que a
estudante _____

Entregou no dia ____/____/20__ as ____ copias do seu Trabalho de Licenciatura
com a Referencia: _____ intitulado:

Maputo, ____ de _____ de 20 ____

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro por minha honra que o trabalho apresentado em seguida foi realizado com base nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso e nos documentos e referencias citadas no mesmo.

Maputo, Fevereiro de 2022

A autora

(Hamina Feleciano Magaia)

DEDICATÓRIA

Este trabalho é ao meu irmão que sacrificou o seu tempo precioso para construir um ser académico em mim, diante de tantas dificuldades e limitações, e a memória da minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela força, pelo amor e protecção incondicional. Em seguida agradeço a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para a concretização deste sonho.

Ao meu irmão Manafá Pildes que tanto amo por acreditar em mim, pelo incentivo e por nunca desistir de mim.

Agradeço a minha filha Khensany Guambe pela compreensão nos momentos em que ausentei-me dela para dedicar-me aos estudos. Agradeço a minha sobrinha Katia Mafuiane e ao meu tio Carlos Mulima pela força.

Ao Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe pelo apoio, incentivo e colaboração na realização deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros do curso, Hercínia Nhabanga, Julaida Maluleque, José Adamo, Vasco Nhancale, Otilia Salvador, Cecília Nhancale, Albertina Mandjana, Teresa Cubanhua, Laurina Chiduma, Hamadan Mussuale, Ermelinda Toqueleque, Glória Mauricio, Júlio Jahar, Idilson Ngovene, Firroza Sicola, Nilza Foloco, Adelia Mondlane, Jossefa, pelos bons momentos que passamos juntos ao longo dos cinco anos e a todos os professores do Departamento de Engenharia Química.

RESUMO

O vidro é um dos materiais mais usados pelo Homem, em muitas áreas, como construção civil, sector de embalagens, na indústria electrónica, etc. Porém sua maior aplicação, gera muitos resíduos sólidos, trazendo consequências graves ao meio ambiente. A versatilidade do uso de vidro, deve-se principalmente a sua resistência química, térmica, transparência entre outras características. Todavia, a alta resistência do vidro faz com que este não seja biodegradável, ficando acumulado por longos anos no meio ambiente. O vidro é um material 100% reciclável, minimizando o uso de matéria-prima bruta e evitando o seu descarte ao meio ambiente.

O presente trabalho consistiu na produção de fritas cerâmicas a partir de resíduos vítreos, nomeadamente, garrafas de vidro castanho, garrafas de vidro verde e vidro de construção. Foram também feitos ensaios de avaliação do ataque químico às fritas produzidas, tendo-se notado maior resistência em soluções ácidas (HCL) e menor em soluções básicas (NaOH). Para além do ataque químico, foi também determinada a densidade tanto dos cacos de vidro, quanto das fritas cerâmicas produzidas, não tendo havido significativa alteração, porém uma tendência de subida da densidade das fritas cerâmicas em relação aos cacos vidro.

ÍNDICE

Conteúdo	páginas
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE GRÁFICOS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO	3
1.2. OBJECTIVOS	4
1.2.1. Objectivo geral	4
1.2.2. Objectivos específicos	4
1.3. METODOLOGIA	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. VIDROS	5
2.1.1. Cacos de vidro	5
2.1.2. Conceito e utilização do vidro	6
2.1.3. Breve historial do vidro	7
2.1.4. Estrutura do vidro	8
2.1.5. Tipos de vidro	9
2.1.7. Ataque químico ao vidro	11
2.2. PRODUÇÃO DE VIDRO	13
2.2.1. Principais matérias-primas para produção de vidro	13
2.2.2. Processo de produção de vidro	14
2.2.3. Transformações físico-químicas na produção do vidro	16
2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DO VIDRO	18
2.3.1. Impactos sobre a qualidade do ar	18
2.3.2. Impactos sobre a água	18
2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO	19
2.5. RECICLAGEM DE VIDRO	22
2.6. FRITAS CERÂMICAS	25
2.6.1. Processo de produção de fritas cerâmicas	26

- 2.6.2. Tipos de fritas cerâmicas26
- 2.6.3. Aplicação das fritas cerâmicas27
- 3. MATERIAIS E MÉTODOS28
 - 3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS USADOS28
 - 3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS29
 - 3.2.1. Fusão dos cacos de vidros para produção de fritas cerâmicas29
 - 3.2.2. Determinação da densidade31
 - 3.2.3. Avaliação do ataque químico do vidro32
- 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO35
 - 4.1. PRODUÇÃO DAS FRITAS CERÂMICAS35
 - 4.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE37
 - 4.3. AVALIAÇÃO DO ATAQUE QUÍMICO40
 - 4.3.1. Ataque químico às fritas produzidas usando carbonato de lítio como fundente40
 - 4.3.2. Ataque químico às fritas produzidas usando carbonato de cálcio como fundente43
 - 4.3.3. Ataque químico aos cacos de vidro47
 - 4.4. Análise qualitativa espectrofométrica50
- 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES52
 - 5.1. CONCLUSÕES52
 - 5.2. RECOMENDAÇÕES53
- 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição dos resíduos sólidos urbanos na Cidade de Maputo21

Tabela 2: Material vítreo reciclável e não reciclável24

Tabela 3: Quantidades de vidro processados30

Tabela 4: Quantidades das matérias-primas levadas ao forno35

Tabela 5: Densidades de vidro antes da fusão.37

Tabela 6: Densidades das fritas cerâmicas de cacos de vidro com adição de carbonato de lítio.37

Tabela 7: Densidades das fritas cerâmicas de cacos de vidro com adição de carbonato de cálcio.38

Tabela 8: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de lítio40

Tabela 9: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de lítio41

Tabela 10: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de lítio42

Tabela 11: Ataque químico ao vidro de castanho com carbonato de cálcio44

Tabela 12: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de cálcio45

Tabela 13: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de cálcio46

Tabela 14: Ataque químico aos cacos de vidro castanho47

Tabela 15: Ataque químico aos cacos de vidro verde48

Tabela 16: Ataque químico aos cacos de vidro de construção49

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Ciclo de vida do vidro6
- Figura 2: Fluxograma do processo de produção de vidro 14
- Figura 3: Transição vítrea17
- Figura 4: Vidro recolhido por catadores para venda às empresas recicladoras21
- Figura 5: Fluxograma do processo de reciclagem de vidro24
- Figura 6: Materiais usados para a produção das fritas cerâmicas28
- Figura 7: procedimentos experimentais29**
- Figura 8: Vidro moído30
- Figura 9: Fusão e retirada dos vidros31
- Figura 10: Ensaio de determinação do ataque químico32
- Figura 11: Materiais e equipamentos usados para a análise espectrofotométrica34
- Figura 12: Fritas cerâmicas produzidas36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Composição do vidro⁹

Gráfico 2: Diferença de densidades antes e depois da fusão³⁹

Gráfico 3: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de lítio⁴¹

Gráfico 4: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de lítio⁴²

Gráfico 5: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de lítio⁴³

Gráfico 6: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de cálcio⁴⁴

Gráfico 7: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de cálcio⁴⁵

Gráfico 8: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de cálcio⁴⁶

Gráfico 9: ataque químico aos cacos de vidro castanho⁴⁸

Gráfico 10: Ataque químico aos cacos de vidro de construção⁵⁰

Gráfico 11: Gráficos FTIR das amostras de vidro castanho com carbonatos de cálcio e de lítio⁵⁰

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional, a industrialização e o incremento nas actividades configuram como os principais motivos da multiplicação dos resíduos. O crescimento acelerado da população implica na expansão automática da industrialização para atender às novas demandas, o que significa um aumento considerável no volume de resíduos gerados, tanto do ponto de vista doméstico quanto industrial (Morais, 2013), e, ademais, a geração desses resíduos tem a ver com o aumento da extracção de recursos naturais, o consumo e produção de bens e serviços devido as mudanças frequentes dos padrões de consumo associados à vida moderna e às novas tecnologias (Soares, 2018).

As indústrias buscam cada vez mais novas alternativas para a deposição de seus resíduos sólidos industriais, devido às pressões dos órgãos ambientais, financiadores ou pelo facto de adquirirem aumento da credibilidade perante o mercado consumidor. Dentre os resíduos gerados encontra-se o vidro, que é um material totalmente reciclável, entretanto, quando descartado poderá ficar acumulado durante várias gerações. Neste sentido, os resíduos de vidro se inserem como um grave problema ambiental quando simplesmente descartados, pois há acúmulo de grande quantidade desse material que não é absorvida na natureza. O reaproveitamento de resíduos vítreos, além de reduzir o impacto ambiental, pode contribuir para a melhoria da qualidade dos produtos finais e para a diminuição dos custos finais de sua produção.

A reciclagem e o reaproveitamento de resíduos têm-se tornado uma preocupação mundial muito relevante nos últimos anos. Visto que, a destinação final adequada dos resíduos sólidos urbanos é um dos maiores problemas da sociedade moderna, novos conceitos e soluções tem sido estudados dentro de uma visão de sustentabilidade e comprometimento com a questão ambiental (Caldas, 2012). As actividades de reciclagem e gestão de resíduos de vários tipos de materiais (metais, vidros, papéis, plásticos, pneus etc.) visam preservar as matérias-primas e economizar energia no processo produtivo, pois quase todas as formas de produção de energia geram impactos ambientais significativos, além de evitar potenciais riscos de toxicidade que possa afectar a saúde humana. O processo de reciclagem do vidro, consiste em transformação dos resíduos em pequenas partículas para se

fabricar novos produtos. A reciclagem de vidro evita a extracção de materiais no meio ambiente e deposição final em aterros sanitários, permitindo reduzir custos e obter ganhos ambientais (Neto *et al.*, 2014). Os benefícios potenciais da reciclagem de vidros segundo incluem: redução no consumo de recursos naturais não renováveis; utilização dos resíduos como substituto da matéria-prima virgem, resultando em redução de custos; redução de áreas necessárias para aterro uma vez que os resíduos são utilizados novamente como bens de consumo; reciclagem eco eficiente para maximizar recursos e valoração de resíduos de vidro pós-consumo; vantagens económicas e vantagens ambientais.

Moçambique é um dos países que mais geram resíduos de vidro na sua maioria resultantes de garrafas de bebidas alcoólicas. Esses resíduos são na maioria dos casos depositados em locais impróprios representando um perigo para a saúde pública e problemas estéticos. Os principais centros urbanos em Moçambique não têm capacidade para recolha de todos os resíduos gerados o que representa um desafio estes investirem cada vez mais em alternativas para melhor gestão de resíduos sólidos. O vidro sendo um material reciclável, existe a necessidade de se proceder a sua reciclagem, porem, esta de ser acompanhada de actividades de recolha selectiva e educação ambiental para que as pessoas depositem o vidro no seu devido lugar. Outra alternativa não pouco importante é o incentivo para as empresas usarem garrafas retornava, o que já é feito por algumas cervejeiras moçambicanas e indústrias de refrigerantes.

Este trabalho visa produzir materiais vítreos a partir do caco de vidro, sendo este um estudo demonstrativo da possibilidade de se reaproveitar o vidro usado para produzir novos materiais, reduzindo assim os resíduos espalhados ou que vão para as lixeiras. A reciclagem do vidro apresenta vantagens ambientais e económicas através de redução da exploração das matérias-primas e redução do consumo de energia durante a fundição.

1.1. MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

O vidro é um dos materiais usados como embalagem para diversos produtos desde alimentos, medicamentos, produtos de beleza, vasos para ornamentação, etc. O vidro é também usado para a construção de edifícios, nos automóveis, celulares, computadores e televisores, etc. A diversidade das utilidades de vidro faz com que seja um dos produtos mais consumidos em todo o Mundo, sendo que Moçambique não fica atrás. Desta feita, a quantidade de resíduos de vidro gerados vem aumentando exponencialmente.

Em Moçambique nota-se nos centros urbanos grandes quantidades de garrafas de vidro espalhados de forma desordenada, o que representa não só problemas estéticos mas também um perigo para as pessoas dado que os cacos de vidro podem causar ferimentos graves e também servirem de vectores para diversas doenças. Como forma de minimizar este problema, é necessário criar-se formas de gestão dos resíduos de vidro através de: redução de geração de resíduos (uso de garrafas retornáveis), reutilização (uso das garrafas para outros fins), reciclagem e deposição em locais adequados.

Foi olhando nos problemas causados pelos resíduos de vidro que pensou-se em estudar a possibilidade de reaproveitamento desses resíduos para a obtenção de novos produtos. Para além de contribuir para retirada dos vidros de locais impróprios, o reaproveitamento desses resíduos diminuiria a quantidade dos resíduos levados para a lixeira. O reaproveitamento dos resíduos vítreos pode contribuir também para redução da pressão sobre as principais matérias-primas usadas no fabrico de vidro. Outros benefícios da reciclagem de resíduos de vidro, é a redução do custo com energia dado que a quantidade de energia necessária para fundir o vidro é menor que a necessária para fundir as matérias-primas brutas. Também contribui para a redução das emissões atmosféricas.

1.2. OBJECTIVOS

1.2.1. Objectivo geral

Este trabalho tem como objectivo geral produzir fritas cerâmicas a partir de caco de vidro disponível na lixeira da Cidade de Maputo.

1.2.2. Objectivos específicos

Para a concretização do principal objectivo deste trabalho, foram definidos os seguintes objectivos específicos:

- Seleccionar os diferentes cacos de vidro disponíveis na Cidade Maputo;
- Analisar a fusão do caco de vidro com e sem adição de agentes redutores de temperatura;
- Desenvolver materiais vítreos (fritas cerâmicas) a partir de caco de vidro, e;
- Determinar as propriedades do material vítreo desenvolvido (propriedades físicas e químicas)

1.3. METODOLOGIA

A realização do presente trabalho foi dividida em seguintes etapas: revisão bibliográfica, realização dos ensaios laboratoriais, análise e discussão dos resultados, e por fim a elaboração do relatório final.

A fase de revisão bibliográfica consistiu em pesquisas a cerca do tema em estudo, por meio de plataformas digitais, visitas à bibliotecas, tendo-se conseguido encontrar os fundamentos teóricos para o suporte do trabalho. Depois da revisão bibliográfica, foram feitos os ensaios laboratoriais, que consistiram na fundição do vidro, com e sem agentes redutores de temperaturas, e depois foram determinados a densidade e o ataque químico. A terceira fase foi a análise dos resultados em forma de gráficos de onde foram estudados os comportamentos de cada amostra. Por fim, fez-se a síntese do trabalho, que culminou com a elaboração do relatório final.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. VIDRO

2.1.1. Cacos de vidro

Resíduos vítreos (cacos de vidro) têm suas origens tanto no meio doméstico (principalmente embalagens) quanto no industrial (principalmente vidro plano). Para além do caco proveniente do consumidor final, há que considerar o que resulta de quebras nas linhas de enchimento ou da inutilização de embalagens retornáveis que já excederam a vida útil e que os engarrafadores remetem para a indústria do vidro de embalagens.

O principal tipo de vidro encontrado no lixo urbano é o de embalagens, como garrafas para bebidas alcoólicas, águas, refrigerantes, sucos, potes e frascos, para armazenamento de produtos alimentícios e que podem, perfeitamente, ser reaproveitados. Encontra-se também o vidro, como parte, ou componente de inúmeros outros produtos domésticos, como, espelhos, vidros de janelas e box de banheiro; utensílios domésticos de vidro temperado como pratos, travessas, panelas, tampas de fogões, além de vidros especiais, como tubos de televisão, lâmpadas e válvulas, vidros de automóveis, “vidro cristal”; ampolas de medicamentos, entre outros (Crisigiovanni, 2010).

O caco de vidro pode ser classificado em três grupos quanto à sua origem: material gerado na própria vidraria e no mesmo forno, portanto, com a mesma composição química do vidro em produção e podendo retomar à mistura sem qualquer correção; material proveniente de outra fonte geradora como, por exemplo, um outro forno de fusão. Neste caso, o caco de vidro deve ser considerado no cálculo da composição do vidro à qual será incorporado; material de origem desconhecida, proveniente de um processo de reciclagem. Neste caso, deve ser considerado como uma matéria-prima qualquer, realizando-se análises químicas que assegurem a compatibilidade com a composição na qual será agregado.

Os cacos de vidro possuem diversas utilidades, a saber: produção de novos materiais vítreos; produção de cimento; agregado para concreto asfáltico, agregado para leitos de estrada, materiais abrasivos, blocos de pavimentação, tanques sépticos, filtros, janelas, clarabóias, telhas, entre outras aplicações.

2.1.2. Conceito e utilização do vidro

Segundo Caldas (2012), actualmente a definição mais completa de vidro é a proposta pelo comité do *U.S.A National Research Council*, segundo a qual, o vidro é, por difracção de raios X, um material amorfo que exhibe uma temperatura de transição vítrea. Esta é definida como o fenómeno pelo qual uma fase amorfa sólida exhibe, devido à mudança de temperatura, uma variação repentina na derivada das propriedades termodinâmicas, tais como calor específico e coeficiente de expansão, em relação as suas respectivas fases cristalina e líquida.

Algumas características que tornam o vidro um material versátil são segundo Prado (2007): retornabilidade (uso do vidro para o mesmo fim várias vezes); reutilização (uso da embalagem de maneiras diferentes para as quais foi fabricada); total reciclabilidade (sem perda de volume ou de propriedades do material); é inerte, impermeável; não deixa sabor nem gosto no conteúdo. Os vidros são hoje utilizados em quase todos os aspectos das actividades humanas; em casa, nas janelas, lâmpada e luminárias, sistemas de aquecimento solar, fornos e geleiras, utensílios de mesa, decoração, etc.; na ciência, nos microscópios e telescópios constituindo as lentes, nos frascos dos laboratórios, etc.; na indústria nos reactores, visores, instrumentos, etc., e mesmo em arte, pois eles podem ter suas propriedades ajustadas às suas finalidades, assumindo infinitas cores e formas (Akerman, 2013).



Figura 1: Ciclo de vida do vidro

2.1.3. Breve historial do vidro

A descoberta do vidro é muito antiga, foi aproximadamente no ano 5000 a.C., quando os fenícios ao fazerem uma fogueira na areia á beira da praia, utilizando a trona (mineral rico em óxido de sódio) a fim de apoiarem suas panelas descobriram acidentalmente que areia aliado a trona e o fogo ocasionaram uma reacção, originando-se em um líquido transparente que hoje se chama vidro (Lemos, *et al.*, 2016).

Em 100 a.C., os romanos já produziam o vidro por técnicas de sopro nos moldes, para a confecção de janelas. Entre os anos 500 e 600 d.C., uma nova maneira possibilitou a produção do vidro plano por sopro de uma esfera, através da sua ampliação por rotação em forno, depois que a bolha estava grande suficiente, cortava-se o fundo, deixando a parte que estava presa no tubo e com a rotação deste se produzia um disco de vidro aproximadamente (Akerman, 2000)

Por volta do ano de 1300, o vidro moldado a rolo foi introduzido através de uma técnica trazida do Oriente em Veneza, mas especificamente na Ilha de Murano que se especializou na produção desse vidro, que foi revolucionário para a época, surgindo também o cristal, esses processos existem até os dias de hoje (Akerman, 2000).

Em 1900 foi dado o início da produção de vidro plano contínuo, através do estiramento da folha de vidro na vertical, sendo que em 1952 foi inventado na Inglaterra, por Pilkington o processo *Float*, onde o vidro fundido é escorrido sobre um banho de estanho líquido que solidifica sobre ele, revolucionando o sector. A partir daí ocorreram diversos estudos no processo de fabricação da “folha” a fim de melhorar a tecnologia de produção do vidro plano, como a redução da distorção óptica e o custo de produção (Akerman, 2000). Foi a partir do início do século XX que a indústria do vidro se desenvolveu com a introdução de fornos contínuos a recuperação de calor e equipados com máquinas semi ou totalmente automática para produções em massa (Caldas, 2012).

2.1.4. Estrutura do vidro

Basicamente os vidros são formados pela ligação química entre elementos químicos metálicos e não metálicos com o oxigênio e também pela junção de alguns semi-metais com o oxigênio como no caso da sílica. O vidro apresenta como unidade básica a estrutura tetraédrica SiO_4^{-4} . Na composição química dos vidros são encontrados três tipos especiais de óxidos: os formadores de rede (vitrificantes), os modificadores de rede (fundentes) e os intermediários (estabilizantes) (Bó, 2019).

Os formadores de rede incluem os óxidos que formam poliedros, que podem formar cadeias, pela ligação com os tetraedros de SiO_4 da rede associado com o SiO_2 vítreo (Morais, 2013). São os responsáveis por formar a rede vítrea, onde os cátions e os iões oxigênio encontram-se ligados entre si, originando ilhas estáveis dentro de uma estrutura de alta viscosidade. Os óxidos SiO_2 , B_2O_3 e GeO_2 são formadores de rede, seus cátions são de alto valor de intensidade de campo. Observa-se que estes cátions são de pequeno raio iônico e alta densidade de carga iônica, o que faz com que suas ligações sejam fortes (Babisk, 2009).

Os modificadores de rede são os óxidos responsáveis por romper a estrutura vítrea, diminuindo assim a viscosidade do vidro. Possuem cátions de baixo valor de intensidade de campo e entre eles encontram-se os alcalinos, alcalino-terrosos e metais de transição (Babisk, 2009). Os óxidos de sódio, cálcio, magnésio e potássio são os mais utilizados industrialmente. Óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, tais como Na_2O e CaO não formam poliedros na estrutura vítrea, mas tendem a quebrar a continuidade da rede de cadeias de poliedros de SiO_2 (Morais, 2013).

Entre os cátions formadores e os modificadores, encontram-se os cátions intermediários, como o alumínio. Os cátions intermediários podem agir como formadores de rede, como o exemplo do alumínio na rede de SiO_2 , aumentando a viscosidade do meio e podem agir como modificadores quando o meio for favorável (Babisk, 2009). Esses óxidos não podem formar vidro, mas podem substituir os iões Si^{+4} na rede, e conseqüentemente contribuir para a estabilidade da rede (Morais, 2013).

A unidade estrutural básica da rede da sílica é o tetraedro silício-oxigênio (SiO_4), no qual um átomo de silício está ligado a quatro átomos de oxigênio. Os tetraedros

de sílica estão ligados pelos vértices, por meio do compartilhamento do átomo de oxigênio, por dois átomos de silício. Estes oxigênios partilhados são chamados de oxigênios de ligação (Babisk, 2009). No gráfico 1 é apresentada a composição de vidro em termos percentuais, podendo haver pequenas variações de acordo com as propriedades e características do vidro que se deseja produzir.

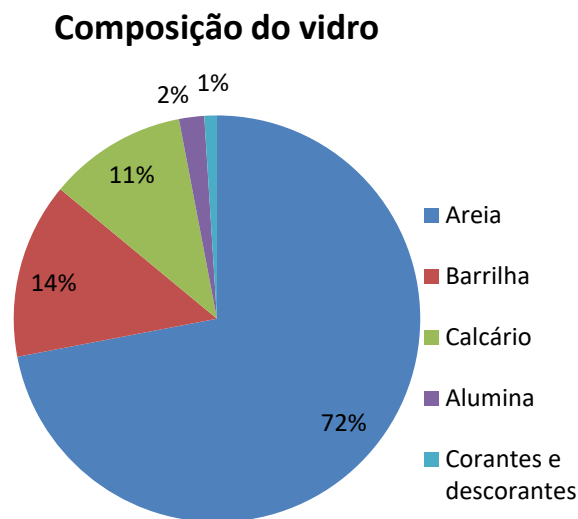


Gráfico 1: Composição do vidro (Babisk, 2009)

2.1.5. Tipos de vidro

Os tipos de vidro diferem entre si, basicamente, pela composição química e, conseqüentemente, pelas aplicações convencionalmente adoptadas pela indústria vidreira, que variam conforme o modo de fabricação. Quanto à composição, os principais tipos de vidros são classificados da seguinte forma: sílica-vítrea, vidros soda-cal, vidros ao chumbo, borossilicatos e alumino-boro-silicatos (Bó, 2019).

A sílica-vítrea possui uma temperatura de fusão de 1710°C; o seu processo de fusão é muito lento e o líquido obtido é muito viscoso, sendo que, caso ocorram bolhas durante a fusão, essas não conseguirão se libertar sozinhas (Akerman, 2000). A sílica vítrea possui um coeficiente de expansão térmico muito baixo, sendo ideal para janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos e outras aplicações onde é necessário suportar altas temperaturas e manter as dimensões, este é também utilizado na produção de fibras óptica (Morais, 2013).

Com a adição de alumina a uma composição de vidro silicático, o óxido de alumínio actua como formador de rede mesmo sendo incapaz de formar rede vítrea sozinho dando origem aos vidros alumino-silicatos. A alumina exerce seu papel de óxido intermediário. Como o alumínio é trivalente e o silício é tetra-valente, a coordenação tetraédrica da alumina aumenta a coesão da estrutura do vidro (AKERMAN, 2000).

Os vidros sodo-cálcicos são os mais antigos, porém mais utilizados até os dias de hoje, como, por exemplo, vidros de garrafas, frascos, potes, janelas, bolbos e tubos de lâmpadas. A composição dos vidros sodo-cálcicos está dentro de uma faixa estreita de composição. Eles contêm, normalmente, entre 8 e 12% em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17 % de óxido de sódio, podendo-se compensar o sódio com potássio e o cálcio com magnésio (Morais, 2013).

O vidro ao chumbo apresenta uma longa faixa de trabalho, podendo ser trabalhada a baixas temperaturas. É utilizado na fabricação de vidros nobres como, copos e taças finas (crystal), pois o chumbo confere ao vidro um maior índice de refração, incrementando seu brilho. Também podem ser aplicados na indústria electroeletrónica e óptica, devido a propriedades como resistividade e refração, respectivamente (Akerman, 2000).

Os vidros borossilicatos são vidros que apresentam alta resistência ao choque térmico e ataque químico, por isso são utilizados para fabricação de materiais domésticos que podem ser levados ao fogo como o Pyrex e do Marinex e materiais de laboratório (Akerman, 2000).

Os vidros alumino-borossilicatos são vidros que contêm óxido de alumínio em sua composição. É similar ao boro-silicato, mas tem maior resistência a produtos químicos, suporta alta temperatura e é mais difícil de ser produzido. Quando misturado com um condutor eléctrico, é usado em circuitos eléctricos como resistência. Também são utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitrocerâmicos (Morais, 2013).

2.1.6. Propriedades do vidro

As propriedades dos materiais são ditadas pelo tipo de ligações dos átomos que os constituem. Devido à vastíssima, quase infinita, faixa de composição química dos vidros, onde a maioria dos elementos da tabela periódica pode ser incorporada, eles apresentam uma ampla variação de propriedades mecânicas, ópticas, térmicas, eléctricas e químicas (Akerman, 2013).

As propriedades do vidro, no estado sólido, consistem na transparência; translucidez ou opacidade à luz, dependendo da existência ou não, de pequenas partículas misturadas à massa vítrea; não absorvência; ótimo isolante eléctrico e baixa condutividade térmica e não é combustível. É capaz de variar sua viscosidade, segundo a temperatura em que é submetido, indo desde um líquido, com uma viscosidade relativamente baixa, a altas temperaturas, até o estado de pasta viscosa, em temperaturas próximas à da transição vítrea. Outra característica importante é a sua cor, podendo apresentar desde o incolor, até infinitas cores. Dependendo dos elementos que se introduz na sua composição, este filtra a luz, deixando passar alguns raios e retendo outros (Crisigiovanni, 2010).

2.1.7. Ataque químico ao vidro

Vidros possuem elevada durabilidade química, mas não é possível afirmar que são rigorosamente inertes a todo o tipo de solução. Vidros são altamente resistentes a soluções ácidas e levemente básicas, com excepção do ácido fluorídrico, mas são atacados facilmente por soluções básicas mais concentradas (Marçal, 2011).

Quando um vidro entra em contacto com um meio líquido, pode ocorrer a corrosão desse material e o vidro pode até mesmo se dissolver por completo por conta dessa interacção. Além disso, os produtos dessa corrosão provocam alterações na composição química e no pH da solução. Normalmente, é utilizado o termo lixiviação para se referir ao estudo da corrosão do vidro em um meio líquido (Vieira, 2015). Esse termo é empregado para definir o fenómeno de remoção dos constituintes solúveis presentes em um sólido quando imerso em um determinado meio líquido.

O primeiro estágio de lixiviação do vidro envolve a troca iônica entre íons alcalinos (Na^+ , K^+ , entre outros) presentes na estrutura vítrea e íons de hidrogênio do líquido a que estão expostos. Como consequência, essa troca iônica conduz ao aumento do pH do líquido. Neste estágio, os demais constituintes do vidro não são alterados e a taxa de extração de alcalis (Na , K) do vidro é lenta e decresce aproximadamente com a raiz quadrada do tempo. Dessa forma, com a lixiviação dos íons alcalinos, há um aumento na área superficial do vidro, deixando uma camada rica em elementos formadores (Si , P , entre outros) com micro poros hidratados. No segundo estágio da lixiviação ocorre a quebra das ligações principais (SiO-Si ou P-O-P), ocasionando a dissolução do vidro (Delbianco, 2003) .

O pH do meio em que o vidro está em contacto interfere na corrosão do mesmo. Em meio ácido, o ataque ao vidro ocorre especialmente pelo processo de difusão iônica. Por esta razão, vidros constituídos apenas por sílica, ou seja, isentos de íons alcalinos, praticamente não são corroídos em meio líquido com pH menor que 7. Nos vidros que contem óxidos modificadores ocorre a extração dos íons alcalinos com uma taxa proporcional a raiz quadrada do tempo, e essa taxa se mantém praticamente constante ao modificar o pH para valores próximos de 8 (Vieira, 2015).

A natureza do ácido empregado como agente químico na solução de lixiviação não exerce nenhuma influência importante na corrosão do vidro, com exceção do ácido fluorídrico. Porém, de acordo com a solubilidade dos produtos extraídos dos vidros, diferenças nas taxas de corrosão podem ocorrer. De uma forma geral, o ataque ao vidro é mais rápido em meio aquoso com ácido nítrico em relação ao ácido clorídrico e ao ácido sulfúrico (Vieira, 2015). Em meio alcalino, o ataque ao vidro é muito mais rápido em relação ao meio ácido ou neutro, pois o predomínio de OH^- produz a destruição da rede vítrea por meio da ruptura das ligações principais (Marçal, 2011).

2.2. PRODUÇÃO DE VIDRO

2.2.1. Principais matérias-primas para produção de vidro

O vidro resulta da fusão de uma mistura de diversas matérias-primas inorgânicas minerais, que é submetida a um processo de arrefecimento controlado tornando-se num material duro, homogêneo, estável, amorfo e isotrópico. A sua principal característica é ser moldável a uma determinada temperatura sem que sofra qualquer tipo de degradação (Alonso, 2016).

O vidro é uma substância amorfa constituída basicamente de areia, calcário, feldspato, barrilha e caco de vidro. Além da necessidade de utilização de materiais refinantes e corantes tais como sulfato de sódio, carvão, hematita, cromita e óxido de cobalto/selênio (Fernandes 2017).

O material mais empregado para a produção de vidro é a sílica ou óxido de silício (SiO_2). A sílica sozinha produz um excelente vidro, com ótimas propriedades, porém com um grave problema, seu ponto de fusão é muito alto, em torno de 1700°C , o que requer fornos especiais e apresenta consumo de energia e custo de produção muito elevados. O vidro sem aditivos tem aparência transparente. A sílica tem a função vitrificante. A soda introduzida na barrilha e no sulfato de sódio tem por finalidade baixar o ponto de fusão da sílica. O cálcio, introduzido a partir do calcário, dá estabilidade ao vidro, contra os ataques de agentes atmosféricos. O magnésio, introduzido pela dolomita, transmite ao vidro resistência para suportar, dentro de certos limites, mudanças bruscas de temperatura. A alumina, advinda do feldspato, enriquece sua resistência mecânica. O cloreto de sódio, o nitrato de sódio e o óxido de arsênio são afinantes. O óxido de cobalto (azul), o óxido de ferro (verde), e o óxido de selênio (cinza) são corantes (Crisigiovanni, 2010).

2.2.2. Processo de produção de vidro

O ciclo produtivo para a fabricação de vidro envolve as etapas de preparação da composição (matérias-primas), fusão, conformação e recozimento. A figura 2 descreve o processo de produção de vidro.

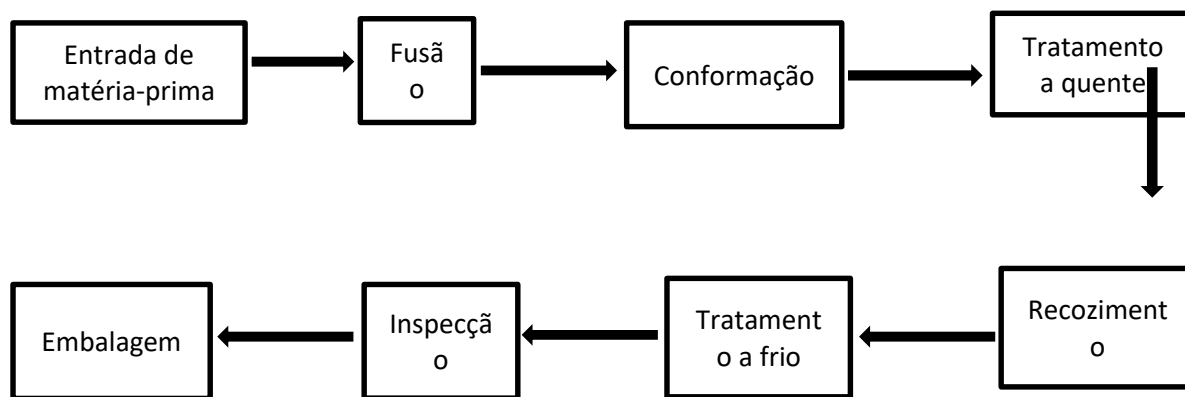


Figura 2: Fluxograma do processo de produção de vidro

As matérias-primas que compõem o vidro são medidas, pesadas e misturadas na quantidade pré-determinada no *Batch House* “Casa de mistura”. Em seguida a mistura da composição é enviada ao forno de fusão (Lemos *et al.*, 2016). A casa de mistura, muitas vezes também denominada *batch house*, tem a função de receber, armazenar as matérias-primas em silos, dosar cada matéria-prima em balanças conforme a formulação do vidro a ser produzido, homogeneizar a mistura das matérias-primas previamente dosadas e encaminhar a mistura vitrificável ao forno de fusão (Fernandes, 2017).

Depois de pronta, a composição é levada ao forno, onde é fundida e transformada em vidro, onde usa-se o gás ou óleo como combustíveis. Os fornos são alimentados continuamente pela composição que, por efeito do calor vai se fundir e se incorporar ao banho; no lado oposto, o vidro já elaborado é conduzido às máquinas de conformação (Lemos, 2012). No forno, a composição é fundida a uma temperatura de mais o menos 1600°C. Nesse processo existe uma determinada lentidão, sendo determinada pelas correntes internas do tanque de fusão, que podem atingir a capacidade de até 3.000 toneladas. Em seguida, o vidro é refinado para que as bolhas de gases que aparecem do processo sejam eliminadas. Após, a massa do vidro fundido é preparada à temperatura e viscosidade adequadas para serem transformadas (Lemos *et al.*, 2016).

A massa de vidro fundido é despejada em um tanque com estanho derretido, a uma temperatura de 650 °C. Nesse processo o vidro flutua sobre o estanho feito óleo sobre a água, devido à diferença de densidade dos dois materiais (Lemos *et al.*, 2016). Na fase da conformação, a massa fundida e viscosa de vidro é transformada em um produto final nas máquinas de conformação, pela acção do sopro mecânico ou de prensas. De maneira geral, o produto é moldado no intervalo de tempo em que o vidro fundido se resfria e se torna mais viscoso. Este intervalo de tempo depende da composição que foi levada ao forno para ser fundida. A fase de conformação do vidro difere, conforme o tipo de produto a ser fabricado (Lemos, 2012).

Segundo Fernandes (2017), recozimento é o processo que consiste na passagem do vidro dentro de um forno de recozimento, para que sofra um resfriamento gradual e controlado, reduzindo assim as tensões internas que o vidro adquiriu após a perda de calor brusca na etapa anterior. Na fase final de recozimento, a peça de vidro recebe um tratamento térmico, ou seja, é resfriada lentamente até a temperatura ambiente, aliviando as tensões que normalmente surgem durante a conformação (Lemos, 2012).

O último tratamento efectuado é feito após a saída do forno de recozimento. É aplicado às embalagens um tratamento que consiste num novo revestimento com tetracloreto de polietileno, para dar brilho à superfície externa e torna-las mais resistentes à ocorrência de riscos. Este, é feito à temperatura ambiente com bicos injectores que se deslocam transversalmente à mesa de saída do *Lehr* e vão aplicando nas embalagens uma emulsão baseada em polietileno, água e ar comprimido, tornando-as mais resistentes à ocorrência de riscos pela diminuição do atrito da sua superfície exterior (Fernandes, 2017).

2.2.3. Transformações físico-químicas na produção do vidro

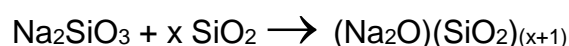
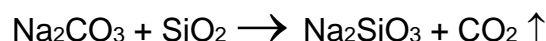
i) Transformações químicas e estruturais

Durante a transformação das matérias-primas tem lugar, de uma forma geral, as seguintes transformações (Maleiane, 2016):

- a) Formação de silicatos e carbonatos duplos;
- b) Dissociação dos carbonatos;
- c) Formação do primeiro fundido; e
- d) Dissolução do quartzo e outros compostos.

Dependendo do tipo de vidro produzido, estes processos têm lugar até uma temperatura máxima da ordem dos 1400-1500°C. Estes processos vão acontecendo mas sem que exista uma separação nítida das temperaturas onde os mesmos ocorrem num tanque de fusão.

O carbonato de sódio reage com dióxido de silício (sílica) a 1500°C produzindo silicato de sódio que reage moléculas de sílicas formando a estrutura do vidro.



Equação 1: Reacção básica de formação do vidro

ii) Transição vítrea

Todo material possui uma temperatura característica de fusão; por exemplo a da água é 0 °C, a do alumínio 660 °C, do mercúrio é -38 °C. Isto significa, que acima de sua temperatura de fusão (T_f) o estado em que o material vai estar é o líquido e abaixo é o sólido (Akerman, 2000). Observando na figura 2, no ponto A o material é um líquido estável. A medida em que ele se esfria até chegar sua temperatura de fusão (que neste caso pode ser dita de solidificação) ele se contrai, pois com menor temperatura menor é a agitação de suas moléculas, e uma mesma massa passa a

ocupar um espaço menor, ou seja, aumenta sua densidade. Na temperatura de fusão há uma enorme redução de volume, pois as moléculas que antes estavam soltas, rolando umas sobre as outras, que é a característica do estado líquido, passam a se ordenar na forma de cristais.

Após a completa cristalização do material, ele vai se encontrar no ponto C e uma continuação no resfriamento, novamente ocasiona uma redução ainda maior no agitação das suas moléculas, que se traduz em diminuição de volume ou aumento de densidade. A recta C D tem menor inclinação que a A B, pois no estado sólido os átomos arranjados na forma de cristais, tem menor liberdade de movimentação.

No ponto E, a viscosidade é tão alta que impossibilita qualquer movimentação de moléculas, umas em relação as outras, e portanto a cristalização. A partir deste ponto E o material embora continue com a característica de um líquido, isto é, suas moléculas amontoadas ao acaso sem um arranjo definido, ele passa a se comportar semelhantemente ao sólido cristalino. A temperatura de transição vítrea é justamente este ponto E. Abaixo dele o comportamento do material é de um sólido e é o vidro que conhecemos. Acima dele o comportamento é de um líquido. Porém, na passagem por este ponto não houve uma transformação como a cristalização que ocorre na temperatura de fusão.

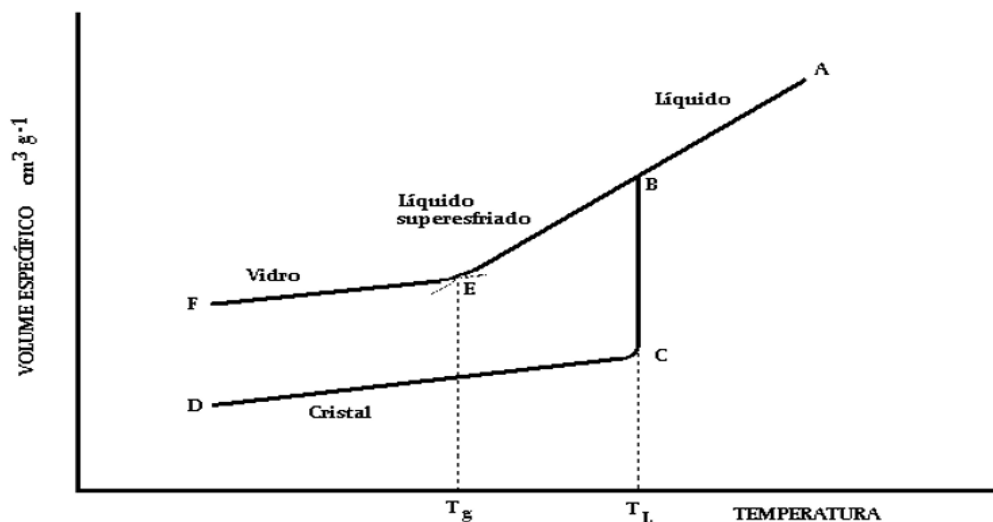


Figura 3: Transição vítrea. Fonte: (Akerman, 2000)

2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DO VIDRO

2.3.1. Impactos sobre a qualidade do ar

Considerando-se a cadeia completa do vidro, para as actividades de transformação e distribuição do vidro, as principais fontes de emissões estão associadas ao consumo de energia (associada aos fornos e processos de corte, entre outros) e ao consumo de combustível no transporte das matérias-primas, do produto acabado entre outras movimentações necessárias ao funcionamento da fábrica. As principais emissões da indústria vidreira são: o dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogénio (NO_x), material particulado, metais pesado.

Todas as fontes de emissão de poluentes atmosféricos, independentemente do tipo de vidro produzido, deverão possuir um plano de controlo de emissões de modo que os limites de emissão estabelecidos sejam atendidos também nas ocasiões de parada ou manutenção do equipamento de controlo. Esse plano pode incluir instalação de sistema de controlo de poluentes reservas, prazos máximos de parada, a redução da produção do forno ou medidas específicas de restrição decorrentes de condições meteorológicas.

As estimativas de emissões são realizadas com base em dados da actividade e conversões por balanço de massa, análise estequiométrica ou factores de emissão. São utilizados parâmetros e factores específicos que reflectem de forma mais precisa a realidade da empresa, sempre que estes estiverem disponíveis. É válido destacar que, se por um lado o uso de ferramentas tende a facilitar o cálculo das emissões de uma empresa, por outro, é preciso cuidado ao utilizá-las, pois eventualmente as premissas assumidas podem não reflectir da forma mais apropriada a realidade da empresa.

2.3.2. Impactos sobre a água

A água é um recurso importante para a produção de vidro, sendo utilizada nas etapas de lapidação, perfuração, lavagem e resfriamento dos vidros. Essa água é reutilizada diversas vezes até atingir o seu limite de saturação. Quando isso ocorre,

muitas vezes é dada uma destinação inadequada à esta água, que é jogada directamente na rede colectora ou no solo sem nenhum tipo de tratamento. Porém essa água pode passar pelo processo de decantação. Esse processo não garante a remoção total de resíduos, porém a água pode ser reutilizada pela empresa na lapidação ou no polimento, economizando água e dinheiro, já que a longo prazo a economia de água cobre o custo do seu tratamento (Feitosa *et al.*, 2017).

Devido às altas temperaturas, parte da água utilizada é perdida por evaporação durante os processos de resfriamento. O restante da água, contaminada por partículas de vidro, lubrificantes e óleos utilizados no processo é descartado podendo então ser submetida a um processo de purificação, para possivelmente ser reusada, ou despejada directamente na rede de esgoto, trazendo riscos ambientais (Feitosa *et al.*, 2017). Os contaminantes disponíveis exercem impacto negativo sobre os recursos aquáticos bem como para a saúde pública. Os cacos de vidro são cortantes constituindo um perigo para as pessoas que frequentam os cursos de água onde os efluentes da indústria vidreira são depositados.

2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO

Embora o vidro seja 100% reciclável ele não é biodegradável, tornando um grande problema ambiental quando é facilmente descartado, gerando um acúmulo de grande quantidade desse material e o mesmo não é absorvido pela natureza em aterros sanitários. Por não ser combustível, o método de incineração não é aconselhado para dar fim aos resíduos vítreos, e, se fundido a 1.500°C transforma-se em cinzas, cujo efeito abrasivo pode acarretar complicações nos fornos e equipamentos de transporte (Dias & Cruz, 2009). A metodologia adequada para a gestão de resíduos vítreos é:

- Reutilizar: reaproveitar o material vítreo em outra função. Ex: usar garrafas de vidro para conservar sementes.
- Retornar: embalagens retornáveis voltam para o processo de envase. Ex: garrafas de cerveja e refrigerantes.

- Reciclar: transformar materiais já usados, por meio de processo artesanal ou industrial, em novos produtos. Ex: o caco de vidro pode ser usado como matéria-prima para a fabricação de novas garrafas.

Uma gestão eficiente de resíduos vítreos deve incluir acções relacionadas à conscientização, segregação/colecta selectiva, acondicionamento, colecta, armazenamento, transporte e destinação final.

Na Cidade de Maputo, o vidro continua sendo um dos principais resíduos produzidos gerados pelos municípios, representando um peso de 7.5% na zona urbana e 2.8% na zona suburbana, do total dos resíduos produzidos, do total de cerca de 1500 toneladas diárias de resíduos produzidos. Nas lixeiras de Hulene e Mahlampsene, são colectadas por catadores cerca de 42 e 32 toneladas de garrafas de vidro por mês respectivamente, e outras 22 toneladas em ecopontos. Estas quantidades são elevadas, o que justifica a necessidade de se apostar em criação de empresas recicladoras de garrafas de vidro, sendo que actualmente os catadores vendem as garrafas para empresas sul-africanas. As quantidades de garrafas colectadas não representam a quantidade total de garrafas geradas, sendo que há muitas pessoas que deitam garrafas longe do alcance dos serviços de recolha de resíduos, devendo haver maior sensibilização ambiental e maior abrangência dos serviços municipais de recolha de resíduos sólidos, e fazendo uma colecta selectiva com vista a melhor recuperação de recicláveis.

Na Cidade de Maputo, o vidro ocupa uma percentagem significativa, chegando a perto de 8% na zona urbana e um máximo de 3,4% na zona suburbana, em um total de cerca de 1304,2 toneladas por dia, como pode se observar na Tabela 1. Os resíduos sólidos incluindo o vidro na Cidade de Maputo são depositados na lixeira de Hulene.

Tabela 1: Composição dos resíduos sólidos urbanos na Cidade de Maputo

Resíduos sólidos	Urbano		Suburbano	
	Época seca	Época chuvosa	Época seca	Época chuvosa
Papel, papelão e papel descartável	17,2	17,1	6,7	8,6
Borracha, couro	0,1	1,3	1,6	1,5
Têxteis	1,1	2,6	1,9	2,4
Vidro	7,7	7,0	3,2	3,4
Restos de alimentos	47,8	51,7	42	34,6
Madeira	1,2	2,2	0,0	2,6
Plástico	10,4	13,3	6,3	8,7
Metais	2,7	2,3	0,9	1,8
Cerâmica, pedra	0,1	0,0	0,1	0,9
Fracção fina	11,7	2,5	37,2	35,5
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: (Plano Director para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Maputo).

Na lixeira de Hulene existem catadores de lixo que separam o vidro e outro material reciclável para vender às empresas recicladoras com destaque para empresas sul-africanas. Porém sem existência de sistemas de colecta selectiva dos resíduos sólidos na Cidade Maputo, o problema dos resíduos vítreos ainda é preocupante.



Figura 4: Vidro recolhido por catadores para venda às empresas recicladoras

A gestão de resíduos sólidos depende da disponibilidade de instrumentos legais adequados e actualizados de acordo com as dinâmicas socioeconómicas e ambientais. Neste âmbito, Moçambique possui diversos instrumentos legais que visam contribuir para melhor gestão de resíduos sólidos das quais se destacam: *Constituição da República de 2018; Resolução 5/95 de 3 de Agosto, Política Nacional de Ambiente; Lei 20/97, de 1 de Outubro, Lei do Ambiente; Decreto n.º 94 /2014, de 31 de Dezembro de 2006, Regulamento sobre a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos*. O regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos, estabelece as regras de gestão dos resíduos sólidos urbanos no território de Moçambique e é aplicável a todas as pessoas singulares e colectivas, públicas e privadas que estejam envolvidas na produção e gestão de resíduos sólidos urbanos ou de resíduos industriais e hospitalares equiparados aos urbanos.

Apesar dos ricos instrumentos legais que Moçambique possui para a gestão de resíduos sólidos, a falta de recursos financeiros, humanos, materiais e uma educação ambiental adequada constituem um dos grandes desafios para os sistemas de gestão local dos resíduos sólidos, tornando-se necessário encontrar formas eficientes e pouco dependiosas para sua redução no meio ambiente. O destino final dos resíduos sólidos em Moçambique são as lixeiras a céu aberto e aterros controlados.

2.5. RECICLAGEM DE VIDRO

Na actualidade tem aumentado cada vez mais a quantidade de resíduos sólidos poluentes gerados nas actividades industriais e urbanas. Esta situação tem conduzido a sociedade à busca por novos métodos alternativos de deposição final, que sejam ambientalmente correctos e de baixo custo. Um caso particular são os resíduos sólidos de vidros que são gerados em enormes quantidades no mundo todo (Morais, 2013). Os resíduos sólidos de vidro podem ser reaproveitados para diferentes fins e de diferentes formas tal como (Garkida, 2007):

- Podem ser reutilizados para os seus fins originais;
- Podem ser reutilizados para fins diferentes dos originais;
- Podem ser usados como aditivos no fabrico de novos materiais vítreos

- Podem substituir a matéria-prima bruta no fabrico de novos vidros

A problemática da reciclagem de resíduos de vidros não é uma tarefa simples, principalmente para aqueles vidros que contêm quantidades significantes de metais pesados (Morais, 2013).

O vidro, entre os materiais de uso mais frequente em embalagens, é provavelmente o que apresenta maior facilidade para a reciclagem. Com efeito, o vidro, em termos teóricos, é 100% reciclável, e a mesma “unidade” de vidro pode ser aproveitada inúmeras vezes. Isso constitui uma grande vantagem do ponto de vista ambiental, não só pela economia de matérias-primas, como também pela menor geração de lixo urbano (Teixeira, 2015). De acordo com (Neto, *et al.*, 2014), os benefícios potenciais da reciclagem de vidros incluem:

- Redução no consumo de recursos naturais não renováveis. 1 tonelada de vidro reciclado representa economia de mais de 1 tonelada de matéria-prima;
- Utilização dos resíduos como substituto da matéria-prima virgem, resultando em redução de custos;
- Redução de áreas necessárias para aterro uma vez que os resíduos são utilizados novamente como bens de consumo;
- Reciclagem eco-eficiente para maximizar recursos e valorização de resíduos de vidro pós-consumo;
- Processo de reciclagem em ciclo fechado;
- Diminui a emissão de CO₂ (economia de carbono) e de outros gases com efeito estufa durante o processo de produção de vidro;
- Reduz o consumo de energia devido ao baixo ponto de fusão do caco/vidro se comparado com a matéria-prima bruta;
- A reciclagem de vidros não resulta em produção adicional de resíduos e subprodutos.

Nem todos os resíduos de vidro podem ser reciclados no mesmo processo, contudo, produtos vítreos como lâmpadas, monitores de computadores ou ecrãs de televisores, podem conter chumbo, mercúrio ou outras substâncias perigosas, precisando desta feita de desintoxicação prévia. Devido a diferentes propriedades

físicas, outros materiais como vidro temperado, não devem ser misturados com os outros vidros para a reciclagem.

Nem todo o vidro pode ser reciclado. A tabela 3 apresenta o material vítreo que pode ser reciclado e o que não pode ser reciclado.

Tabela 2: Material vítreo reciclável e não reciclável

Vidros recicláveis	Vidros não recicláveis
<ul style="list-style-type: none"> • Garrafas de bebida alcoólica e não alcoólica (refrigerantes, cerveja, suco, água, vinho, etc) • Frascos em geral (molhos, condimentos, remédios, perfumes e produtos de limpeza) • Potes de produtos alimentícios • Cacos de embalagens 	<ul style="list-style-type: none"> • Espelhos, vidros de janela e box de banheiro, lâmpadas, cristal. • Ampolas de remédios, formas, travessas e utensílios de mesa de vidro temperado. • Vidros de automóveis • Tubos de televisão e válvulas

Fonte (Dias & Cruz, 2009)

A reciclagem do vidro pode ser dividida nas seguintes etapas: colecta dos resíduos sólidos, separação e retirada dos contaminantes, moagem dos cacos.

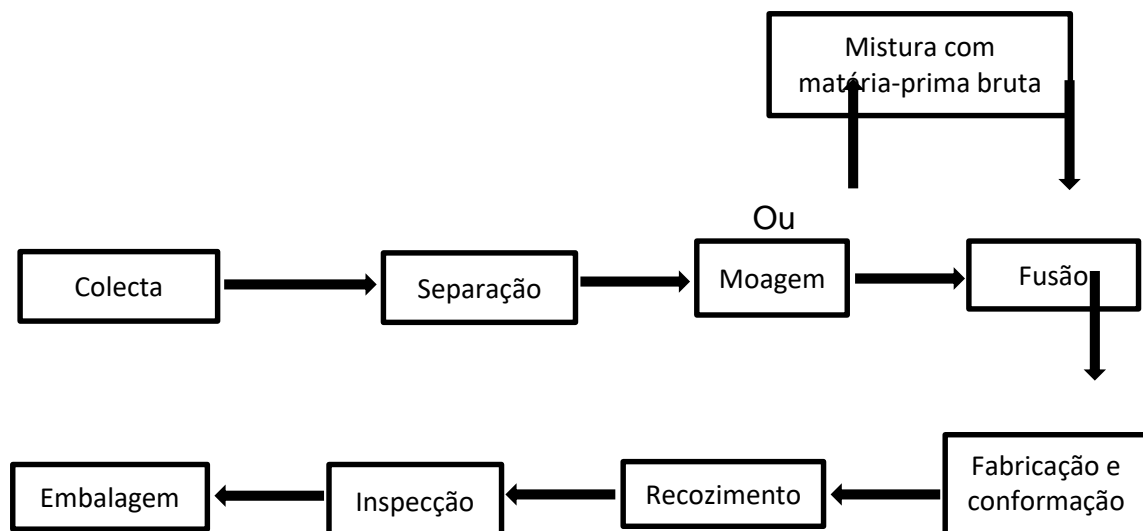


Figura 5: Fluxograma do processo de reciclagem de vidro. Fonte: (Soares, 2018)

A colecta de resíduos sólidos de vidro deve ser selectiva de modo a facilitar as etapas subsequentes do processo de reciclagem. Esta pode ser feita pelas

empresas recicladoras ou por catadores de lixo que depois vendem às empresas recicladoras. Devido a natureza cortante dos cacos de vidro, estes devem ser manuseados com todo o cuidado.

Após o processo de colecta, segue-se a separação, etapa de remoção dos contaminantes (metais, cerâmicas, espelhos, tampas, rótulos, materiais orgânicos, entre outros) e separação granulométrica. Os cacos de vidros, para serem utilizados novamente na indústria, não podem apresentar contaminantes, pois eles comprometem a etapa de derretimento no forno de fusão, gerando problemas no produto final. Após a separação de contaminantes, o vidro é submetido à operação de limpeza. Tanto a operação de separação quanto a de lavagem são realizadas manual e mecanicamente. Os vidros utilizados em embalagens necessitam passar também por uma triagem de separação de cor.

Depois da separação e limpeza ocorre a etapa de moagem. O material é levado a um moinho industrial através de esteiras rolantes, transformando-o em cacos de vidros. O vidro moído pode ser fundido sem adição de matéria-prima bruta ou com adição desta para produzir novos materiais. Na etapa de fundição, os cacos de vidros são transportados até o forno para serem adicionados à composição ou mistura vitrificável do vidro virgem previamente preparada em um misturador. Estes fornos são fabricados com materiais refractários capazes de suportarem as altas temperaturas. Após ser fundido, ocorre a etapa de fabricação do vidro. A conformação é a operação de obtenção da embalagem final com a forma pretendida. Esta operação pode ser realizada por meio dos processos soprado-soprado ou prensa do soprado. Após a conformação segue-se o recozimento.

2.6. FRITAS CERÂMICAS

As fritas cerâmicas são materiais vítreos, de aparência similar a qualquer vidro encontrado no cotidiano, diferindo-se apenas em composição. A formulação de uma frita deve levar em consideração a acção de determinados componentes no resultado final de suas propriedades físico-químicas.

Os principais constituintes das fritas, de acordo com seu mecanismo de acção, são: vitrificantes (SiO_2 , B_2O_3); fundentes (Na_2O , K_2O , PbO_2 , B_2O_3 , Li_2O);

estabilizantes (CaO, BaO, MgO, PbO, Al₂O₃, ZnO); opacificantes (ZrO₂, SnO₂, TiO₂); divitrificantes (ZnO, CaO, BaO, MgO, TiO₂) (Serpa, 2007).

2.6.1. Processo de produção de fritas cerâmicas

As fritas cerâmicas são produzidas através de matérias-primas de natureza mineral (quartzo, feldspatos, caulins, etc) e óxidos diversos. Sua obtenção ocorre através da mistura desses componentes em temperaturas próximas a 1500°C, formando uma massa vítrea, com posterior resfriamento em água, ou, ar (Avancini, 2016). No resfriamento à água, a massa fundida transborda o nível da câmara caindo da cortina em um depósito com água à temperatura ambiente de onde solidifica e rompe em pequenos pedaços. O contacto brusco da frita com a água dá àquela um aspecto granulado e esponjoso. A água de resfriamento, dado seu contacto íntimo com a frita, dissolverá todos aqueles componentes solúveis em água que não alcançaram a insolubilização no processo do fritado. No resfriamento a ar, a frita fundida faz-se passar através de dois rodilhos laminadores refrigerado em seu interior por ar (Serpa, 2007).

As operações unitárias envolvidas na produção de fritas são relativamente simples: mistura, fusão e resfriamento. As várias matérias-primas na composição da frita são colocadas nos silos de armazenamento, após ser feito o controlo de qualidade. A dosagem normalmente é efetuada de forma automática e a mistura dos vários componentes é feita a seco. O tempo e a temperatura de queima dependerão do tipo de frita a ser produzido, mas a temperatura não deve ser tão alta ao ponto de perder grandes quantidades de certos óxidos voláteis. Ao contrário da fabricação do vidro, não é necessário eliminar todas as bolhas de gás da massa vítrea. O tempo de queima pode ser então reduzido ao ponto no qual o fundido tenha reagido a um grau aceitável (Caldas, 2012).

2.6.2. Tipos de fritas cerâmicas

As fritas cerâmicas são classificadas segundo vários critérios de acordo com as suas características principais, conforme a descrito a seguir (Serpa, 2007):

a) Segundo ao tipo de produto a que vão ser destinadas: fritas para produtos de monoqueima porosa, fritas para produtos de biqueima tradicional, fritas para produtos de biqueima rápida, fritas para produtos de monoqueima grés, fritas corretoras, modificadoras, etc.

b) Segundo o óxido fundente principal que compõe a fritas: fritas de chumbo, fritas alcalinas, fritas alcalino térreas, fritas borácicas, fritas de zinco.

c) Segundo o efeito produzido no vidrado final: fritas transparentes de chumbo, fritas transparentes sem chumbo, fritas opacas, fritas mates, fritas coloridas em fusão.

2.6.3. Aplicação das fritas cerâmicas

As fritas cerâmicas constituem-se actualmente como as principais matérias-primas dos esmaltes utilizados no sector de revestimentos cerâmicos e também encontram aplicações em outros sectores industriais. As fritas fundentes são usadas na preparação de vidros coloridos, esmaltes de biqueima tradicional e rápida, corantes serigráficos reactivos e de terceira queima (Reges, 2015). Segundo (Serpa, 2007), as fritas são aplicadas na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo, tendo por finalidade aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características.

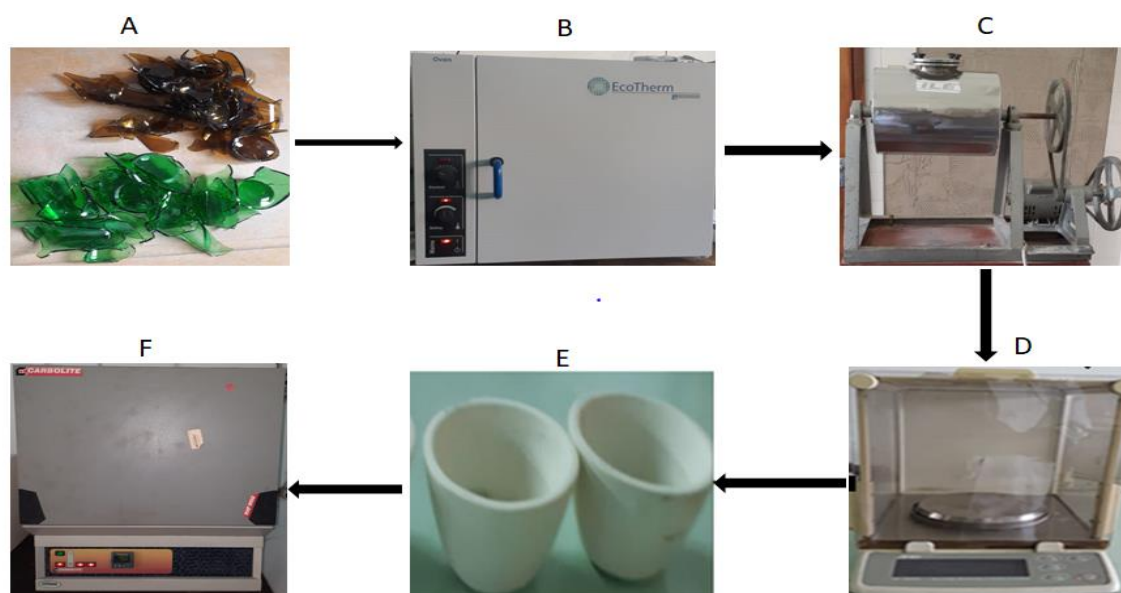
A razão fundamental para a utilização de fritas é converter os componentes solúveis em água, presentes nas matérias-primas que serão utilizadas para obter os recobrimentos cerâmicos, em um vidro insolúvel mediante a fusão com outros componentes (Sanches, 1997).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS USADOS

Foram usados cacos de vidro de construção, garrafas de cerveja de cor castanha e de cor verde provenientes da lixeira de Hulene. Para além dos cacos de vidro foi usado o carbonato de lítio como fonte de óxido de lítio (fundente), para diminuir o ponto de fusão do vidro. Foram também usados, água, ácido sulfúrico, hidróxido de sódio, água destilada.

Antes do início do processo usou-se equipamentos de protecção individual, nomeadamente, calças jeans, luvas, bata branca, sapatilhas. Para a fusão dos cacos de vidro foi usado um forno eléctrico de marca *Termolab*. A pesagem das amostras foi feita usando uma balança de marca *AND HF*. Para a trituração dos cacos de vidro foi usado um moinho de bolas de marca *ILE An*. A secagem das mostradas foi feita usando uma estufa. Os vidros moídos foram colocados em cadinhos para serem levados ao forno. Outros equipamentos usados foram: balde, pinça metálica, crivo, paquímetro digital, bequeres. Para a determinação do volume do vidro de modo a calcular a densidade foi usada uma proveta graduada.



A – cacos de vidro, B – estufa, C – moinho de bolas, D – balança, E – cadinhos, F – forno eléctrico

Figura 6: Materiais usados para a produção das fritas cerâmicas

3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.2.1. Fusão dos cacos de vidros para produção de fritas cerâmicas

A Figura 7 apresenta as principais etapas seguidas para a produção das fritas cerâmicas a partir dos cacos de vidro.

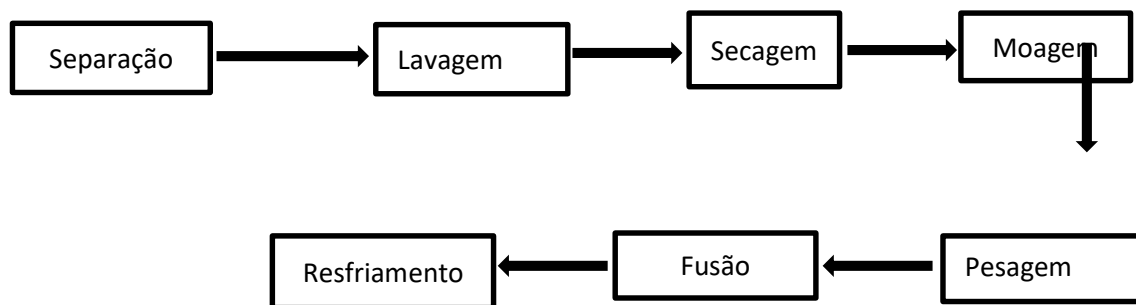


Figura 7: procedimentos experimentais

Foram preparadas e fundidas nove amostras, nomeadamente cacos de vidro, castanho, verde e de construção, das quais, três sem fundente, três com carbonato de lítio e três com carbonato de cálcio.

O primeiro passo consistiu na separação manual dos cacos de vidro agrupando-os em três categorias, nomeadamente, cacos de vidros de construção, cacos de garrafas de cerveja de cor verde e cacos de garrafas de cerveja de cor castanha. Depois de separar os cacos em cores, fez-se a lavagem dos vidros para a retirada de contaminantes, incluindo rótulos. Os cacos de vidros, não podem apresentar contaminantes, pois eles comprometem a etapa de derretimento no forno de fusão, gerando problemas no produto final. Após a lavagem, os cacos foram levados a secar na estufa por 1 (uma) hora, de modo a evitar que a água usada na lavagem interferisse no processo de fusão comprometendo o produto final. A secagem foi realizada a uma temperatura de 110 °C, evitando temperaturas altas para não alterar as propriedades dos cacos. De modo a facilitar a fusão, os cacos foram triturados no moinho de bolas, tendo os cacos castanho moídos por um tempo de 40min 46s e 19 centésimos; os cacos verdes em 38min 58s e 51 centésimos; os cacos de vidro de construção em 37min 30s e 52 centésimos. Para cada amostra foram usados 500g, dos quais depois da moagem passaram para 457,029g do vidro castanho, 372,953g do vidro de construção e 378,436g do vidro verde. Os ensaios

foram feitos com os cacos de vidro sem fundente e foram repetidos já com carbonato de lítio e depois com carbonato de cálcio.



Figura 8: Vidro moído

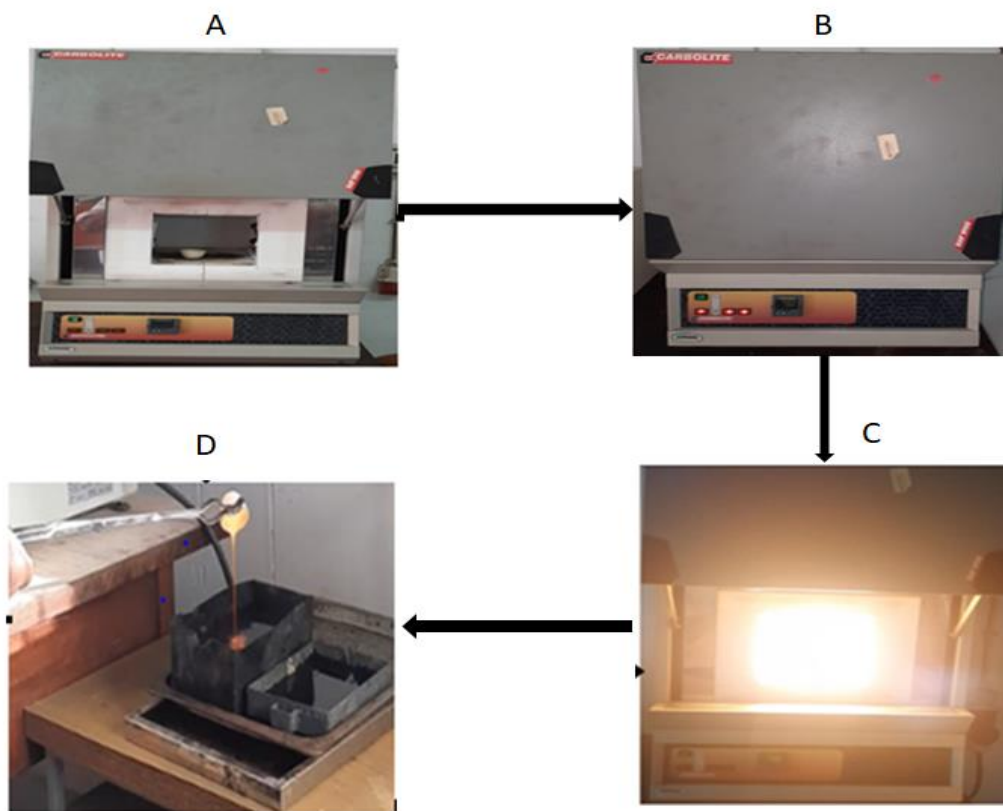
Os vidros triturados (em pó) foram separados em crivo e depois colocados em cadinhos e levados ao forno de fusão. Para o caso em que se usou carbonato de lítio, foram usados 30g de caco moído e 10g de carbonato de lítio. Para o caso sem fundente, foram usados 40g de cacos de vidro para cada amostra.

Tabela 3: Quantidades de vidro processados

Vidro	Tempo de moagem (s)	Moagem		Separação através de crivo	
		Antes	Depois	Antes	Depois
Vidro castanho	2446,19	500	498,463	498,463	457,029
Vidro verde	2338,51	500	499,094	499,094	384,436
Vidro de construção	2220,30	500	499,463	499,463	372,953

Após os vidros estarem fundidos, retirou-se os cadinhos do forno (usando uma pinça metálica) e derramados dos em água (vidro de construção e castanho com

carbonatos de cálcio e lítio) e outros em óleo (vidro verde com carbonatos de cálcio e lítio) para resfriamento rápido, gerando fritas cerâmicas.



A – forno aberto com cadinho, B – forno fechado com cadinho, C – forno aberto para retirada de cadinho, D – vidro fundido a ser derramado para resfriar

Figura 9: Fusão e retirada dos vidros

3.2.2. Determinação da densidade

Para determinar a densidade, foram tomadas aleatoriamente algumas das fritas cerâmicas produzidas dos três tipos de vidro (vidro castanho, vidro verde e vidro de construção). De seguida cada amostra de frita escolhida foi pesada na balança e registou-se as massas. Em provetas graduadas foram colocados 7 mililitros de água. Após determinar as massas, as amostras foram colocadas nas provetas com água. A presença das fritas na proveta causou o deslocamento da água registando-se o novo volume. Os volumes das fritas correspondem a diferença entre o volume final e o volume inicial de 7 ml. Com a massa e o volume das fritas foi possível determinar a densidade usando a equação 2. Foram determinadas as densidades de cacos de vidro antes da fusão, de fritas cerâmicas resultantes da fusão de cacos

com carbonato de lítio e fritas cerâmicas resultantes da fusão de cacos de vidro com carbonato de cálcio.

$$\rho = \frac{m}{\Delta V}$$
$$\Delta V = V_2 - V_1$$

Onde: V_1 , é o volume da água antes de se colocar o vidro, V_2 , é o volume depois de se colocar o vidro. ΔV , representa o volume do vidro.

Equação 2: formulas para determinar a diferença de volumes e densidade

3.2.3. Avaliação do ataque químico do vidro

Para a avaliação do ataque químico, foram preparados os vidros produzidos no formato de pequenos pedaços. Em seguida, foram lavados com água destilada. Depois da lavagem, as amostras foram levadas a secar na estufa a 110°C por 1 hora. As amostras secas foram pesadas na balança para registrar as massas antes do ataque químico. Em três bequeres foram introduzidos separadamente 16 mililitros de soluções de HCL (com pH igual a 4, ou seja, solução ácida), NaOH (com pH igual a 9, ou seja, solução básica) e no último, água destilada (com pH igual a 7, solução neutra), tendo sido deixadas a temperatura ambiente. As fritas colocadas nas soluções, foram sendo retiradas, e pesadas novamente, tendo-se registrado as massas depois de, 1, 2, 4, 24 e 168 horas. As pesagens foram feitas depois de lavadas e secas na estufa em 1 hora a 110 °C. A resistência ao ataque químico será determinada pela perda de massa das amostras.



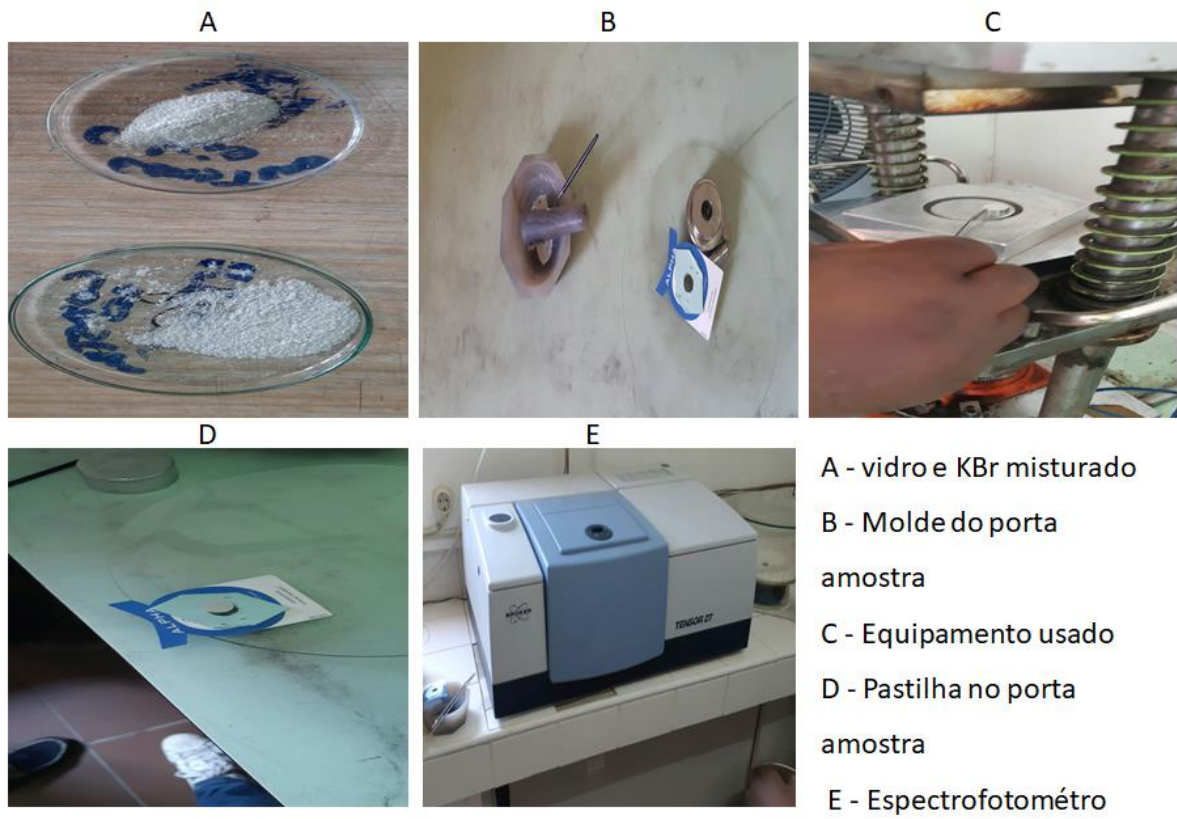
Figura 10: Ensaio de determinação do ataque químico

3.2.4. Análise qualitativa espectrofotométrica (FT-IR)

A técnica instrumental referida para o controlo de qualidade do vidro, a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) é muito utilizada para identificar determinado composto ou investigar a composição de uma amostra. Sendo assim, a espectroscopia de infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção na qual utiliza, tal como o nome indica, a região do infravermelho do espectro electromagnético. Tal como acontece com outros tipos de espectroscopia de absorção, as moléculas de uma determinada amostra são excitadas para um estado de energia mais elevado quando absorvem a radiação infravermelha. (Silva, 2014).

Quanto as características associadas a transição as amostras podem ser classificadas como: *Quanto a intensidade de absorção*: Pode ser classificado como um efeito hipocrômico pós a análise gráfica apresenta um decréscimo da intensidade de absorção; *deslocamento dos comprimentos de onda*: Pode ser classificado como batocrômico ou deslocamento para o vermelho por apresentar um de intensidade da absorvância decrescente em função do crescimento do comprimento de onda; *Auxocromismo*: por apresentar maior intensidade de absorvância nos menores comprimentos de onda e assim estabelecer a sua zona de cromóforos (zona de identificação dos compostos orgânicos de maior predominância).

O equipamento utilizado para análises de espectros infravermelhos é um espectrómetro de infravermelho com a transformada de Fourier, o mesmo equipamento foi utilizado com a capacidade de suporte para as amostras Líquidas e sólidas, com pastilhas de Brometo de Potássio (KBr) que foi usado para misturar com a amostra de vidro em pó, sendo a análise no intervalo na ordem de 4000-650 cm^{-1} , segundo a bibliografia que rege o manuseio do equipamento. (Silva, 2014).



A - vidro e KBr misturado
 B - Molde do porta amostra
 C - Equipamento usado
 D - Pastilha no porta amostra
 E - Espectrofotômetro

Figura 11: Materiais e equipamentos usados para a análise espectrofotométrica

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PRODUÇÃO DAS FRITAS CERÂMICAS

A Tabela 4 apresenta as quantidades das matérias-primas usadas, bem como dos produtos finais e a temperatura de fusão das amostras.

Tabela 4: Quantidades das matérias-primas levadas ao forno

Amostra	Temperatura de fusão (°C)	Peso antes da fusão (g)		Peso depois da fusão (g)		
		Caco	Fundente	Vidro castanho	Vidro verde	Vidro de construção
Sem fundente	1400	40	-	35,195	35,017	35,017
Com carbonato de lítio	1200	30	10	35,826	35,760	38,008
Com carbonato de cálcio	1200	30	10	36,546	35,984	35,751

A fusão do vidro sem fundente para além de ter acontecido a uma temperatura elevada de 1400°C, resultou em um produto final que ficou grudado no cadinho. A fusão dos vidros com fundentes (carbonatos de lítio e cálcio) aconteceu a 1200°C, e o produto não ficou grudado no cadinho, tendo apresentado melhor aspecto visual. O processo de fusão levou meia hora para todas as amostras.

Durante as operações de preparação das amostras, e da fusão notou-se a redução das quantidades de vidro tomadas inicialmente antes da moagem. Essa redução mostra que apesar de se considerar o vidro como um material 100% reciclável, deve-se considerar as quantidades que eventualmente são perdidas ao longo das operações unitárias de preparação das amostras. O vidro de maior tamanho separado no crivo, pode ser remoído, uma vez não se tratar de impurezas. Por conta da adesão do vidro sem fundente ao cadinho, o vidro de construção causou a destruição do cadinho.

Apesar do mesmo tempo de fusão, as amostras com fundentes fundiram a uma temperatura mais baixa quando comparadas com as amostras sem o fundente, pois, os carbonatos de lítio e de cálcio, fornecem os respectivos óxidos que baixam a temperatura de fusão do vidro. Esta diferença de temperatura permite reduzir o consumo de energia. Por outro lado os vidros sem fundente, ficaram grudados aos cadinhos, pois, para além de baixarem a temperatura de fusão, o lítio e o cálcio têm também o papel de modificar a estrutura do vidro alterando a sua viscosidade. Para além dos óxidos de lítio e de cálcio, outros óxidos como os de sódio, potássio, magnésio e bário podem servir também como fundentes e modificadores da estrutura. Isso mostra que esses aditivos usados na fabricação de vidro a partir da matéria-prima bruta, são também necessários na reciclagem para melhorar a qualidade do produto final, e reduzir os custos de produção, sobretudo pela redução do consumo de energia.

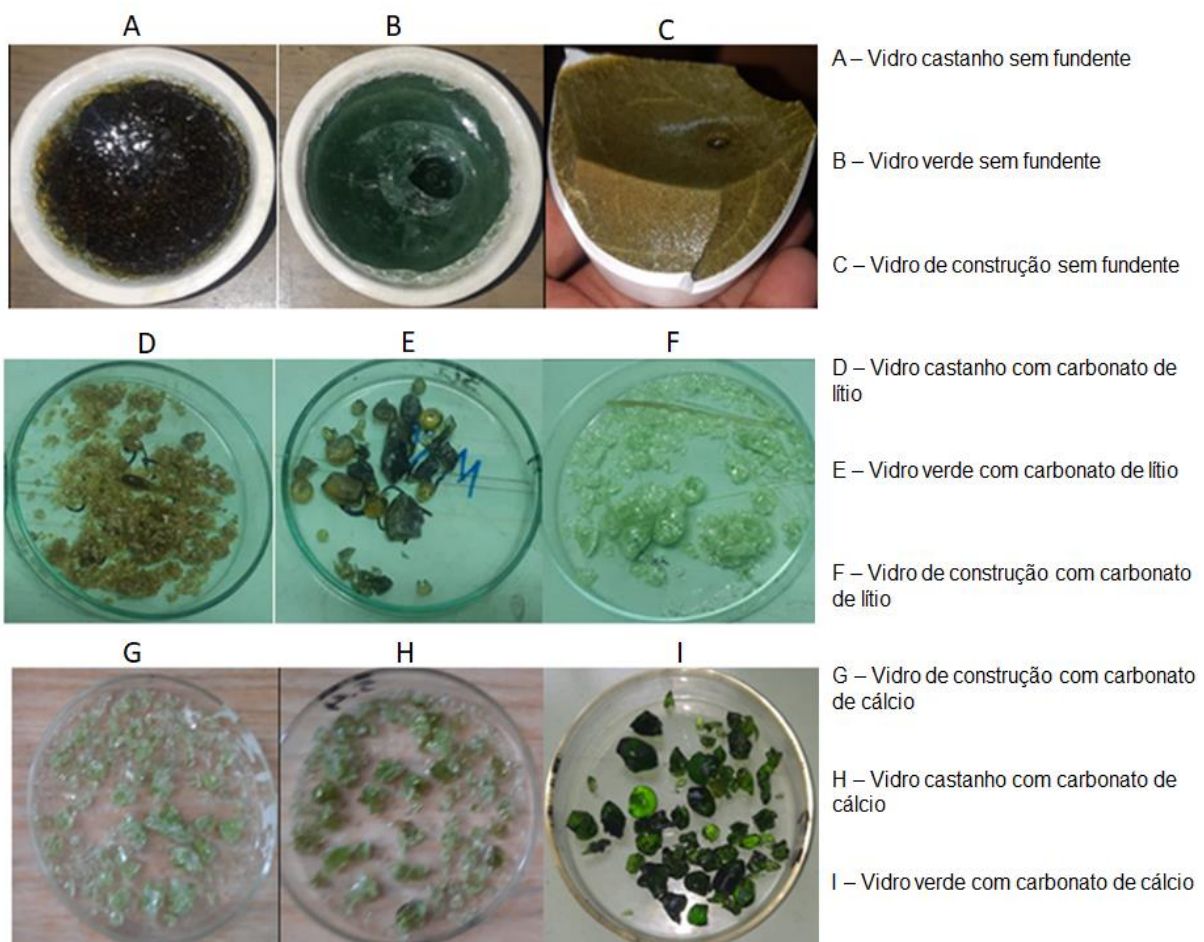


Figura 12: Fritas cerâmicas produzidas

4.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Foram determinadas as densidades de cacos de vidro antes de serem fundidos e depois de serem fundidos com a presença de carbonatos de lítio e cálcio. A Tabela 5 apresenta os resultados da determinação da densidade dos cacos de vidro antes de serem fundidos. Para cada tipo de vidro, tem-se as densidades de cada amostra, e a partir desses determinou-se a média.

Tabela 5: Densidades de vidro antes da fusão.

Vidro castanho						
Massa (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ΔV (ml)	Densidade (ρ) (g/ml)	Densidade média (g/ml)	
0,228	7,000	7,100	0,100	2,280	2,430	
0,251	7,000	7,100	0,100	2,510		
0,250	7,000	7,100	0,100	2,500		
Vidro de construção						
0,166	7,000	7,100	0,100	1,600	1,700	
0,269	7,000	7,200	0,200	1,345		
0,431	7,000	7,200	0,200	2,155		
Vidro verde						
0,260	7,000	7,100	0,100	2,600	2,127	
0,208	7,000	7,100	0,100	2,080		
0,170	7,000	7,100	0,100	1,700		

A Tabela 6 e 7 apresentam os resultados de determinação da densidade das fritas cerâmicas produzidas a partir da fusão de cacos de vidro com adição de carbonato de lítio e cálcio como fundente.

Tabela 6: Densidades das fritas cerâmicas de cacos de vidro com adição de carbonato de lítio.

Fritas de vidro castanho com carbonato de lítio						
Massa (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ΔV (ml)	Densidade (ρ) (g/ml)	Densidade média (g/ml)	
0,658	7,000	7,200	0,200	3,290	2,597	
0,924	7,000	7,400	0,400	2,310		
1,096	7,000	7,500	0,500	2,192		

Fritas de vidro de construção com carbonato de lítio					
0,920	7,000	7,500	0,500	1,840	
0,595	7,000	7,300	0,300	1,983	1,811
0,322	7,000	7,200	0,200	1,610	

Fritas de vidro verde com carbonato de lítio					
0,928	7,000	7,400	0,400	2,320	
0,659	7,000	7,300	0,300	2,197	2,166
0,396	7,000	7,200	0,200	1,980	

Tabela 7: Densidades das fritas cerâmicas de cacos de vidro com adição de carbonato de cálcio.

Fritas de vidro castanho com carbonato de cálcio					
Massa (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ΔV (ml)	Densidade (ρ) (g/ml)	Densidade média (g/ml)
0,555	7,000	7,400	0,400	3,290	
0,637	7,000	7,500	0,500	2,310	2,597
0,384	7,000	7,300	0,300	2,192	

Fritas de vidro de construção com carbonato de cálcio					
0,202	7,000	7,100	0,100	2,020	
0,366	7,000	7,200	0,200	1,830	1,794
0,460	7,000	7,300	0,300	1,533	

Fritas de vidro verde com carbonato de cálcio					
0,395	7,000	7,200	0,200	1,975	
0,257	7,000	7,100	0,100	2,570	2,212
0,209	7,000	7,100	0,100	2,090	

De acordo com Barros (2010), a densidade de fritas de vidro é muito variável mas o valor aceitável na literatura é de 2,5 g/ml. Para as fritas de vidro castanho o valor é de 2,59 g/ml. Assim sendo, para as fritas de vidro castanho, a densidade experimental está mais próxima do valor da literatura. De acordo com Giacomini (2000), os vidros com chumbo possuem uma densidade que varia de 3 a 6, o que justifica que a variação da densidade do vidro tem a ver com o tipo de matéria-prima com que é fabricado o vidro.

A densidade do vidro é uma importante propriedade a ser determinada, uma vez que, a sua variação pode significar mudança na estrutura de rede e no número de coordenação. A sua alteração pode ser originada por várias causas dentre as quais se destacam: a formação de bolhas, sua composição, tempo de preparo no forno e no tratamento térmico, taxa de resfriamento, tamanho da amostra, molde e se houve cristalização ou não (Silva, 2013). Porém, as alterações na estrutura só podem ser confirmadas utilizando outras técnicas de caracterização.

O gráfico 2 mostra a diferença entre as densidades dos cacos de vidros e as fritas de vidros fundidos com carbonatos de cálcio e de lítio como fundentes.

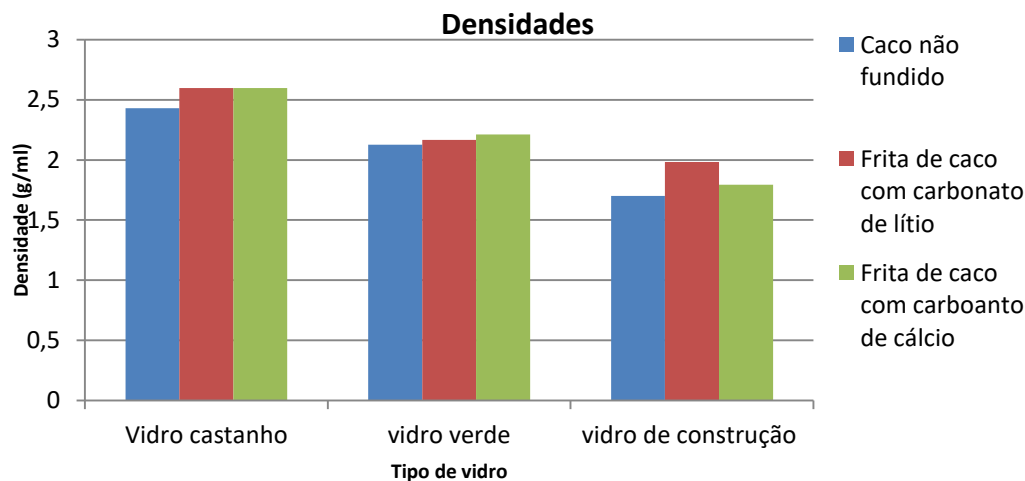


Gráfico 2: Diferença de densidades antes e depois da fusão

Através do gráfico 1 nota-se que as densidades dos vidros não tiveram uma significativa variação mesmo depois de serem fundidos. Porém, apesar de a variação ter sido ligeira, nos três tipos de vidro verificou-se uma tendência para subir, o que mostra a contribuição do fundente para o aumento da densidade. Assim sendo, tomando como base a densidade pode concluir-se que a reciclagem do vidro não provoca alteração significativa das suas propriedades. O ligeiro aumento da densidade pode também ser causado pela perda durante a fusão e secagem, de líquidos e gases absorvidos pelos cacos.

4.3. AVALIAÇÃO DO ATAQUE QUÍMICO

4.3.1. Ataque químico às fritas produzidas usando carbonato de lítio como fundente

a) Vidro castanho

A tabela 9 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro castanho, realizados em meios, ácido (pH=4), neutro (pH=7) e básico (pH=9).

Tabela 8: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de lítio

Vidro castanho					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,496	0,496	0,000	0,00
	7	0,416	0,416	0,000	0,00
	9	0,517	0,517	0,000	0,00
2	4	0,217	0,217	0,000	0,00
	7	0,412	0,412	0,000	0,00
	9	0,354	0,354	0,000	0,00
4	4	0,205	0,204	0,001	0,49
	7	0,303	0,301	0,002	0,66
	9	0,241	0,239	0,002	0,83
24	4	0,545	0,540	0,005	0,92
	7	0,424	0,420	0,004	0,94
	9	0,275	0,272	0,003	1,09
168 (uma semana)	4	0,623	0,615	0,008	1,28
	7	0,448	0,440	0,008	1,77
	9	0,300	0,293	0,007	2,33

O gráfico 3 apresenta a

$$\text{Peso perdido} = \text{Peso inicial} - \text{Peso final}$$
$$\% \text{ peso perdido} = \frac{\text{Peso perdido}}{\text{Peso inicial}} \times 100\%$$

perda

de peso do vidro castanho nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. Observando o gráfico, nota-se que a perda de peso em uma semana esteve abaixo de 2,5 %. A perda de peso foi observada a partir de quatro horas para todas as soluções.

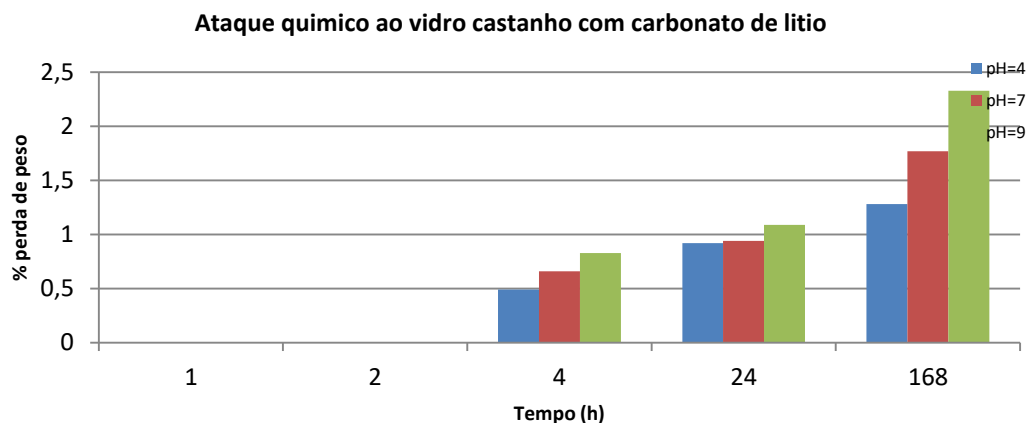


Gráfico 3: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de lítio

b) Vidro verde

A Tabela 9 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro verde, realizados em meios, ácido (pH=4), neutro (pH=7) e básico (pH=9).

Tabela 9: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de lítio

Vidro verde					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% peso perdido
1	4	0,502	0,502	0,000	0,00
	7	0,457	0,457	0,000	0,00
	9	0,908	0,908	0,000	0,00
2	4	0,310	0,310	0,000	0,00
	7	0,512	0,511	0,001	0,19
	9	0,455	0,454	0,001	0,22
4	4	0,922	0,919	0,003	0,33
	7	0,512	0,509	0,003	0,59
	9	0,554	0,550	0,004	0,72
24	4	0,514	0,509	0,005	0,97
	7	0,524	0,518	0,006	1,15
	9	0,344	0,339	0,005	1,45
168 (uma semana)	4	0,641	0,630	0,021	1,72
	7	0,505	0,495	0,010	1,98
	9	0,749	0,731	0,018	2,40

O gráfico 4 apresenta a perda de peso do vidro verde nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana esteve

abaixo de 2,5%. Só a partir de duas horas registou-se uma ligeira perda de peso nas soluções básica e neutra.

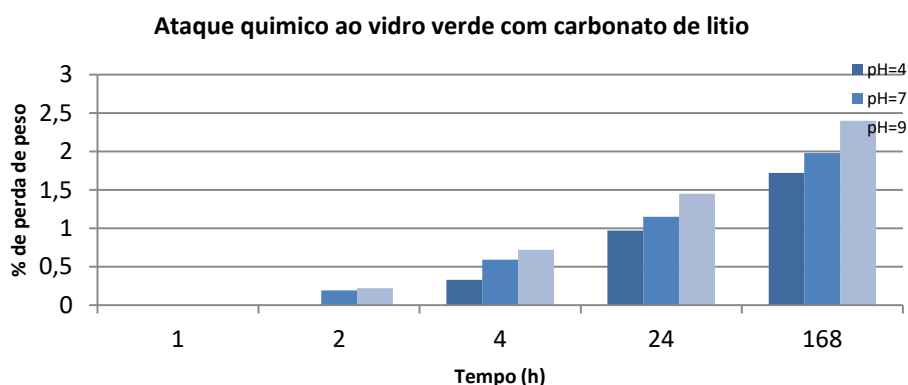


Gráfico 4: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de lítio

c) Vidro de construção

A Tabela 10 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro de construção, realizados em meios, ácido (pH=4), neutro (pH=7) e básico (pH=9).

Tabela 10: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de lítio

Vidro de construção					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,309	0,309	0,000	0,00
	7	0,459	0,459	0,000	0,00
	9	0,298	0,298	0,000	0,00
2	4	0,029	0,029	0,000	0,00
	7	0,631	0,630	0,001	0,16
	9	0,406	0,405	0,001	0,24
4	4	0,411	0,410	0,001	0,24
	7	0,894	0,891	0,003	0,33
	9	0,343	0,341	0,002	0,58
24	4	0,412	0,409	0,003	0,73
	7	0,494	0,490	0,004	0,80
	9	0,545	0,540	0,005	0,92
168 (uma semana)	4	0,407	0,402	0,005	1,23
	7	0,324	0,319	0,005	1,54
	9	0,319	0,313	0,006	1,88

O gráfico 5 apresenta a perda de peso do vidro de construção nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. Começou-se a verificar uma ligeira perda de peso a partir de duas horas, somente nas soluções, neutra e básica.

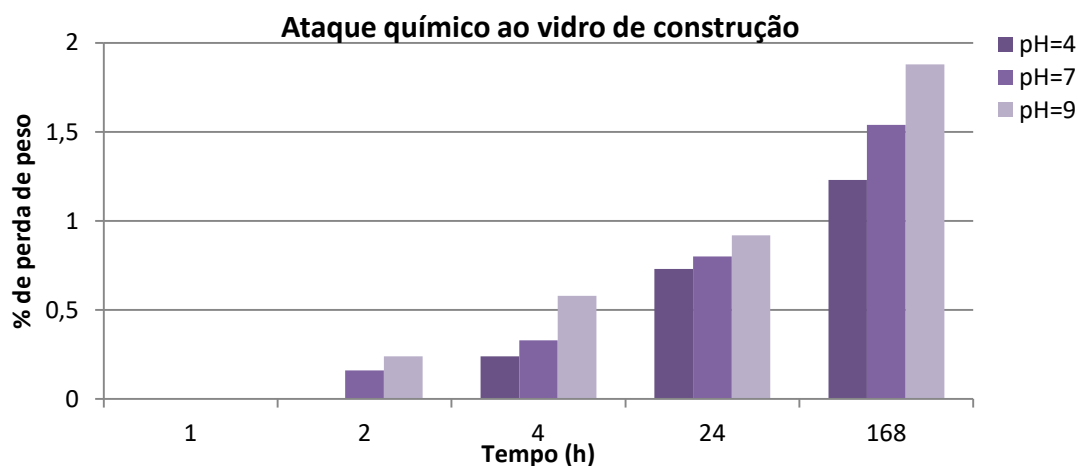


Gráfico 5: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de lítio

Para os três tipos de vidro, verificou-se uma tendência de aumento da perda de peso com o aumento do pH, o que significa que o vidro é mais resistente em meio ácido e menos resistente em meio básico. Em meio alcalino, o ataque ao vidro é muito mais rápido em relação ao meio ácido ou neutro, pois o predomínio de OH^- produz a destruição da rede vítrea por meio da ruptura das ligações principais (Marçal, 2011).

4.3.2. Ataque químico às fritas produzidas usando carbonato de cálcio como fundente

a) Ataque químico ao vidro castanho

A Tabela 11 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro de castanho, realizados em meios, ácido, neutro e básico.

Tabela 11: Ataque químico ao vidro de castanho com carbonato de cálcio

Vidro castanho					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,649	0,649	0,000	0,00
	7	0,542	0,542	0,000	0,00
	9	0,455	0,455	0,000	0,00
2	4	0,243	0,243	0,000	0,00
	7	0,410	0,410	0,000	0,00
	9	0,302	0,302	0,000	0,00
4	4	0,348	0,346	0,002	0,57
	7	0,430	0,427	0,003	0,70
	9	0,375	0,372	0,003	0,80
24	4	0,347	0,342	0,004	1,44
	7	0,219	0,215	0,004	1,83
	9	0,666	0,651	0,015	2,25
168 (uma semana)	4	0,337	0,325	0,012	3,56
	7	0,559	0,535	0,024	4,29
	9	0,406	0,386	0,020	4,92

O gráfico 5 apresenta a perda de peso do vidro verde nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana esteve ligeiramente abaixo de 5%. Só a partir de quatro horas começou a registrar-se uma ligeira perda de peso.

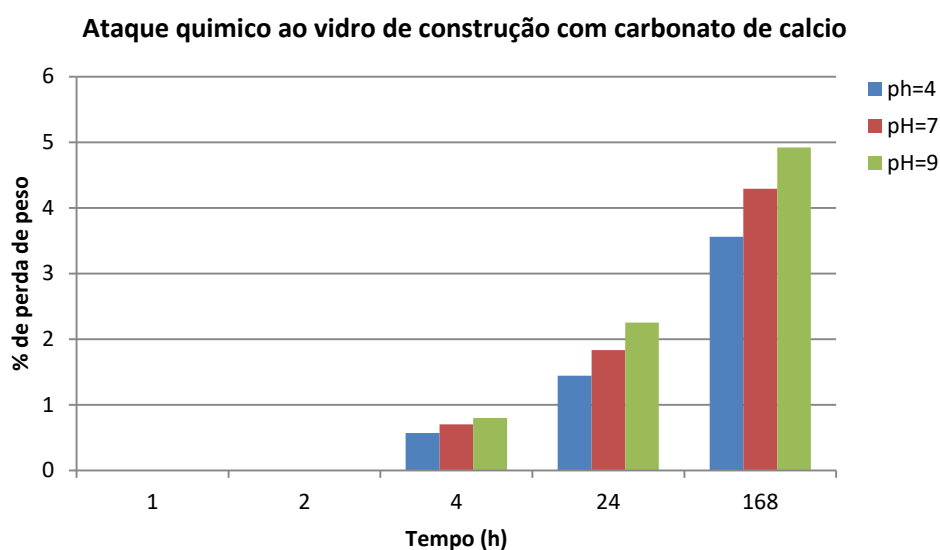


Gráfico 6: Ataque químico ao vidro castanho com carbonato de cálcio

b) Ataque químico ao vidro verde

A Tabela 12 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro verde, realizados em meios, ácido (pH=4), neutro (pH=7) e básico (pH=9).

Tabela 12: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de cálcio

Vidro verde					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% peso perdido
1	4	0,395	0,395	0,000	0,00
	7	0,257	0,257	0,000	0,00
	9	0,209	0,209	0,000	0,00
2	4	0,398	0,398	0,000	0,00
	7	0,525	0,524	0,001	0,19
	9	0,481	0,480	0,001	0,21
4	4	0,438	0,436	0,002	0,46
	7	0,472	0,469	0,003	0,64
	9	0,388	0,384	0,004	1,03
24	4	0,854	0,844	0,010	1,17
	7	0,611	0,601	0,010	1,64
	9	0,307	0,298	0,009	2,93
168 (uma semana)	4	0,561	0,541	0,020	3,57
	7	0,507	0,487	0,020	3,95
	9	0,575	0,549	0,026	4,52

O gráfico 7 apresenta a perda de peso do vidro verde nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana esteve ligeiramente acima de 4,5%. A partir de duas horas começou a registrar-se uma ligeira perda de peso nas soluções neutra e básica.

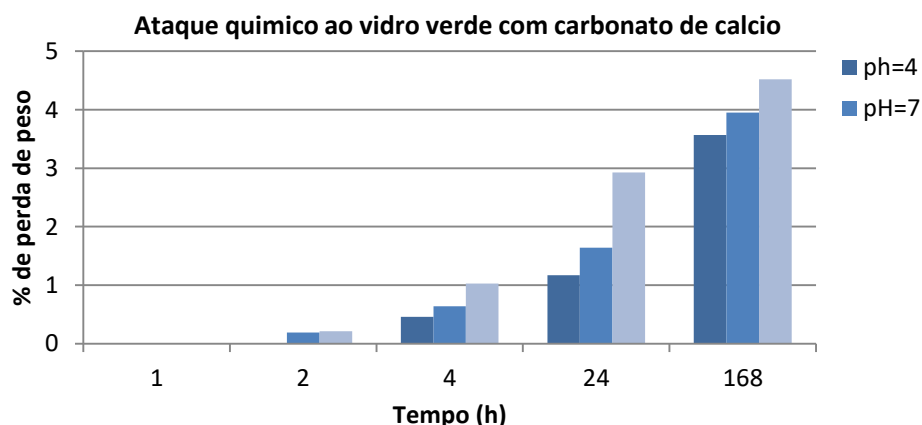


Gráfico 7: Ataque químico ao vidro verde com carbonato de cálcio

c) Ataque químico ao vidro de construção

A Tabela 13 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico ao vidro de construção, realizados em meios, ácido (pH=4), neutro (pH=7) e básico (pH=9).

Tabela 13: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de cálcio

Vidro de construção					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	1,341	1,341	0,000	0,00
	7	1,226	1,226	0,000	0,00
	9	1,526	1,526	0,000	0,00
2	4	0,321	0,321	0,000	0,00
	7	0,318	0,318	0,000	0,00
	9	0,356	0,355	0,001	0,28
4	4	0,194	0,193	0,001	0,51
	7	0,387	0,384	0,003	0,78
	9	0,376	0,372	0,004	1,06
24	4	0,393	0,388	0,005	1,26
	7	0,545	0,537	0,008	1,47
	9	0,268	0,263	0,005	1,87
168 (uma semana)	4	0,460	0,450	0,010	2,17
	7	0,447	0,437	0,010	2,23
	9	0,295	0,286	0,009	3,05

O gráfico 8 apresenta a perda de peso do vidro verde nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana esteve ligeiramente acima de 3%. A perda de peso foi verificada a partir de 2 horas para as soluções neutra a básica, e só depois começou a perda de peso em solução acida.

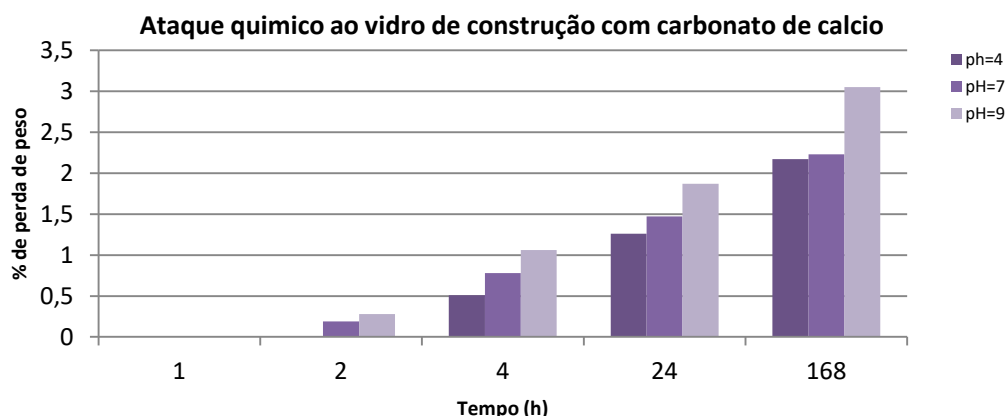


Gráfico 8: Ataque químico ao vidro de construção com carbonato de cálcio

À semelhança do que aconteceu com as fritas produzidas com carbonato de lítio como fundente, no caso do uso de carbonato de cálcio como fundente, o ataque químico aumentou com o aumento do pH. As fritas com carbonato de lítio sofreram menor perda de peso em relação as fritas com carbonato de cálcio.

A avaliação do ataque químico é importante uma vez que pode ser usada para determinar a utilização do vidro de acordo com o meio em que será submetido. Ademais, para as embalagens de vidro é importante que se conheça o comportamento de vidro produzido em relação ao produto a ser nele acondicionado.

4.3.3. Ataque químico aos cacos de vidro

a) Vidro castanho

A Tabela 14 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico aos cacos de vidro castanho, realizados em meios, ácido, neutro e básico.

Tabela 14: Ataque químico aos cacos de vidro castanho

Vidro castanho					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,874	0,874	0,000	0,00
	7	0,945	0,945	0,000	0,00
	9	1,030	1,030	0,000	0,00
2	4	0,347	0,347	0,000	0,00
	7	0,470	0,470	0,000	0,00
	9	0,491	0,491	0,000	0,00
4	4	0,363	0,363	0,000	0,00
	7	0,475	0,475	0,000	0,00
	9	0,375	0,374	0,001	0,27
24	4	0,351	0,350	0,001	0,29
	7	0,432	0,430	0,002	0,46
	9	0,336	0,334	0,002	0,60
168 (uma semana)	4	0,563	0,558	0,005	0,89
	7	0,405	0,400	0,007	1,25
	9	0,408	0,401	0,007	1,72

O gráfico 8 apresenta a perda de peso do vidro castanho nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana

esteve ligeiramente acima de 1.7%. A perda de peso foi verificada a partir de 4 horas para em meio básico e 24 horas nos restantes meios.

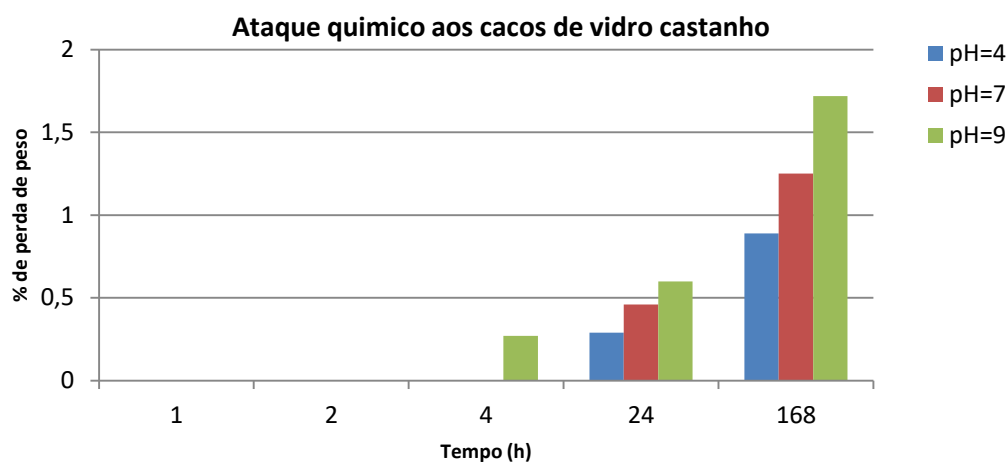


Gráfico 9: ataque químico aos cacos de vidro castanho

b) Vidro verde

A Tabela 15 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico aos cacos de vidro verde, realizados em meios, ácido, neutro e básico.

Tabela 15: Ataque químico aos cacos de vidro verde

Vidro verde					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,595	0,595	0,000	0,00
	7	0,554	0,554	0,000	0,00
	9	0,384	0,384	0,000	0,00
2	4	0,423	0,423	0,000	0,00
	7	0,471	0,471	0,000	0,00
	9	0,407	0,407	0,000	0,00
4	4	0,500	0,500	0,000	0,00
	7	0,544	0,544	0,000	0,00
	9	0,904	0,904	0,000	0,00
24	4	0,698	0,698	0,000	0,00
	7	0,499	0,499	0,000	0,00
	9	0,702	0,702	0,000	0,00
168 (uma semana)	4	0,460	0,460	0,0030	0,00
	7	0,664	0,664	0,000	0,00
	9	0,721	0,721	0,000	0,00

O caco de vidro verde não perdeu peso durante todo o tempo exposto nas soluções ácida, neutra e básica.

c) Vidro de construção

A Tabela 16 apresenta os resultados da avaliação do ataque químico aos cacos de vidro de construção, realizados em meios, ácido, neutro e básico.

Tabela 16: Ataque químico aos cacos de vidro de construção

Vidro de construção					
Tempo (h)	pH	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso perdido (g)	% Peso perdido
1	4	0,917	0,917	0,000	0,00
	7	0,532	0,532	0,000	0,00
	9	0,917	0,917	0,000	0,00
2	4	0,482	0,482	0,000	0,00
	7	0,586	0,586	0,000	0,00
	9	0,272	0,272	0,000	0,00
4	4	0,574	0,574	0,000	0,00
	7	0,506	0,506	0,000	0,00
	9	0,652	0,652	0,000	0,00
24	4	0,897	0,896	0,001	0,11
	7	0,778	0,777	0,001	0,13
	9	0,834	0,832	0,002	0,24
168 (uma semana)	4	0,543	0,541	0,002	0,37
	7	0,660	0,657	0,003	0,45
	9	0,319	0,317	0,002	0,63

O gráfico 8 apresenta a perda de peso do vidro de construção nos três meios (ácido, neutro e básico) em função do tempo. A perda de peso em uma semana esteve ligeiramente acima de 0,6%. A perda de peso foi verificada a partir de 24 horas

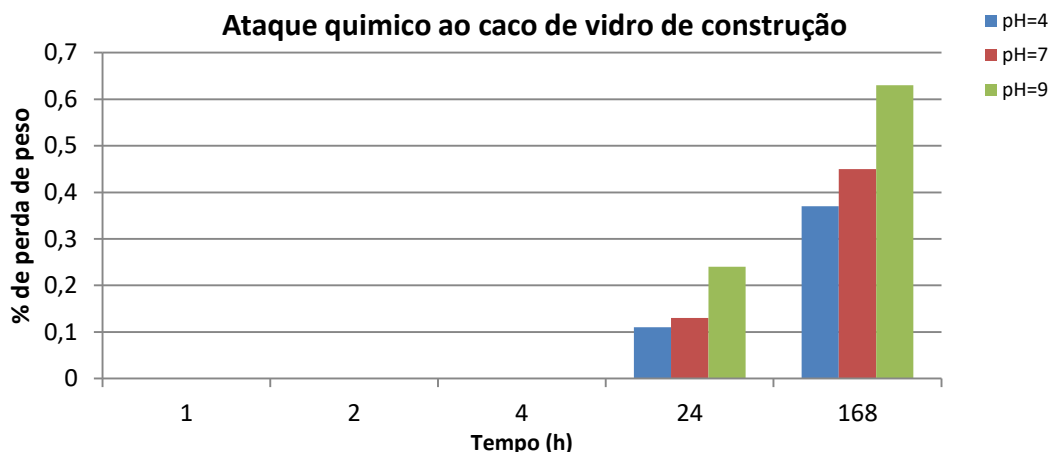


Gráfico 10: Ataque químico aos cacos de vidro de construção

Para os cacos de vidro verificou-se menor perda de peso comparando como o ataque químico sofrido pelas fritas cerâmicas. Com estes resultados nota-se que apesar da reciclabilidade do vidro, a sua reciclagem exige adição de mais reagentes que lhe possam aumentar a resistência como é o caso de fundentes e modificadores de rede. Uma reciclagem economicamente viável é aquela em que os cacos de vidro são moídos e adicionados à matéria-prima bruta.

4.4. Análise qualitativa espectrofométrica

Para a análise do FTIR, foram submetidas as fritas produzidas com cacos de vidro castanho fundidas com lítio (Gráfico 11 A) e cálcio (Gráfico 11 B), conforme o Gráfico 11.

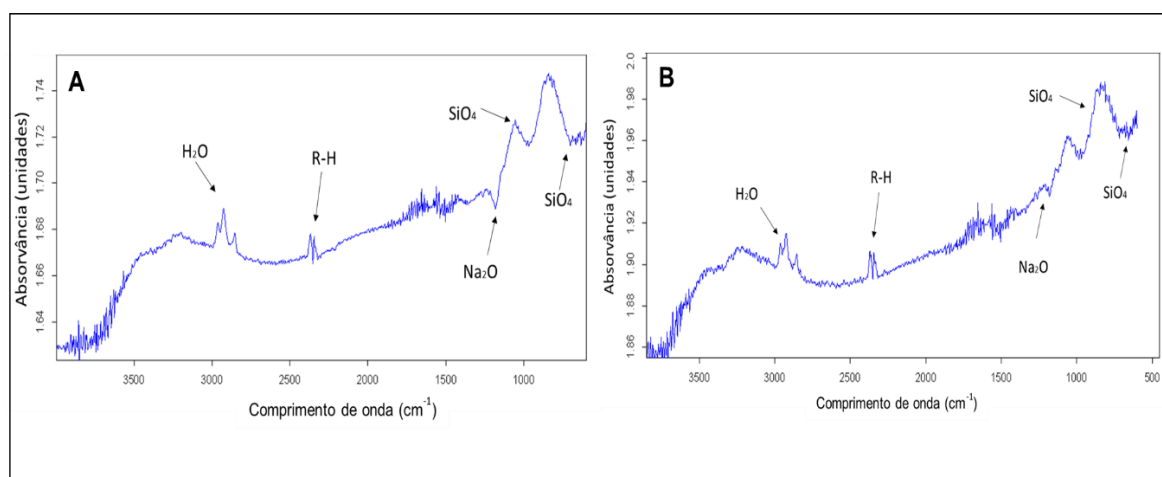


Gráfico 11: Gráficos FTIR das amostras de vidro castanho com carbonatos de cálcio (A) e de lítio (B)

Os espectros de absorção foram registados a partir das amostras de vidro castanho misturadas com KBr, que foram compactados em forma de pastilhas. Em todas as amostras são verificados os picos similares aos dos espectros característicos dos vidros comuns de sílica os quais apresentam três modos de frequência, em torno de 1000 cm^{-1} (superfície de tetraedros de SiO_4), 780 cm^{-1} (ligações entre tetraedros SiO_4) e 460 cm^{-1} (Si-O-Si tetraédrico). Podemos observar picos próximos à $850\text{-}880\text{ cm}^{-1}$ (Si-O-B) indicam que o óxido de boro participou na formação da rede estrutural juntamente com a sílica. A presença do óxido de boro, não incorporado à rede estrutural também é assinalado pelo pico próximo à 1406 cm^{-1} (B-O).

Em todas as amostras observa-se o pico em torno de 1470 cm^{-1} possivelmente corresponde ao óxido de sódio proveniente do fundente utilizado. Detecção de grupos funcionais embora não ocorra identificação inequívoca de um composto orgânico, contudo, o espectro de absorção na região do visível e ultravioleta, é amplamente utilizado para detectar a presença de certos grupos funcionais que atuam como cromóforos.

Uma banda fraca de absorção na região de $280\text{ a }290\text{ cm}^{-1}$, a qual é deslocada para curtos comprimentos de onda com o aumento da polaridade do solvente, é um forte indício de grupo carbonil. Uma banda fraca de absorção em torno de 260 cm^{-1} com indicações de finas estruturas vibracionais constitui evidência da existência de um anel aromático.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objectivo principal produzir materiais vítreos (fritas cerâmicas) a partir da fusão de cacos de vidro. No decurso da pesquisa, observou-se que na lixeira de Hulene existem diferentes cacos de vidros dentre os quais destacou-se caco de vidro de plano, caco de vidro de cerveja verde e castanho.

O processo de fusão para a obtenção das fritas, conclui-se que os cacos sem adição dos fundentes possuem elevada temperatura e que há necessidade de se adicionar pequenas fracções de fundente na ordem de 15%. Ou seja, as fritas foram produzidas a partir de cacos de vidro com adição carbonatos de lítio e de cálcio como fundentes, de modo a reduzirem a temperatura de fusão, bem como a viscosidade, poupando energia e melhorando a qualidade do produto final.

A qualidade do vidro produzido depende de muitos cuidados na preparação das amostras, com destaque para a descontaminação através da separação, lavagem e secagem antes da fusão. Mesmo as amostras sem fundente, atingiram o ponto de fusão de 1400 °C, uma temperatura menor que a de fusão de matérias-primas brutas, que é de cerca de 1600 °C. Este facto mostra que para além da vantagem de redução do volume de resíduos de vidro que vão as lixeiras, aterros sanitários ou deitados em outros locais, a reciclagem de vidro contribui para a redução de consumo de energia.

As fritas cerâmicas produzidas no âmbito deste trabalho não mostraram significativa alteração das suas propriedades em relação aos cacos de vidro usados. Este facto mostra que vidro pode ser reciclado várias vezes para os mesmos ou outros fins, sem que as suas propriedades estejam alteradas. Quanto ao ataque químico, verificou-se que aumenta com o aumento do pH.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Para os próximos trabalhos recomenda-se que se faça a moldagem de alguns materiais de utilidade como copos, vasos, pratos, etc., com o vidro reciclado. Outra questão tem a ver com a necessidade de se determinar mais propriedades dos vidros produzidos, como é o caso de estudar a resistência mecânica, dado que, neste trabalho apenas foi avaliado o ataque químico, análise espectrométrica (FTIR) e densidade. Estudos de viabilidade econômica são também necessários para que se tenha uma noção clara e completa sobre a sustentabilidade da reciclagem do vidro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akerman, M. (2000). Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro . Centro Tecnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain Vidros Brasil.
- Akerman, M. (2006). Apostila de natureza, estrutura e propriedades do vidro.
- Akerman, M. (2013). Introdução ao vidro e sua produção. Escola de vidro.
- Akerman, M. (2014). Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas na indústria de vidro. Ribeirão Preto, São Paulo.
- Alonso, A. M. (2016). Resíduos de vidro e resíduos de construção e demolição no cimento. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Babisk, M. P. (2009). Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia .
- Barros, C. (2010). apostila de vidros. Sul do Rio Grandense: Instituto Federal de Educação Ciencia e Tecnologia.
- Bó, G. C.-D. (2019). Estudo da cadeia de reciclagem de vidro: Perspectivas para os Municípios da Região Carbonífera (AMREC) a partir de Economia Circular . Criciúma: Universidade do Extremo Sul Caterinense.
- Caldas, T. C. (2012). Reciclagem de residuos de vidro plano em cerâmica vermelha . Goytacazes, Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Chandamela, M. H. (2019). Gestão de Resíduos sólidos em Moçambique. Maputo: Observatório do Meio Rural.
- Crisigiovanni, C. L. (2010). Uma abordagem sócio-ambiental e tecnológica da reciclagem dos resíduos de vidro . Curitiba.
- Dias, G. G., & Cruz, T. M. (2009). Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Vítreos. Belo Horizonte: Função Israel Pinheiro.

- Feitosa, B. d., Saito, D. K., Cortez, J. P., & Soares, V. F. (2017). Relatório 01 - Água na Indústria (Vidro) .
- Fernandes, V. O. (2017). Controle de manutenção aplicado à indústria vidreira. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Garkida, A. D. (2007). Glass recycling in waste management. Zaria: Department of industrial design faculty of environmental design Ahmadu Bello University.
- Geraldo Cardoso de Oliveira Neto, M. T. (2014). Avaliação das vantagens ambientais e econômicas da implantação da logística reversa no setor de vidros impressos . São Paulo: Ambiente & Sociedade.
- Giacomini, E. (2000). Material. O vidro. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Lemos, E. (2012). Diagnóstico de cadeia de reciclagem de embalagens de vidro em Santa Catarina. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Lemos, J. C., Paula, O. B., Nascimento, R. A., Campos, V. M., & Lemos, W. M. (2016). Otimização da dosagem de matérias-primas na produção do vidro plano incolor.
- Maleiane, F. M. (2016). Transformações físico-químicas durante a fusão de vidros técnicos. Maputo: Departamento de Química, Faculdade de Ciências, Universidade Eduardo Mondlane.
- Morais, A. S. (2013). Incorporação de resíduos de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Mota, J. C., Almeida, M. M., Alencar, V. C., & Curi, W. F. (2009). Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual . Campina Grande: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo.
- Prado, M. r. (2007). Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizadas em indústria de refrigerantes no Brasil. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

Russo, M. A. (2003). Tratamento de resíduos sólidos. Coimbra: Universidade de Coimbra.

Silva, L. L. (2015). Resíduos vitreos: Um estudo nas vidraarias do Município de Sousa-PB. Universidade Federal de Campina Grande .

Soares, T. F. (2018). Reciclagem de vidro para embalagens de alimentos e bebidas como etapa do Sistema de Gestão Ambiental. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.

Teixeira, m. (2015). Panorama do setor de vidro. Brasília: Confederação Nacional do Ramo Químico.

Anexos

Anexo 1: Dados para determinar a densidade

V1 (ml)	Vidro castanho		Vidro verde		Vidro de construção	
	Massa (g)	V2 (ml)	Massa (g)	V2 (ml)	Massa (g)	V2 (ml)
Cacos de vidro						
7	0,228	7,1	0,260	7,1	0,166	7,1
7	0,251	7,1	0,208	7,1	0,269	7,2
7	0,250	7,1	0,170	7,1	0,431	7,2
Fritas com carbonato de lítio						
7	0,658	7,2	0,928	7,2	0,920	7,4
7	0,924	7,4	0,659	7,2	0,655	7,2
7	1,096	7,5	0,326	7,1	0,322	7,1
Fritas com carbonato de cálcio						
7	0,555	7,4	0,395	7,2	0,202	7,1
7	0,637	7,5	0,257	7,1	0,336	7,2
7	0,384	7,3	0,209	7,1	0,460	7,3

Anexo 2: Dados para determinar o ataque químico em fritas cerâmicas com carbonato de lítio

Tempo (h)	pH	Peso (g)					
		VIDRO CASTANHO		VIDRO VERDE		VIDRO DE CONSTRUÇÃO	
		Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final
1	4	0,496	0,496	0,502	0,512	0,309	0,309
	7	0,416	0,416	0,457	0,457	0,459	0,459
	9	0,517	0,517	0,908	0,908	0,298	0,298
2	4	0,217	0,217	0,310	0,310	0,029	0,029
	7	0,412	0,412	0,512	0,511	0,631	0,630
	9	0,354	0,354	0,455	0,454	0,406	0,405
4	4	0,205	0,204	0,922	0,919	0,411	0,410
	7	0,303	0,301	0,512	0,509	0,894	0,891
	9	0,241	0,239	0,554	0,550	0,343	0,341
24	4	0,545	0,540	0,514	0,509	0,412	0,409
	7	0,424	0,420	0,524	0,518	0,494	0,490
	9	0,275	0,272	0,344	0,339	0,545	0,540
168	4	0,623	0,615	0,641	0,630	0,407	0,402
	7	0,448	0,440	505	0,495	0,324	0,319
	9	0,300	0,293	749	0,731	0,319	0,313

Anexo 3: Dados para determinar o ataque químico em fritas cerâmicas com carbonato de cálcio

Tempo (h)	pH	Peso (g)					
		VIDRO CASTANHO		VIDRO VERDE		VIDRO DE CONSTRUÇÃO	
		Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final
1	4	0,649	0,649	0,395	0,395	1,341	1,341
	7	0,542	0,542	0,257	0,257	1,226	1,226
	9	0,455	0,455	0,209	0,209	1,526	1,526
2	4	0,243	0,243	0,398	0,398	0,321	0,321
	7	0,410	0,410	0,525	0,524	0,318	0,318
	9	0,302	0,302	0,481	0,48-	0,356	0,355
4	4	0,348	0,346	0,438	0,436	0,194	0,193
	7	0,430	0,427	0,472	0,469	0,387	0,384
	9	0,375	0,372	0,388	0,384	0,376	0,372
24	4	0,347	0,342	0,854	0,844	0,393	0,388
	7	0,219	0,215	0,611	0,601	0,545	0,537
	9	0,666	0,651	0,307	0,298	0,268	0,263
168	4	0,337	0,325	0,561	0,541	0,460	0,450
	7	0,559	0,535	0,507	0,487	0,447	0,437
	9	0,406	0,386	0,575	0,549	0,295	0,286

Anexo 4: Dados para determinar o ataque químico aos cacos de vidro

Tempo (h)	pH	Peso (g)					
		VIDRO CASTANHO		VIDRO VERDE		VIDRO DE CONSTRUÇÃO	
		Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final
1	4	0,874	0,874	0,595	0,595	0,917	0,917
	7	0,945	0,945	0,554	0,554	0,532	0,532
	9	1,030	1,030	0,384	0,384	0,917	0,917
2	4	0,347	0,347	0,423	0,423	0,482	0,482
	7	0,470	0,470	0,471	0,471	0,586	0,586
	9	0,491	0,491	0,407	0,407	0,272	0,272
4	4	0,363	0,363	0,500	0,500	0,574	0,574
	7	0,475	0,475	0,544	0,544	0,506	0,506
	9	0,375	0,374	0,904	0,904	0,652	0,652
24	4	0,351	0,350	0,698	0,698	0,897	0,896
	7	0,432	0,430	0,499	0,499	0,778	0,777
	9	0,336	0,334	0,702	0,702	0,834	0,832
168	4	0,563	0,558	0,460	0,460	0,543	0,541
	7	0,405	0,400	0,664	0,664	0,660	0,657
	9	0,408	0,401	0,721	0,721	0,319	0,317