



**Fundação Educacional do Município de Assis
Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis
Campus "José Santilli Sobrinho"**

BEATRIZ MACRI CAMARGO

**REUTILIZAÇÃO DA SÍLICA PROVENIENTE DO RESÍDUO DE TERRA
DIATOMÁCEA CERVEJEIRA PARA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
VIDRO**

**Assis/SP
2022**



Fundação Educacional do Município de Assis
Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis
Campus "José Santilli Sobrinho"

BEATRIZ MACRI CAMARGO

**REUTILIZAÇÃO DA SÍLICA PROVENIENTE DO RESÍDUO DE TERRA
DIATOMÁCEA CERVEJEIRA PARA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
VIDRO**

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de Química Industrial do Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis – IMESA e a Fundação Educacional do Município de Assis – FEMA, como requisito parcial à obtenção do Certificado de Conclusão.

Orientando (a): Beatriz Macri Camargo
Orientador (a): Me. Marcelo Silva Ferreira

Assis/SP
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C173r Camargo, Beatriz Macri.

Reutilização da sílica proveniente do resíduo de terra diatomácea cervejeira para aplicação na produção de vidro / Beatriz Macri Camargo – Assis, SP: FEMA, 2022.

51 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Fundação Educacional do Município de Assis – FEMA, curso de Química Industrial, Assis, 2022.

Orientador: Prof. M^e. Marcelo Silva Ferreira.

1. Gestão de resíduos. 2. Resíduo de terra diatomácea cervejeira. 3. Sílica. 4. Vidro.

CDD 628.4

Biblioteca da FEMA

REUTILIZAÇÃO DA SÍLICA PROVENIENTE DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA CERVEJEIRA PARA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE VIDRO

BEATRIZ MACRI CAMARGO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, como requisito do Curso de Graduação em Química Industrial, avaliado pela seguinte comissão examinadora:

Orientador: _____
Prof. Me. Marcelo Silva Ferreira

Examinador: _____
Prof. Me. Alexandre Vinícius Guedes Mazalli

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha eternamente amada mãe, Cida (*in memoriam*), a qual nunca mediu esforços para me ver bem e feliz, e que eu tenho certeza que continua assistindo e comemorando todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me fazer escolher este curso no qual me identifiquei muito e desejo construir uma grande carreira; por me dar forças e persistência durante esses quatro anos de graduação e, mesmo com dois anos difíceis de pandemia, não me deixou desistir de continuar, pois esteve comigo durante todos os momentos.

Agradeço ao meu pai, Luiz e minha mãe, Maria Aparecida (*in memoriam*), por toda luta ao longo da minha vida, que se esforçaram para me dar a melhor educação e que me trouxeram aqui hoje. Obrigada por todos os conselhos, conhecimentos e valores transmitidos, que me transformaram na pessoa que sou. Agradeço também a minha irmã, Bárbara, por estar ao meu lado durante toda a minha vida e, principalmente nos momentos mais difíceis, nos quais esteve me apoiando e cuidando de mim. Agradeço ao meu namorado, Leonardo, por todo o incentivo e por estar ao meu lado me apoiando sempre e me dando forças para continuar.

Agradeço também às pessoas que pude conhecer ao longo desta trajetória, destacando os professores, que muitos se tornaram amigos e são exemplos de profissionais que levarei como inspiração. Muito obrigada a todos, pelos conhecimentos construídos durante estes anos, conversas e conselhos.

Um especial agradecimento ao Professor e Mestre, meu orientador Marcelo Silva Ferreira, por toda a atenção, dedicação, paciência e conhecimentos, que foram essenciais para a execução deste trabalho.

Agradeço a todas as amizades construídas ao longo deste curso, que são pessoas as quais quero levar para sempre, em especial a Rafaella, Bruna, Larissa, Felipe, Matheus Moreno, Matheus Pinheiro e Leandro. Muito obrigada por todos os anos de parceria, apoio e construção de conhecimento juntos.

Agradeço ao técnico do laboratório da FEMA, Fernando Rodrigues, por todo o auxílio e dicas para a realização da parte prática deste trabalho. Sua experiência e conhecimentos foram fundamentais.

Um especial agradecimento à cervejaria Casa Di Conti, pela oportunidade de estágio na área de Meio Ambiente e Sustentabilidade, onde surgiu a inspiração para o tema deste trabalho. Agradeço também por terem fornecido o resíduo de terra diatomácea cervejeira,

utilizado como material de estudo neste trabalho e também por toda a disponibilidade em tirar dúvidas.

Agradeço à AGRO SPI, pela oportunidade de estágio e emprego, além da flexibilidade de horários para a realização do meu estágio obrigatório e deste trabalho. Muito obrigada pelo incentivo e reconhecimento.

Agradeço também à ETEC Pedro D'Arcádia Neto, que além de me trazer inúmeros conhecimentos e me dar a oportunidade de conhecer pessoas muito importantes na minha vida, durante o Ensino Médio, tive o prazer de retornar para realizar meu estágio obrigatório da Licenciatura e também algumas partes práticas deste trabalho.

Muito obrigada a todos!

“Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Antoine-Laurent de Lavoisier

RESUMO

Uma alternativa no descarte de resíduos industriais é reutilizando-o em outra finalidade. Numa indústria cervejeira, tem-se o resíduo de terra diatomácea, gerado na etapa de filtração e clarificação da cerveja. A terra diatomácea possui estrutura porosa e rica em sílica; remove partículas sólidas em suspensão, reduz a turbidez e impede a fermentação secundária. A sílica (SiO_2) é a matéria-prima principal dos vidros, juntamente aos carbonatos de sódio e cálcio, que produzem seus respectivos óxidos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi de recuperar a sílica existente no resíduo de terra diatomácea cervejeira, aplicando-a na produção de vidro. A amostra do resíduo foi coletada em cervejaria localizada em Cândido Mota/SP. A recuperação da sílica baseou-se em correção de pH com NaOH p.a., centrifugação, remoção de umidade (estufa de secagem a $105^\circ\text{C}/24\text{h}$), remoção de matéria orgânica (mufla a $700^\circ\text{C}/3\text{h}$), digestão ácida com H_2SO_4 concentrado, filtração e nova secagem. As amostras A₁ e A₂ de SiO_2 recuperadas foram misturadas com Na_2CO_3 p.a. e CaCO_3 p.a., nas proporções 70:17:13 (%m/m), respectivamente, homogeneizadas em cadinho de porcelana e depositadas em forno elétrico ($1260^\circ\text{C}/2\text{h}$) para produzir os vidros. O resíduo apresentou teor de umidade de 83,9010% e teor de matéria orgânica de 35,5516%. Os teores de sílica foram de 89,8010% para A₁ e 96,2935% para A₂, respectivamente. Os vidros obtidos apresentaram partículas não fundidas totalmente, devido à temperatura insuficiente na fusão. A presença de leve coloração esverdeada indica presença de cátions Ferro ou Cobre, não removidos na digestão ácida. Também foi realizado um breve estudo de viabilidade econômica, para observar o quão produtivo este processo seria em uma escala industrial. A partir da cervejaria estudada, foram obtidos os dados de que, anualmente, são gastos cerca de R\$ 328.625,00 somente com a gestão do resíduo de terra diatomácea, com geração anual de 960 toneladas. A partir desta quantidade de resíduo, pode-se considerar que 124,8 toneladas de sílica poderiam ser recuperadas. Os procedimentos aqui descritos, não se apresentariam muito viáveis em escala industrial; no entanto, seriam necessários testes em larga escala para a sua confirmação. Contudo, foi possível verificar que a sílica existente no resíduo de terra diatomácea cervejeira pode ser reaproveitada com outros fins, como na produção de vidros, por exemplo, desde que nas condições adequadas.

Palavras-chave: gestão de resíduos; resíduo de terra diatomácea cervejeira; sílica; vidro.

ABSTRACT

An alternative in the disposal of industrial waste is reusing it for another purpose. In a brewing industry, there is diatomaceous earth residue, generated in the beer filtration and clarification stage. Diatomaceous earth has a porous structure and is rich in silica; removes suspended solid particles, reduces turbidity and prevents secondary fermentation. Silica (SiO_2) is the main raw material for glass, together with sodium and calcium carbonates, which produce their respective oxides. Therefore, the objective of this work was to recover the existing silica in the brewing diatomaceous earth residue, applying it in the production of glass. The residue sample was collected at a brewery located in Cândido Mota/SP. Silica recovery was based on pH correction with NaOH p.a., centrifugation, removal of humidity (drying oven at $105^\circ\text{C}/24\text{h}$), removal of organic matter (muffle furnace at $700^\circ\text{C}/3\text{h}$), acid digestion with concentrated H_2SO_4 , filtration and another drying. The recovered SiO_2 samples A_1 and A_2 were mixed with Na_2CO_3 p.a. and CaCO_3 p.a., in the proportions 70:17:13 (%w/w), respectively, homogenized in a porcelain crucible and deposited in an electric oven ($1260^\circ\text{C}/2\text{h}$) to produce the glasses. The residue had a humidity content of 83,9010% and an organic matter content of 35,5516%. The silica contents were 89,8010% for A_1 and 96.2935% for A_2 , respectively. The glasses obtained showed particles not completely melted, due to insufficient melting temperature. The presence of a slight greenish color indicates the presence of Iron or Copper cations, not removed in acid digestion. A brief economic feasibility study was also carried out to observe how productive this process would be on an industrial scale. From the studied brewery, data were obtained that, annually, about R\$ 328,625.00 are spent only on the management of diatomaceous earth residue, with an annual generation of 960 tons. From this amount of residue, it can be considered that 124,8 tons of silica could be recovered. The procedures described here would not be very viable on an industrial scale; however, large-scale tests would be needed for confirmation. Although, it was possible to verify that the existing silica in the brewing diatomaceous earth residue can be reused for other purposes, such as in the production of glasses, for example, provided that under the appropriate conditions.

Keywords: waste management; brewing diatomaceous earth residue; silica; glass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais ingredientes na fabricação de cerveja.....	19
Figura 2: Fluxograma do processo genérico de produção de cerveja.	20
Figura 3: Laudo de análises físico-químicas realizadas em amostra de resíduo de terra .	23
Figura 4: A forma básica da Sílica (dióxido de silício, SiO ₂)	24
Figura 5: Imagens de diatomáceas, obtidas a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura.	25
Figura 6: a) Micrografia de terra diatomácea nova, obtida a partir de Microscopia Eletrônica de Microscopia Eletrônica de Varredura, antes da aplicação para realizar a filtração e a clarificação da cerveja. b) Micrografia de terra diatomácea saturada com matéria orgânica pós processo de Microscopia Eletrônica de Varredura.....	26
Figura 7: Representação bidimensional do da rede cristalina do Dióxido de Silício (SiO ₂)	29
Figura 8: Reação básica para obtenção do vidro	30
Figura 9: Composições típicas de alguns vidros comerciais.....	31
Figura 10: Vidro sodo-cálcico.	32
Figura 11: Local de coleta de resíduo de terra diatomácea em cervejaria.	34
Figura 12: Resíduo de terra diatomácea homogeneizado em balde.	35
Figura 13: a) Centrifugação de resíduo. b) Precipitação da parte sólida contida nas amostras.....	35
Figura 14: Amostra sólida obtida, após realização de tratamento térmico em forno mufla.	36
Figura 15: Realização de digestão ácida das amostras em chapa aquecedora, no interior de capela de	37
Figura 16: Filtração dos sólidos obtidos, após realização de digestão ácida.....	38
Figura 17: Cadinhos no interior de forno, após homogeneização a altas temperaturas. ...	43

Figura 18: Amostras de vidro obtidas em laboratório, no interior de cadinhos de porcelana.
a)43

Figura 19: Visualização em microscópio óptico de fragmento da amostra de vidro obtido.
.....44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resíduos gerados anualmente numa cervejaria.....	22
Tabela 2: Remoção de umidade da amostra.	40
Tabela 3: Remoção de matéria orgânica da amostra.	40
Tabela 4: Valores para o cálculo de teor de sílica presente nas amostras.....	41
Tabela 5: Cálculo de massa, de acordo com a pureza.....	42
Tabela 6: Massa dos reagentes utilizados.....	42
Tabela 7: Quantidade de resíduo gerado e sílica recuperada.	45
Tabela 8: Gastos empregados no acondicionamento, destinação final e documentação ambiental do resíduo de terra diatomácea cervejeira.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
3. INDÚSTRIA CERVEJEIRA	18
3.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA.....	19
3.1.1. Filtração da Cerveja	21
3.2. RESÍDUOS.....	22
4. TERRA DIATOMÁCEA	24
4.1. DIATOMITO: FORMAÇÃO E PROPRIEDADES	24
4.2. FILTRAÇÃO DA CERVEJA E FORMAÇÃO DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA.....	26
4.2.1. Aplicações do resíduo de terra diatomácea cervejeira	27
5. VIDROS.....	27
5.1. BREVE HISTÓRICO	27
5.2. COMPOSIÇÃO.....	28
5.3. PROPRIEDADES DOS VIDROS	30
5.4. TIPOS DE VIDROS.....	30
5.4.1. Sílica Vítreas.....	31
5.4.2. Silicatos Alcalinos	31
5.4.3. Vidros Sodo-cálcicos.....	32
5.4.4. Vidros ao Chumbo	32
5.4.5. Vidros Borossilicatos	33
5.4.6. Vidros Alumino-Borossilicatos.....	33
6. MATERIAIS E MÉTODOS	33
6.1. MATERIAIS	33
6.2. MÉTODOS	34
6.2.1. Coleta do Resíduo de Terra Diatomácea.....	34
6.2.2. Recuperação do Resíduo de Terra Diatomácea	35
6.2.3. Digestão ácida da amostra.....	36
6.2.4. Determinação quantitativa de Sílica	38
6.2.5. Produção de vidro.....	39
6.2.6. Estudo de viabilidade econômica.....	39

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
7.1. RECUPERAÇÃO DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA.....	39
7.1.1. Remoção da umidade	40
7.1.2. Remoção de matéria orgânica e impurezas.....	40
7.2. DETERMINAÇÃO QUANTITATIVA DA SÍLICA.....	41
7.3. PRODUÇÃO DE VIDRO	41
7.4. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	44
8. CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados numa indústria podem ser muito volumosos e constantes, o que implica que a empresa disponha de seus recursos financeiros para acondicioná-los de forma ecologicamente correta, e isto apresenta custos elevados. Sendo assim, a busca por alternativas tecnológicas para a disposição dos resíduos industriais tem sido muito motivada nos últimos anos, como é o caso das terras diatomáceas (GOULART et al., 2011).

A terra diatomácea, diatomito ou Kielseguhr, segundo Pimentel (2006), é um material muito leve, de estrutura alveolar, formado de minúsculas frústulas silicosas e algas diatomáceas. Conforme Ciemil (2004 apud PIMENTEL, 2006, p. 56), a diatomita é uma rocha sedimentar rica em sílica amorfa hidratada (opala). Na indústria cervejeira, é empregada para auxiliar nos processos de filtração e clarificação da cerveja.

Segundo Savaris et al. (2019), durante a filtração da cerveja, os filtros são preenchidos com a terra diatomácea, a qual é eliminada como resíduo na etapa de limpeza do filtro, pois está carregada de impurezas. Este resíduo é gerado em várias toneladas por mês, dependendo do fluxo da produção. De acordo com Antonides (1998) e Dolley (2003) (apud PIMENTEL, 2006, p. 57), ao analisar o resíduo de terra diatomácea, após secagem ao forno, obteve-se de 80 a 90% de sílica em sua composição.

Segundo Camargo (2011), a sílica ou dióxido de silício (SiO_2) é um mineral que possui infinitas aplicações, sendo muito importante na vida cotidiana. É a matéria-prima principal na fabricação de vidros, podendo ser empregada em garrafas e janelas, por exemplo. Adicionada de cal, carbonato de sódio e óxido de boro, produz vidros altamente resistentes a choques térmicos e temperaturas elevadas. A sílica está presente em cerca de 74% da composição de vidros comuns, utilizados em embalagens, denominados sodo-cálcicos (LIMA, 2011).

Conforme Akerman (2000, p. 3), um quilo de vidro usado gera um quilo de vidro novo, ou seja, ele é completamente reciclável. Desta forma, voltando para a indústria cervejeira, as garrafas de vidro utilizadas como embalagem podem ser totalmente recicladas.

Tendo em vista que as práticas sustentáveis estão sendo cada vez mais implantadas no setor industrial, seria muito benéfico para as indústrias cervejeiras e para o meio ambiente, reduzir o descarte de terra diatomácea sem tratamento algum, aplicando este resíduo a

uma outra finalidade, principalmente considerando sua composição com altas taxas de sílica, que pode ser empregada em diversas áreas. A sílica da terra diatomácea poderia, inclusive, “voltar” ao ciclo produtivo, pois se empregada na fabricação de vidros, ao invés de resíduo cervejeiro descartado, seria uma nova embalagem.

O presente trabalho tem como objetivo recuperar a sílica existente no resíduo de terra diatomácea cervejeira, aplicando-a na produção de vidros.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – a definição de resíduos sólidos prevista na NBR ABNT 10004 (2004, p.1), os resíduos sólido ou semissólido podem resultar de variadas atividades, como a industrial, hospitalar, doméstica, agrícola, comercial, de varrição e de serviços, por exemplo; também podemos incluir o lodo gerado em estações de tratamento de água ou em instalações de controle da poluição. Alguns líquidos que também não possam ser lançados diretamente na rede pública de esgotos ou que necessitem de alguma tecnologia para viabilizar este lançamento em corpos de água.

Os Resíduos Industriais são aqueles gerados nos diversos segmentos de indústrias de processamentos. Eles ainda devem ser classificados de acordo com a sua periculosidade, podendo ser, segundo ABNT-NBR 10.004 (SCHALCH et. al, 2002, p. 4):

Resíduos Classe I (perigosos): pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou apresentarem efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;

Resíduos Classe IIA (não inertes): incluem-se nesta classe os resíduos potencialmente biodegradáveis ou combustíveis;

Resíduos Classe IIB (inertes): perfazem esta classe os resíduos considerados inertes e não combustíveis.

Conforme Valle (TOCCHETTO, 2005, p. 4), na maioria das vezes, os resíduos industriais representam a perda de matérias-primas e insumos. No entanto, a preocupação quanto ao gerenciamento de resíduos cresceu muito, fazendo com que as empresas adotassem princípios de gestão ambiental, os quais são procedimentos e medidas que visam a redução e o controle dos impactos ambientais gerados. Estes princípios são bem definidos e, quando aplicados de forma adequada, contribuem também para a melhoria das condições de segurança, higiene e saúde ocupacional dos colaboradores da empresa.

Também é imprescindível que os resíduos gerados por uma indústria estejam em conformidade com a Legislação Ambiental vigente. Tocchetto (2005, p. 33) descreve a estrutura ambiental brasileira dividida nos seguintes órgãos, desde 1985:

- a) SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente), responsável pela política ambiental oficial brasileira;
- b) CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão consultivo e normativo;
- c) IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais), órgão técnico e executor das políticas federais.

Cada estado e cada município possui um órgão estadual e municipal, respectivamente, responsáveis pelos interesses ambientais. No Estado de São Paulo, o órgão estadual é a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), e no município de Assis, a SEAMA (Secretaria Municipal de Agricultura e Meio Ambiente) representa os interesses ambientais municipais.

Segundo Tocchetto (2005, p. 12), o setor industrial tem sido motivado por alternativas que reduzam os impactos negativos que ocorrem no processo produtivo, pois assim, podem investir em soluções que ainda refletem na economia e na melhoria da competitividade.

3. INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Conforme descreve Limberger (2014), a indústria cervejeira brasileira foi uma iniciativa de imigrantes europeus, principalmente alemães, os quais desenvolveram suas instalações produtoras com o próprio capital que possuíam. A primeira cervejaria desenvolvida no Brasil tem datas do ano de 1637, a qual foi desmontada da Alemanha e trazida para ser instalada no Brasil, mais especificamente, em Recife (PE).

De acordo com Rebello (2009, p. 146), a indústria cervejeira brasileira era o setor mais importante do mercado da América do Sul no início do século XXI, além de ser uma das maiores produtoras do mundo, sendo que o Brasil ficava atrás da Europa, Estados Unidos e Japão.

Em 2014, o setor cervejeiro era responsável por gerar mais de 2 milhões de emprego no Brasil, correspondendo a 15% da indústria da transformação brasileira e 2% do Produto Interno Bruto (PIB) (SILVA, LEITE & PAULA, 2016, p. 87).

Estima-se que, segundo Rebello (2009), a cerveja é uma das bebidas mais antigas do mundo, sendo datado o seu surgimento por volta dos anos 8000 a.C. Após a descoberta do lúpulo e suas propriedades antissépticas, na Europa, por volta dos anos 1000 d.C., passou a ser um dos ingredientes na fabricação da cerveja, fazendo com que houvesse uma maior estabilidade da bebida.

3.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA

A cerveja é uma bebida alcoólica, fermentada, obtida a partir de malte de cevada, água, lúpulo e levedura de fermento, como está indicado na figura 1 (ROSA & AFONSO, 2014, p. 98).

Outras matérias-primas podem ser adicionadas, como *gritz* de milho (fonte de carboidratos), açúcares (sacarose ou açúcar invertido), aditivos (estabilizantes, corantes e antioxidantes) (REBELLO, 2009). Alguns coadjuvantes tecnológicos, como floculadores de proteína e a terra de filtração (terra diatomácea), não são ingredientes na formulação da cerveja, mas são extremamente importantes para serem aplicados durante o processo de fabricação, para que haja uma melhor qualidade da bebida produzida.

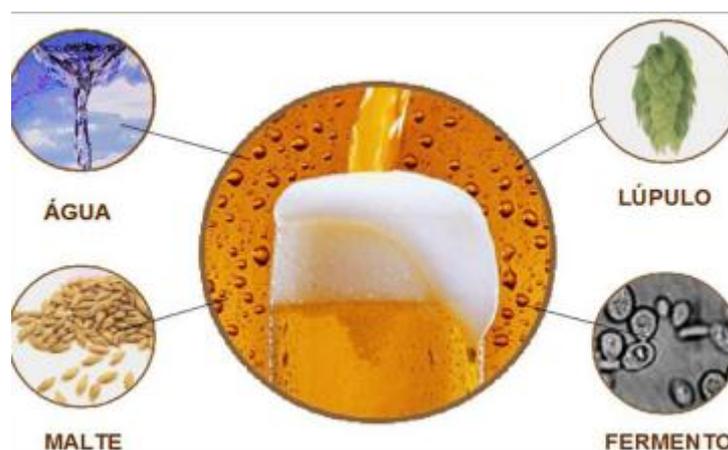


Figura 1: Principais ingredientes na fabricação de cerveja. (In: Rosa & Afonso, 2014)

A seguir, observa-se, na figura 2, as etapas da fabricação de cerveja num fluxograma, segundo Mega, Neves & Andrade (2011, p. 39):

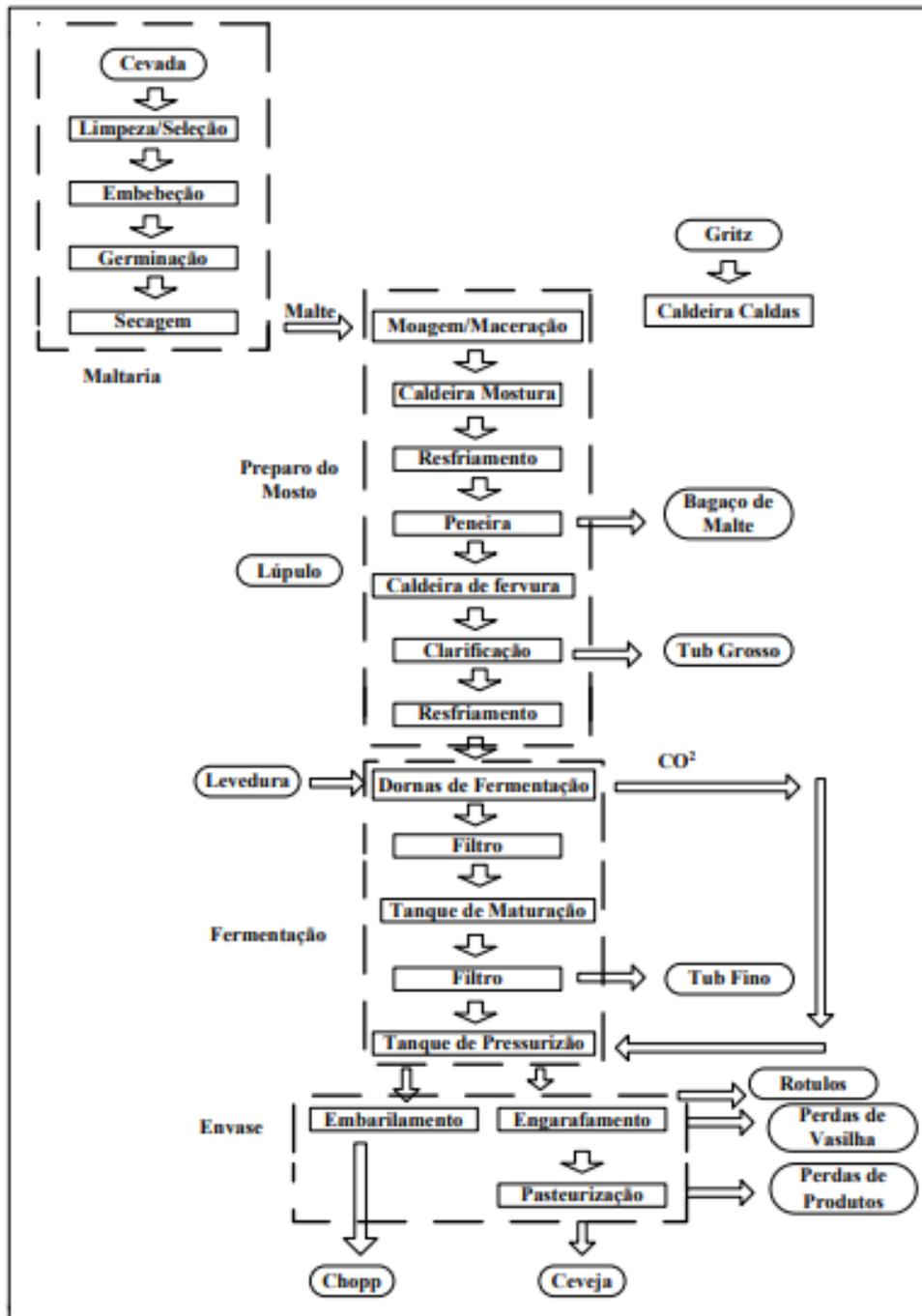


Figura 2: Fluxograma do processo genérico de produção de cerveja. (In: Mega, Neves & Andrade, 2011, p. 39)

Conforme descrito por Breancini (2018, p. 17), pode-se resumir o processo cervejeiro e a etapa de filtração da seguinte maneira:

Analisando o ramo de bebidas, a cerveja é obtida por fermentação alcoólica da infusão de uma mistura de lúpulo e malte de cevada ou outros cereais germinados ou não, em água, podendo ser adicionados hidratos de carbono, gás carbônico e outros produtos compatíveis com o consumo humano. Na produção de cerveja, depois da maceração do malte, o mosto resultante é separado em filtro prensa. A grande presença de células de leveduras e de partículas de proteínas coaguladas em suspensão na cerveja, após a maturação, faz com que seja necessária a operação de filtração, pois a presença dessas substâncias em suspensão torna a cerveja turva, impedindo que a mesma apresente uma característica brilhante e clara.

3.1.1. Filtração da Cerveja

A etapa de filtração é o que diferencia a produção da maioria das cervejas artesanais das cervejas produzidas para serem comercializadas em larga escala. Cervejas artesanais geralmente não passam pelo processo de filtração e, por isso, apresentam uma característica mais turva, escura e com sabor mais marcante. No entanto, isso não é desejável em cervejas destinadas ao comércio em grande escala. Portanto, quando a cerveja não recebe a filtração, fica repleta de leveduras ainda vivas, o que a torna muito sensível a mudanças de temperatura. Isso prejudica no tempo de vida de prateleira do produto. Além de clarificar a cerveja, por realizar a remoção de partículas suspensas, a filtração também elimina o fermento vivo remanescente e interrompe o processo de fermentação (BREANCINI, 2018, p. 19).

Esta interrupção é necessária para que não ocorra o processo de fermentação secundária, ou seja, as leveduras consomem o carboidrato residual da mistura, aprimorando o aspecto da cerveja. Esta etapa pode gerar alguns compostos indesejáveis, como o ácido acético, por exemplo (ROSA & AFONSO, 2014).

Estima-se que uma cervejaria de grande porte pode gerar uma média mensal de 30.000 Kg de resíduo de terra diatomácea. No entanto, para evitar que este residual cause impactos ao meio ambiente e/ou à saúde, deve ser realizado um manuseio e destino final apropriados (GOULART et.al, 2011).

3.2. RESÍDUOS

De acordo com um estudo desenvolvido por Mello & Pawlowsky (2002), na tentativa de diminuir a geração de resíduos gerados numa indústria cervejeira, foram levantados dados de quantidades anuais (em quilogramas) e as classes de cada um dos resíduos gerados na produção dentro de uma cervejaria. Os dados estão descritos na Tabela 1.

RESÍDUO	GERAÇÃO ANUAL (Kg)	CLASSE
Efluente Industrial (líquido)	861.443.000 L	I
Levedura	4.152.390	II A
Lodo da ETDI	1.013.893	I
Materiais Recicláveis	2.011.648	II B
Resíduo de <i>Trub</i>	365.700	II B
Borra de Rótulos	231.450	II A
Terra Diatomácea	139.393	II A
Resíduos da <i>Videojet</i>	70	I
Gás Metano (CH₄)	15.545.577	—
Bagaço das Peneiras	260.000	II A
Resíduo de óleo BPF	4.840	I
Bagaço de Cevada	28.824.110	II A

Tabela 1: Resíduos gerados anualmente numa cervejaria. (In: Adaptado de Mello & Pawlowsky, 2002, p. 27)

Como observado na tabela 1, o resíduo de Terra Diatomácea se enquadra na Classe II de Resíduos Sólidos, estabelecida pela NBR ABNT 10.004, devido às suas características de biodegradabilidade, com possibilidades de acarretar riscos ao meio ambiente ou à saúde.

A seguir, está representado, na figura 3, um laudo de análises de resíduo de terra diatomácea cervejeira, que justifica esta classificação:

DETERMINAÇÕES			1847
P	Fósforo Resina	mg/dm ³	32
M.O.	Matéria orgânica	g/dm ³	7
C	Carbono Orgânico	g/dm ³	4
pH CaCl ₂	Potencial Hidrogeniônico	-	5
K	Potássio	mmolc/dm ³	2
Ca	Cálcio	mmolc/dm ³	8
Mg	Magnésio	mmolc/dm ³	2
H+Al	H+Al	mmolc/dm ³	17
Al	Acidez trocável	mmolc/dm ³	1
SB	Soma de bases trocáveis	mmolc/dm ³	12
C.T.C pH 7	Capac. de troca de cátions	mmolc/dm ³	29
V%	Saturação por base	%	41,4
m%	Saturação por al	%	7,7
S	Enxofre	mg/dm ³	66
K na CTC	% de potássio na C.T.C	%	6,9
Ca na CTC	% de cálcio na C.T.C	%	27,6
Mg na CTC	% de Magnésio na C.T.C	%	6,9
Al na CTC	% de Alumínio na C.T.C	%	3,4
Ca/K	Relação Ca/K	-	4
Ca/Mg	Relação Ca/Mg	-	4
Mg/k	Relação Mg/K	-	1
Cu	Cobre (DTPA)	mg/dm ³	0,2
Zn	Zinco (DTPA)	mg/dm ³	0,6
Fe	Ferro (DTPA)	mg/dm ³	22
Mn	Manganês (DTPA)	mg/dm ³	2
B	Boro (Água Quente)	mg/dm ³	0,61

Figura 3: Laudo de análises físico-químicas realizadas em amostra de resíduo de terra diatomácea cervejeira. (In: Arquivo pessoal, 2019)

Na sua composição, é possível verificar a presença de componentes interessantes, como o Ferro, Cálcio e Magnésio, além de outras características, como o pH ácido e grande quantidade de enxofre.

4. TERRA DIATOMÁCEA

Segundo Goulart et. al (2011), a terra diatomácea possui natureza silicosa, sendo um sedimento amorfo, de origem das carapaças de algas unicelulares aquáticas, marinhas ou lacustres. O principal componente da terra diatomácea, ou diatomito, ou ainda *Kieselguhr*, é a sílica opalina. No entanto, outros componentes podem se apresentar, como, por exemplo, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio, mas numa proporção bem menor, quando comparados à sílica. Também pode haver um depósito de minerais como feldspato, mica, argilominerais, dentre outros, os quais possuem uma estrutura oca, daí a sua grande propriedade adsorvente.

4.1. DIATOMITO: FORMAÇÃO E PROPRIEDADES

Para Souza (PIMENTEL 2006, p. 43):

A diatomita ou kieselguhr é um material de origem sedimentar, que ocorre nos terrenos de sedimentação, principalmente em zonas de formação de lacustre ou oceânica, dispostos em camadas delgadas ou espessas de argilas, constituído principalmente de uma acumulação de esqueletos ou frústulas, fósseis de diátomos. Os diátomos são organismos do reino vegetal, planctônico, possuindo células completas, com membrana, núcleo e protoplasma, pertencente ao reino Bacillariophita

Segundo Pimentel (2006), além de ser um material muito fino e poroso, possui baixas condutividade térmica e densidade. Porém, apresenta um elevado ponto de fusão, devido ao seu alto teor de sílica (SiO_2), o que corresponde um percentual que varia entre 80 e 90% (PIMENTEL, 2006.)

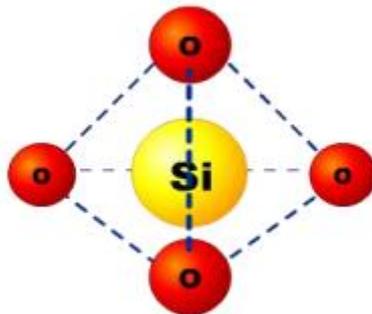


Figura 4: A forma básica da Sílica (dióxido de silício, SiO_2). (In: LIMA, 2011).

De acordo com Sousa (2016, p. 22), os diatomitos são rochas compostas essencialmente de sílica amorfa, podendo chegar ao percentual de 94%. São constituídas de diatomáceas em mais de 50%, as quais são seres unicelulares aquáticos. As rochas de diatomito apresentam cores claras, que podem variar entre branco, amarelo e rosado, dependendo das impurezas nela presentes.

Conforme descreve Pimentel (2006, p. 41), a fixação do Silício (Si) na estrutura do diatomito pode ser explicada através da história geoquímica, devido à decomposição de argilas por vias biológicas, as quais foram apoderadas pelas algas, no objetivo de constituir suas carapaças e estruturas. Na figura 5, é possível observar a estrutura das algas diatomáceas.

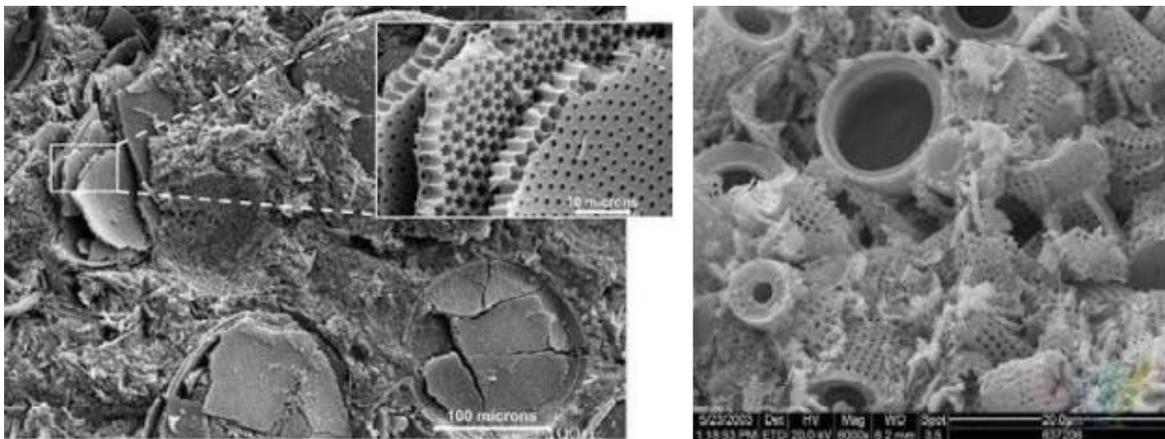


Figura 5: Imagens de diatomáceas, obtidas a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura.
(In: SOUSA, 2016)

Como ressalta Sousa (2016, p. 22), o diatomito apresenta características de alta pureza, capacidade de absorção, estrutura permeável e porosa, propriedades adsorventes, dentre outras. Sendo assim, tanto a rocha, como os seus pós (rocha triturada) são processados e podem ser aplicados a muitos fins industriais. Como algumas das suas finalidades industriais, pode ser usada como filtro na separação de sólidos suspensos presentes em água, cerveja, azeites, sumos de frutas, dentre outros. Por possuir altas taxas de sílica, é também uma fonte alternativa desta substância para a produção de geopolímeros.

4.2. FILTRAÇÃO DA CERVEJA E FORMAÇÃO DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA

De acordo com Goulart et.al (2011), quando a terra diatomácea é aplicada no processo de filtração e clarificação da cerveja, fica extremamente saturada de matéria orgânica, o que torna sua vida útil muito curta. Sendo assim, não é possível reutilizar este mesmo material para uma nova filtração de cerveja, pois sua capacidade filtrante está esgotada. Sendo assim, o material de filtração é descartado na forma de resíduo.

Nas figuras 6.a e 6.b a seguir, é possível observar a diferença entre a terra diatomácea antes e após realizar o processo de filtração:

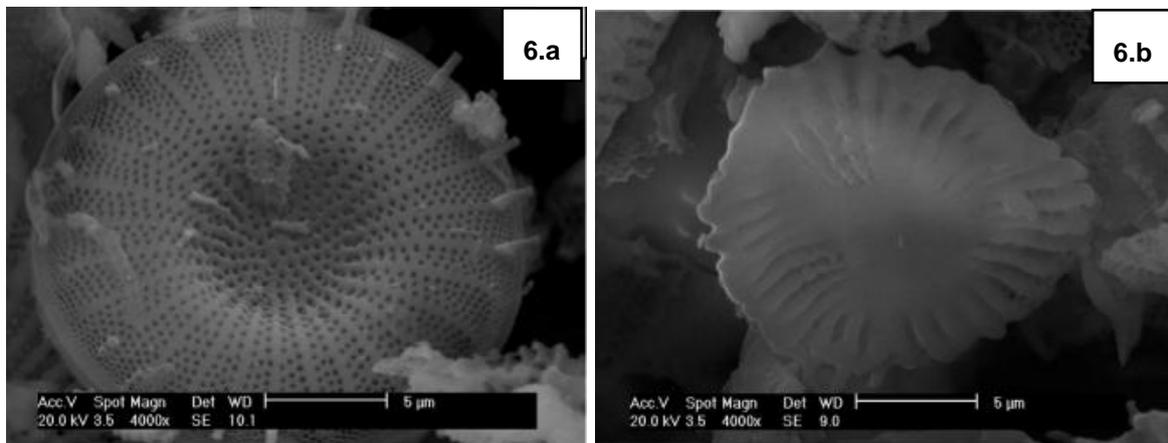


Figura 6: a) Micrografia de terra diatomácea nova, obtida a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura, antes da aplicação para realizar a filtração e a clarificação da cerveja. b) Micrografia de terra diatomácea saturada com matéria orgânica pós processo de Microscopia Eletrônica de Varredura. (In: GOULART et. al, 2011, p. 627)

Conforme já mencionado no capítulo 1 (p. 15), os procedimentos para acondicionamento e destinação corretos de resíduos apresentam custos elevados. Portanto, uma alternativa para este problema é tentar encontrar outras aplicações para estes resíduos, sendo algo benéfico para a própria indústria geradora e sua economia, bem como para o meio ambiente

4.2.1. Aplicações do resíduo de terra diatomácea cervejeira

Algumas aplicações alternativas do resíduo de terra diatomácea cervejeira constadas na literatura são: o preparo de espumas cerâmicas (HUANCA & NUNES, 2016), produção de tijolos ecológicos (FLORIANI, 2017), suplementação nutricional na compostagem de culturas de alface (BIUDES, 2018), produção de concreto (SAVARIS et al, 2019), dentre outras.

5. VIDROS

Os vidros são amplamente utilizados nas atividades cotidianas humanas, conforme cita Akerman (2000), podendo ser aplicados em casas, nas ciências, indústrias e até mesmo na Arte. Apresentam grande versatilidade, pois além de serem resistentes, são impermeáveis e leves, sendo amplamente utilizados em embalagens. É um material totalmente reciclável, sendo que um quilo de vidro usado gera um quilo de vidro novo; além disso, muitas embalagens de vidro são retornáveis e reutilizáveis, o que é benéfico para o meio ambiente, pois há uma diminuição na geração de resíduos.

Além disso, de acordo com Shreve & Brink Jr. (1997), o vidro apresenta muitas utilidades por conta de sua transparência, elevada resistência ao ataque químico, por ser eficiente como isolante elétrico e pela sua capacidade de reter o vácuo.

5.1. BREVE HISTÓRICO

Há várias lendas que explicam o surgimento do vidro; porém, a mais verossímil seria uma explicação datada dos anos 4000 a.C, de acordo com algumas descobertas em túmulos da época. Por volta de 1500 a.C, o vidro ainda era pouco utilizado, tendo sua maior aplicação em adornos. Também pela sua difícil forma de obtenção, somente os mais ricos o possuíam.

Com o passar dos anos, a descoberta da técnica do sopro, por volta de 300 a.C, foi uma revolução, pois assim, a produção de frascos e recipientes de vidro se tornou muito mais fácil. Esta é a técnica utilizada até hoje, até mesmo pelas indústrias mais modernas, na produção de embalagens, copos, frascos, etc.

Os vidros também possuíam uma importante aplicação na Idade Média, por meio dos vitrais. Como muitas pessoas não sabiam ler, as histórias bíblicas eram retratadas por meio de desenhos em janelas de vidro das igrejas, conhecidos como vitrais.

Com o passar dos séculos, o vidro foi se tornando cada vez mais transparente e resistente, o que possibilitou também a criação de lentes, como em telescópios e binóculos, possuindo grande aplicação e importância dentro das Ciências e novas descobertas.

A grande resistência térmica dos vidros também possibilitou um grande avanço na Química, já que foi possível a criação do termômetro e vidrarias que podiam ser aquecidas e mesmo assim, não trincavam. Isso aconteceu por volta dos anos 1600.

Foram surgindo cada vez mais aplicações para o vidro, como por exemplo a produção de espelhos, na época de Luís XIV; a produção de garrafas, em 1880; a produção de vidro plano, em 1900; e uma das descobertas mais recentes, como é o caso da fibra óptica, com muitas aplicações para substituir cabos de cobre e alumínio, utilizados em lâmpadas, comunicação, etc (AKERMAN, 2000, p. 5).

5.2. COMPOSIÇÃO

Conforme descreve Silva (2017), o vidro:

É um material cuja composição é formada por silícios (areias) e carbonatos, passando por processos de fabricação em altas temperaturas e posteriormente sujeitos a uma rápida solidificação, fazendo com que o material não complete sua cristalização.

Segundo Shreve & Brink Jr. (1997):

Do ponto de vista físico, o vidro pode ser definido como um líquido sub-resfriado, rígido, sem ponto de fusão definido, com uma viscosidade suficientemente elevada para impedir a cristalização, do ponto de vista químico, é o resultado da união de óxidos inorgânicos não-voláteis resultantes da decomposição e da fusão de compostos alcalinos e alcalino-terrosos, de areia e de outras substâncias, com o que se forma um produto final com uma estrutura atômica ao acaso. O vidro é um produto completamente vitrificado, ou pelo menos um produto com um teor relativamente pequeno de material não vítreo em suspensão.

De acordo com Akerman (2000):

Se pela estabilidade de sua forma os vidros podem assimilar-se a sólidos, do ponto de vista estrutural suas semelhanças são muito menos evidentes. Este fato que constitui uma limitação para incluir os vidros entre os sólidos, por outro lado resulta

insuficiente para autorizar a aceitá-los como líquidos, ainda que possa justificar a designação de líquidos de viscosidade infinita, que em muitas vezes é aplicado. A dificuldade para se enquadrar adequadamente os corpos vítreos dentro de um dos três estados de agregação da matéria, deu lugar a se pensar em integrá-los em um quarto estado de agregação: o estado vítreo.

Para Lima (2011, p. 20), o vidro é uma substância amorfa, inorgânica e homogênea, tendo sua massa em fusão recebendo resfriamento, o que causa seu endurecimento contínuo, até que passe de um aspecto viscoso para um rígido, mas sem sofrer cristalização. Além disso, o conceito de “vidro” remete a um produto obtido a partir da fusão de óxidos e seus derivados, por meio de calor, tendo como principal constituinte a sílica. Sua forma básica (vide Figura 4), bem como da maioria dos silicatos, consiste num arranjo tetraédrico, formado por quatro átomos de oxigênio e um átomo central de silício. Este tipo de arranjo possibilita a formação de uma rede cristalina infinita, devido ao compartilhamento dos elétrons dos átomos de oxigênio, com os arranjos vizinhos, como demonstrado na figura 7.

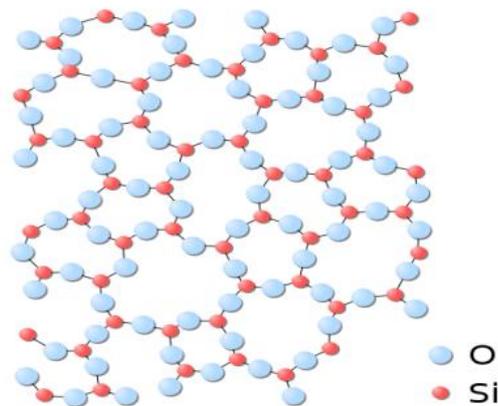


Figura 7: Representação bidimensional da rede cristalina do Dióxido de Silício (SiO_2).

(In: LIMA, 2011, p. 21)

Para a obtenção do vidro, ocorre a reação entre carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sílica (SiO_2), que se fundem a uma temperatura por volta dos $1500\text{ }^\circ\text{C}$, gerando silicato de sódio (Na_2SiO_3), o qual reage novamente com a sílica e forma a estrutura do vidro (LIMA, 2011). O processo é apresentado nas reações químicas a seguir:

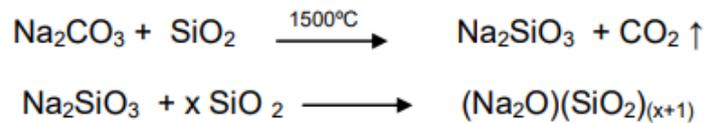


Figura 8: Reação básica para obtenção do vidro. (In: LIMA, 2011, p. 21).

5.3. PROPRIEDADES DOS VIDROS

As propriedades dos vidros, bem como de outros materiais também, irão variar de acordo com a sua composição química e suas características estruturais. A proporção dos óxidos componentes deve ser observada experimentalmente, para se obter uma determinada propriedade desejada (AKERMAN, 2000, p. 22). Portanto, se as proporções não forem respeitadas, as características e propriedades obtidas no vidro final podem ser bem diferentes do que se desejava.

Outro fator muito importante na composição de vidros, é que soma de todos os óxidos deve ser igual a 100%. Ou seja, caso se aumente ou diminua a proporção de algum óxido, deve-se diminuir ou aumentar a proporção de outro, para que a somatória final continue em 100%.

A seguir, estão descritos diferentes tipos de vidros, suas diferentes composições, propriedades e locais onde são utilizados.

5.4. TIPOS DE VIDROS

De acordo com a necessidade, é possível incluir outros elementos na produção do vidro, para se obter uma característica específica, como por exemplo, uma maior resistência térmica. Sendo assim, há diversos tipos de vidros, os quais estão detalhados na seguinte figura e descritos em seguida, segundo Akerman (2000):

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO
sodo-cálcicos	Embalagem	72,0	2,0	-	12,5	1,0	11,0	1,5	-
	Plano	71,0	1,0	-	13,5	0,5	10,0	4,0	-
	Lâmpada	73,0	1,0	-	16,5	0,5	5,0	4,0	-
Borossilicato	Pyrex	79,0	2,0	13,0	5,5	-	-	-	-
	Fibra isolamento	66,0	1,5	3,5	15,5	1,0	8,0	4,0	-
Chumbo	Cristal	56,0	-	-	4,0	12,0	2,0	2,0	24,0
	Néon	63,0	1,0	-	8,0	6,0	-	-	22,0
	Lente	32,0	-	-	1,0	2,0	-	-	65,0
Aluminoborossilicato	Farmacêutico	72,0	6,0	11,0	7,0	1,0	1,0	-	-
	Fibra reforço	55,0	15,0	7,0	-	-	19,0	4,0	-
	Tube combustão	62,0	17,0	5,0	1,0	-	8,0	7,0	-

Figura 9: Composições típicas de alguns vidros comerciais. (In: AKERMAN, 2000)

5.4.1. Sílica Vítreo

É obtido a partir do aquecimento de areia de sílica e cristais de quartzo, a uma temperatura por volta dos 1725 °C. Devido ao arranjo tetraédrico da sílica, o processo de fusão é muito lento. O vidro resultante é bem viscoso, possuindo um coeficiente de expansão térmico muito baixo, sendo mais adequado para aplicações em janelas de veículos espaciais ou espelhos astronômicos, pois apresenta uma grande resistência a choques térmicos e possui estabilidade dimensional (AKERMAN, 2000).

5.4.2. Silicatos Alcalinos

Para reduzir a viscosidade do vidro de sílica, são adicionados óxidos alcalinos, os quais funcionam como um fluxo modificador de rede, amolecendo a estrutura do mesmo. Os átomos de sódio, por exemplo, ligam-se de forma iônica aos átomos de oxigênio, interrompendo a continuidade da rede. Por quebrar algumas ligações, os óxidos alcalinos são utilizados como fundentes, que diminuem a viscosidade do vidro. (AKERMAN, 2000).

Para se obter um óxido alcalino, geralmente são utilizados carbonatos, os quais reagem com a sílica numa temperatura acima de 550 °C. Quando a proporção entre estes componentes é adequada, ocorre o resfriamento e a formação de um vidro (AKERMAN, 2000).

No entanto, quanto maior é a concentração de álcalis na composição do vidro, menos resistente à água ele se torna, chegando até mesmo a ser solúvel, em alguns casos. Serve para ser aplicado em adesivos, produtos de limpeza e películas protetoras.

5.4.3. Vidros Sodo-cálcicos

Com o intuito de diminuir a solubilidade dos silicatos alcalinos, mas ainda mantendo uma fusão mais facilitada, ao invés de utilizar fluxos modificadores alcalinos, são utilizados fluxos estabilizantes. Sendo assim, inclui-se óxido de cálcio, ou ainda, óxido de magnésio.

Esta é a família de vidros mais antiga e utilizada, desde o Egito Antigo, na produção de garrafas, potes, frascos, janelas, tubos de lâmpadas, bulbos, etc.

Geralmente, estes vidros contêm em sua composição uma massa de 8 a 12% de óxido de cálcio (CaO) e 12 a 17% de óxido de sódio (Na₂O), ou algum outro óxido alcalino. Não pode acrescentar muito cálcio, pois assim, o vidro se cristaliza (detrifica) (AKERMAN, 2000).

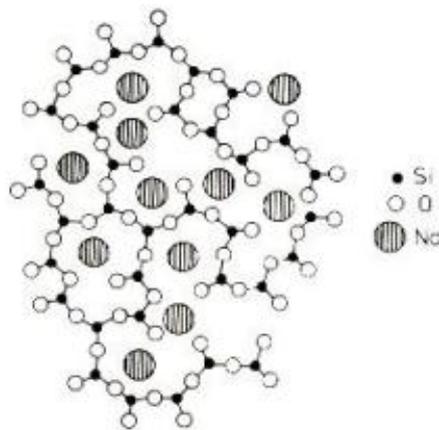


Figura 10: Vidro sodo-cálcico. Fonte: AKERMAN, 2000.

5.4.4. Vidros ao Chumbo

Neste tipo, é adicionado o óxido de chumbo, o qual é o maior modificador de rede, sendo, algumas vezes, um formador de rede. Um vidro alcalino, adicionado de chumbo, altera um pouco sua viscosidade, aumenta índice de refração e brilho, sendo muito aplicado em artigos de mesa e peças de arte. Este é o vidro conhecido por “cristal”.

Também possui larga aplicação na indústria eletroeletrônica e na ótica (AKERMAN, 2000).

5.4.5. Vidros Borossilicatos

A adição de óxido de boro forma vidros a partir de temperaturas acima de 460 °C. O óxido de boro vítreo forma uma rede de triângulos boro-oxigênio. É amplamente utilizado para substituir óxidos alcalinos (AKERMAN, 2000).

Este tipo de vidro é muito aplicado em vidros comerciais com resistência térmica, produtos de vidro de mesa (Marinex e Pyrex). Além disso, por possuir uma menor quantidade de fluxos modificadores de rede, pois o boro tende a manter sua estrutura, além de resistentes ao choque térmico, apresentam grande resistência a ataques químicos, sendo amplamente utilizado em vidrarias e equipamentos de laboratório.

5.4.6. Vidros Alumino-Borossilicatos

Com a adição de alumina (óxido de alumínio, Al_2O_3) nos vidros de borossilicato, há um aumento da viscosidade em temperaturas mais elevadas. Este composto atua como formador de rede, aumentando a coesão da estrutura do vidro. Sendo assim, haverá uma resistência aos choques térmicos ainda maior que os vidros de borossilicato, podendo ser aquecidos a temperaturas mais elevadas, sem sofrer deformações.

Aplicam-se em tubos de combustão, vidros que precisam de alta resistência química, vitro-cerâmicos e fibras de reforço. (AKERMAN, 2000).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. MATERIAIS

Para a realização dos procedimentos, foram utilizados os seguintes materiais:

- Resíduo de Terra Diatomácea, proveniente da filtração da cerveja, adquirido em cervejaria situada em Cândido Mota - SP; Fitas medidoras de pH (MERCK®); Hidróxido de Sódio (NaOH) P.A; Bastão de plástico; Centrífuga (ITR, Simplex II);

Béquer 150 mL; Estufa de secagem (TECNAL, TE-0851); Cápsula de porcelana; Água destilada; Ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado; Pipetas volumétricas de 5 e 10 mL; Pera insufladora; Balão de fundo chato 250 mL; Chapa aquecedora (TECNAL, TE-397/4); Capela de exaustão; Suporte universal; Papel de filtro qualitativo; Funil de haste longa; Balão volumétrico de 500 mL; Balança analítica (BEL, M214Ai); Forno Mufla (QUIMIS, Q-318D24); Dessecador; Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) P.A; Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) P.A; Almofariz e Pistilo; Cadinho de porcelana; Forno mufla elétrico (FORTELAB, ML 1300/10-CHAM); Pinça metálica.

6.2. MÉTODOS

6.2.1. Coleta do Resíduo de Terra Diatomácea

O resíduo de terra diatomácea cervejeira foi coletado na cervejaria Casa Di Conti Ltda., no Distrito Industrial da cidade de Cândido Mota – SP, conforme demonstrado na figura 11. A amostra foi acondicionada em balde e armazenada no Laboratório de Química da FEMA, em temperatura ambiente (vide figura 12).



Figura 11: Local de coleta de resíduo de terra diatomácea em cervejaria.



Figura 12: Resíduo de terra diatomácea homogeneizado em balde.

6.2.2. Recuperação do Resíduo de Terra Diatomácea

Para o processo de recuperação do resíduo de terra diatomácea, foi empregado o método descrito por Pimentel (2006).

Diretamente do balde, a amostra de resíduo foi homogeneizada, com o auxílio de um bastão de plástico. Também foi realizada a medição e correção do pH com Hidróxido de Sódio P.A., até atingir a faixa de alcalinidade. O pH foi aferido com fitas medidoras de pH (MERCK®). Logo após, foram coletadas amostras do resíduo e divididas em 20 tubos de ensaio.

Os tubos de ensaio foram depositados em centrífuga (ITR, Simplex II), durante 15 minutos, para a sedimentação dos sólidos (vide figura 13.a). O sobrenadante foi descartado, como se observa na figura 13.b.

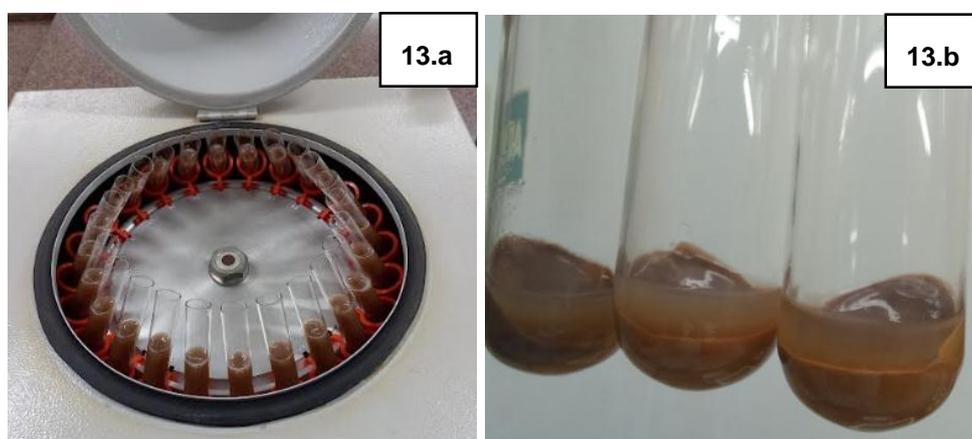


Figura 13: a) Centrifugação de resíduo. b) Precipitação da parte sólida contida nas amostras.

O precipitado de cada um dos tubos foi depositado em um béquer de 150 mL e pesado em balança analítica (BEL, M214Ai). Anotou-se a massa obtida e colocou-se o béquer em estufa (TECNAL, TE-397/4), numa temperatura de 105 °C, durante 24 horas, para perda de umidade. Após a secagem, a amostra foi novamente pesada em balança analítica, anotando-se a massa obtida.

Posteriormente, a amostra foi transferida para uma cápsula de porcelana e submetida ao tratamento em forno mufla (QUIMIS, Q-318D24), para a eliminação de matérias orgânicas e possíveis contaminantes, numa temperatura de 700 °C.

6.2.3. Digestão ácida da amostra

Após o tratamento térmico em mufla, verifica-se que a amostra foi homogeneizada e triturada com o auxílio de pistilo, como mostrado na figura 14.



Figura 14: Amostra sólida obtida, após realização de tratamento térmico em forno mufla.

O método aqui empregado para a realização da digestão ácida da amostra, é descrito por Pimentel (2006, p. 70). Esta etapa se baseia numa técnica para extração de cátions, os quais se solubilizam no sobrenadante, podendo-se determinar a quantidade extraída. Dentre os cátions que podem estar presentes, temos: Cálcio, Ferro, Alumínio, Sódio, Potássio, Magnésio e Silício, apresentando-se na forma de óxidos (CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , SiO_2 , respectivamente).

Em um balão de fundo chato de 250 mL, pesou-se 2,0002 g de resíduo de terra diatomácea recuperado e o mesmo foi diluído em 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. Em outro balão de fundo chato de 250 mL, pesou-se 3,0001 g de resíduo de terra diatomácea recuperado e o mesmo foi diluído em 15 mL de ácido sulfúrico concentrado. As amostras foram nomeadas como A₁ e A₂ respectivamente. Na figura 15, temos o interior da capela de exaustão, onde os balões foram depositados em chapa aquecedora (TECNAL, TE-0851), durante 1 hora, até total digestão da amostra.



Figura 15: Realização de digestão ácida das amostras em chapa aquecedora, no interior de capela de exaustão.

Após resfriadas, as amostras foram filtradas em papel de filtro qualitativo e lavadas com água destilada várias vezes, até se obter um volume do filtrado de 500 mL num balão volumétrico (vide figura 16).



Figura 16: Filtração dos sólidos obtidos, após realização de digestão ácida.

6.2.4. Determinação quantitativa de Sílica

Para determinar a quantidade de sílica existente no resíduo de terra diatomácea, foi utilizado o método descrito por Pimentel (2006, p. 71).

Após realizar a filtração das amostras, as mesmas foram depositadas em forno mufla (QUIMIS, Q-318D24), para realizar sua calcinação, a 550 °C. Assim que concluída a calcinação, as amostras foram depositadas em um dessecador, para não haver absorção de umidade.

As amostras foram pesadas em balança analítica. Para determinar o percentual de sílica existente nas amostras, utilizou-se a equação 1:

$$Ts = (Mf / Mi) \times 100$$

Equação 1: Determinação quantitativa de Sílica.

Onde,

Ts = Teor de Sílica (%)

Mf = Massa Final (g)

Mi = Massa Inicial (g)

6.2.5. Produção de vidro

Para demonstrar a possibilidade da utilização da sílica proveniente do resíduo de terra diatomácea cervejeira na produção de vidros, foi empregado o método descrito por Gomes (2018), Gonçalves (2019) e Souza (2014), que utilizam diferentes fontes de sílica para a produção de vidros.

As amostras de vidro devem conter a seguinte proporção em massa: 70% de sílica, 17% de óxido de sódio e 13% de óxido de cálcio (como precursores dos óxidos, foram utilizados os carbonatos de sódio – Na_2CO_3 – e carbonato de cálcio – CaCO_3 –, respectivamente). Os reagentes foram homogeneizados com o auxílio de pistilo e almofariz.

A fusão das amostras foi realizada em forno mufla elétrico (FORTELAB, ML 1300/10-CHAM), numa temperatura acima dos 1200 °C, para haver homogeneização e afinagem das mesmas. Para diminuir a tensão, as amostras dos vidros obtidos foram submetidas a uma temperatura de 400 °C (FORTELAB, ML 1300/10-CHAM), durante 6 horas. Os vidros permaneceram dentro do forno, até um resfriamento à temperatura ambiente.

6.2.6. Estudo de viabilidade econômica

Além da parte prática, foi realizado um breve estudo de viabilidade econômica, obtendo as principais informações quanto aos gastos empregados no acondicionamento, documentação ambiental e destinação final do resíduo de terra diatomácea, de acordo com dados fornecidos por cervejaria localizada em Cândido Mota/SP.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. RECUPERAÇÃO DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA

Após a homogeneização da amostra, o pH foi corrigido com Hidróxido de Sódio P.A., tendo seu valor inicial igual a 3,5 e, após correção para a faixa alcalina, teve pH com valor igual a 11,0. A acidez observada é referente à presença do ácido acético, produto da fermentação secundária realizada pelas leveduras remanescentes no resíduo.

7.1.1. Remoção da umidade

Logo em seguida da centrifugação e descarte do sobrenadante, os precipitados dos 20 tubos de ensaio foram pesados em balança analítica, resultando numa massa de 50,6547 g. Após secagem em estufa, a massa obtida foi de 8,1549 g, ou seja, 42,4998 g correspondiam à umidade. Os resultados podem ser verificados na Tabela 2.

MASSA TOTAL (g)	MASSA SECA (g)	MASSA CORRESPONDENTE À UMIDADE (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
50,6547	8,1549	42,4998	83,9010

Tabela 2: Remoção de umidade da amostra.

7.1.2. Remoção de matéria orgânica e impurezas

A amostra foi então submetida ao tratamento térmico em mufla para remoção de matéria orgânica, obtendo-se uma massa final de 5,2557 g. Pode-se dizer então que 2,8992 g correspondiam à matéria orgânica e impurezas (vide tabela 3).

MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	MASSA REFERENTE À MATÉRIA ORGÂNICA E IMPUREZAS (g)	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA E IMPUREZAS (%)
8,1549	5,2557	2,8992	35,5516

Tabela 3: Remoção de matéria orgânica da amostra.

O resíduo de terra diatomácea, proveniente do processo de filtração da cerveja apresenta pH ácido, alto teor de umidade e alto teor de matéria orgânica. A sedimentação das partículas sólidas é muito demorada, visto que a terra diatomácea é um material muito leve e com grande capacidade de adsorção, o que torna necessário outros métodos de separação de misturas, como a centrifugação, para acelerar o processo de sedimentação.

7.2. DETERMINAÇÃO QUANTITATIVA DA SÍLICA

Após a realização da digestão ácida, os papéis de filtro qualitativo com as amostras A₁ e A₂ sólidas retidas foram depositados em cápsula de porcelana e posicionados em estufa a 250 °C, para perda da umidade e queima do papel de filtro, durante 1 hora.

As amostras permaneceram em estufa, a uma temperatura de 550 °C, durante 3 horas, para a realização de calcinação. Logo em seguida, foram depositadas em dessecador para resfriar e não absorver umidade.

As amostras foram pesadas em balança analítica, obtendo-se para a amostra A₁ a massa de 1,7962 g, e para a amostra A₂ a massa de 2,8889 g. Para calcular o teor de sílica presente em cada amostra, utilizou-se a fórmula descrita no item 3.2.4, sendo que a massa inicial representa o valor antes da realização da digestão ácida, e a massa final, a massa após calcinação.

Sendo assim, os resultados podem ser observados na tabela 4:

AMOSTRA	M _I , MASSA INICIAL (g)	M _F , MASSA FINAL (g)	T _S , TEOR DE SÍLICA (%)
A ₁	2,0002	1,7962	89,8010
A ₂	3,0001	2,8889	96,2935

Tabela 4: Valores para o cálculo de teor de sílica presente nas amostras.

Embora que foram necessários vários procedimentos para a recuperação da sílica, as amostras obtidas apresentaram elevados teores de pureza, o que indica a necessidade de se tratar este resíduo e aplica-lo a outras finalidades, ao invés de simplesmente descartá-lo.

7.3. PRODUÇÃO DE VIDRO

Após a obtenção do teor de sílica, calculou-se as massas de dióxido de silício presentes nas amostras, de acordo com suas purezas, conforme representado na tabela 5:

AMOSTRA	MASSA TOTAL (g)	TEOR DE SÍLICA (%)	MASSA REAL DA SÍLICA (g)
A ₁	1,7962	89,8010	1,6130
A ₂	2,8889	96,2935	2,7818

Tabela 5: Cálculo de massa, de acordo com a pureza.

Considerando a massa real de sílica das amostras A₁ e A₂ como 70% da massa do vidro, realizou-se cálculo estequiométrico para descobrir as massas de carbonato de sódio e carbonato de cálcio que deveriam ser pesadas, para que a porcentagem de óxido de sódio formado fosse igual a 17%, enquanto que porcentagem de óxido de cálcio fosse igual a 13%.

A seguir, na tabela 6 temos as massas referentes a cada reagente presente nas amostras:

AMOSTRA	MASSA Na ₂ CO ₃ (g)	MASSA Na ₂ O PRODUZIDA (g)	MASSA CaCO ₃ (g)	MASSA CaO PRODUZIDA (g)
A ₁	0,6697	≅ 0,3917	0,5350	≅ 0,2996
A ₂	1,1551	≅ 0,6756	0,9225	≅ 0,5166

Tabela 6: Massa dos reagentes utilizados.

Os reagentes foram homogeneizados com auxílio de pistilo e espátula, sendo transferidos para cadinhos de porcelana de 50 mL.

Os cadinhos foram depositados em forno elétrico a uma temperatura de 1.260 °C, durante 2,5 horas, para homogeneização das amostras (vide figura 17). Para redução da tensão, as amostras permaneceram no interior do forno por mais 6 horas, numa temperatura de 400 °C. Após atingir este tempo, as amostras continuaram no forno, já desligado, até atingir a temperatura ambiente.



Figura 17: Cadinhos no interior de forno, após homogeneização a altas temperaturas.

Os vidros obtidos apresentaram leve coloração esverdeada, como pode ser visto nas figuras 18.a e 18.b, possuindo também alguns trincos e algumas partículas que não fundiram completamente.

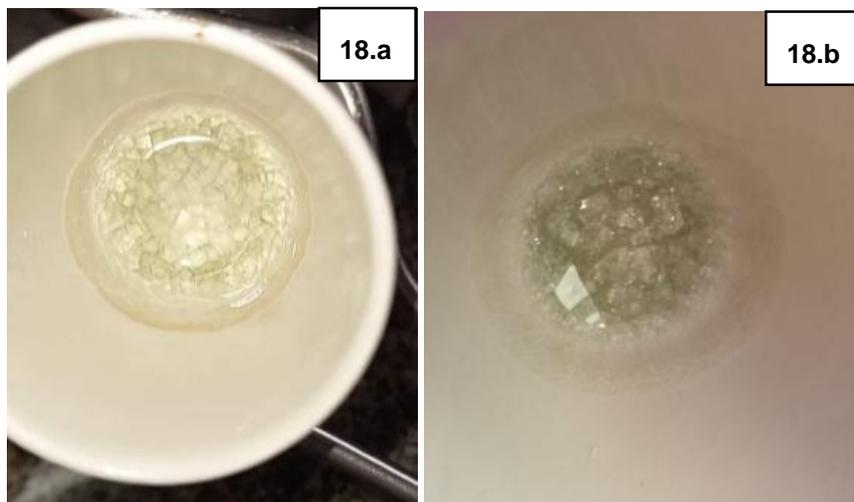


Figura 18: Amostras de vidro obtidas em laboratório, no interior de cadinhos de porcelana. **a)** Amostra A₁. **b)** Amostra A₂.

A fusão e homogeneização não foram totais, pois seria necessária uma temperatura superior aos 1260 °C utilizados neste trabalho, para que todos os componentes se fundam, sendo ela entre 1400 e 1500 °C. A coloração levemente esverdeada se dá pela presença de impurezas, principalmente cátions de ferro ou cobre (AKERMAN, 2000, p. 33) que podem não ter sido eliminados eficientemente durante a etapa de digestão ácida.

Um pequeno fragmento da amostra de vidro obtida foi observado em microscópio óptico. Na figura 19, é possível identificar algumas bolhas no interior do vidro.

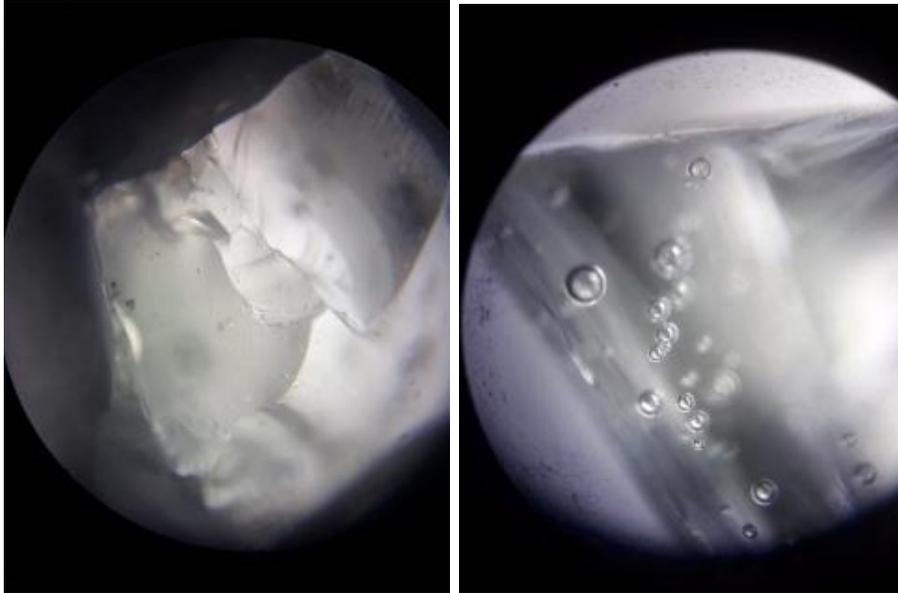


Figura 19: Visualização em microscópio óptico de fragmento da amostra de vidro obtido.

A formação destas bolhas poder ter se dado durante a degradação dos carbonatos a óxidos, visto que há liberação de gás carbônico como produto da reação básica para a formação do vidro.

7.4. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Desejou-se observar o quão produtivo esse processo seria em escala industrial, bem como avaliar os gastos atuais empregados no acondicionamento e destinação final do resíduo. Desta forma, apresentam-se as informações obtidas:

	QUANTIDADE MENSAL	QUANTIDADE ANUAL
Resíduo de Terra diatomácea	80 ton	980 ton
Terra seca (20% do total)	16 ton	192 ton
Sílica recuperada (80-90% pureza)	10,4 ton	124,8 ton

Tabela 7: Quantidade de resíduo gerado e sílica recuperada.

A Tabela 7 demonstra a quantidade gerada por mês e por ano de resíduo de terra diatomácea cervejeira e o quanto de sílica está presente no processo. A partir de 80 toneladas mensais e considerando que toda a umidade do resíduo foi removida, obtém-se 16 toneladas de terra diatomácea seca. Considerando a taxas de 35,55% de matéria orgânica e impurezas, obtida neste trabalho, pode-se concluir que é possível recuperar 10,4 toneladas de sílica com altas taxas de pureza, ao final de cada mês.

Já na Tabela 8, estão representados os gastos empregados no acondicionamento, documentação ambiental requerida e destinação final do resíduo de terra diatomácea cervejeira. Considerando que o resíduo é acondicionado em caçambas de empresa terceirizada, utilizando, em média, uma caçamba por dia (aproximadamente, 30 ao mês) e sua destinação final consiste em envio para compostagem, a seguir estão descritos os gastos para com o resíduo:

	VALOR UNITÁRIO	VALOR MENSAL	VALOR ANUAL
Acondicionamento em caçambas (5 m³)	R\$ 105,00 / caçamba	R\$ 3.150,00	R\$ 37.800,00
CADRI (Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental)	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.300,00
Destinação final para compostagem	R\$ 300,00 / tonelada	R\$ 24.000,00	R\$ 288.000,00
TOTAL	R\$ 405,00	R\$ 27.150,00	R\$ 328.100,00

Tabela 8: Gastos empregados no acondicionamento, destinação final e documentação ambiental do resíduo de terra diatomácea cervejeira.

A partir do estudo de viabilidade econômica, foi verificado que a geração do resíduo de terra diatomácea em cervejarias, bem como os gastos empregados na sua gestão, são consideravelmente altos.

Para confirmar a viabilidade deste processo em escala industrial, seriam necessários vários testes. No entanto, seguindo as metodologias descritas neste trabalho, seriam necessários evaporadores (eliminação de umidade), centrífuga, fornos a altas temperaturas (remoção de matéria orgânica, calcinação e produção de vidro), bem como uma grande quantidade de ácido sulfúrico concentrado (digestão ácida), na proporção de 1:5 (a cada 1 g de SiO₂, utiliza-se 5 mL de H₂SO₄) (PIMENTEL, 2006).

8. CONCLUSÕES

Frente aos estudos e análises realizadas neste trabalho, a sílica recuperada do resíduo de terra diatomácea cervejeira apresentou altos teores de pureza, podendo ser uma fonte alternativa de sílica na produção de vidros. O material formado nos cadinhos se aproxima muito das características de um vidro, mesmo que o processo não tenha apresentado

condições totalmente adequadas, como foi o caso da temperatura insuficiente no forno elétrico. No entanto, foi possível verificar que a sílica existente no resíduo de terra diatomácea cervejeira pode ser reaproveitada com outros fins, sendo um deles na produção de vidros, por exemplo, desde que sob as condições adequadas.

Quanto ao estudo de viabilidade econômica, em escala industrial e seguindo as atuais metodologias descritas neste trabalho, a produção de vidro a partir da sílica recuperada do resíduo de terra diatomácea cervejeira aparenta não ser viável no momento. Mas, considerando os altos gastos empregados na gestão desse resíduo e que este processo teve resultados positivos, abre-se novas oportunidades de estudo nesta área, visando outras metodologias que possam tornar este processo mais viável a uma larga escala.

REFERÊNCIAS

ABNT, Rio de Janeiro. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

AKERMAN, M. (Novembro de 2000). **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. Saint-Gobain Vidros Brasil: CETEV - CENTRO TÉCNICO DE ELABORAÇÃO DO VIDRO.

BIUDES, E. P. **Resíduo de terra diatomácea utilizado como suplementação nutricional na compostagem para a cultura da alface**. 2018, 91 p. Dissertação (Programa de Pesquisa e Pós-Graduação, Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental) - Universidade do Sagrado Coração - USC. Bauru, São Paulo, 2018.

BREANCINI, G. **Filtração da Cerveja: Descrição, Equipamentos e Estudos de Casos**. 2018, 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 2018.

CAMARGO, M. H. **Preparação de Nanopartículas de Sílica**. 2011, 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - FEMA/IMESA. Assis, São Paulo, 2011.

FLORIANI, H. A. **Utilização dos resíduos gerados na filtração de cervejas para a produção de tijolos ecológicos**. 2017. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Centro Universitário FACVEST (UNIFACVEST). Lages, Santa Catarina, 2017.

GOMES et al, V. R. Produção de vidros silicatos com resíduo fino de quartzito. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 73, 2018. São Paulo. **73º Congresso Anual da ABM - Internacional**, outubro-2018, 8 p.

GONÇALVES, J. L. **Fabricação de vidros utilizando sílica proveniente da cinza da casca de arroz**. 2019. 68 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* Em Engenharia) - Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2019.

GOULART et al., M. R. (2011). METODOLOGIAS PARA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE TERRA DIATOMÁCEA, PROVENIENTE DA FILTRAÇÃO E CLARIFICAÇÃO DA CERVEJA. **Química Nova**, 625-629.

HUANCA, K. Z.; NUNES, A. B. de A. (2016). **Obtenção de espumas cerâmicas a partir de resíduo da terra diatomácea e ignimbrita pelo método de réplica**. Scielo Articles,

Cerâmica, 62. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132016623621934>>. Acesso em 24 de Setembro de 2021.

LIMA, K. N. **Reciclagem de Vidro**. 2011, 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - FEMA/IMESA. Assis, São Paulo, 2011.

LIMBERGER, S. C. **O setor cervejeiro no Brasil: gênese e evolução**. 2014, 17 p. UNICENTRO - Departamento de Geografia. Guarapuava, Paraná, 2014.

MEGA, J. F., NEVES, E., ANDRADE, C. J. de. (2011). A PRODUÇÃO DA CERVEJA NO BRASIL. *Revista Citino (Ciência, Tecnologia, Inovação e Oportunidade)*, Vol. 1, No. 1, p. 34-42.

MELLO, E. T., PAWLOWSKY, U. (2002). Minimização de resíduos em uma indústria de bebidas. *BRASIL ALIMENTOS*, N° 17, p. 24-29.

PIMENTEL, P. A. **Análise físico-química e energética do resíduo da terra diatomácea utilizada como auxiliar de filtração na indústria de cerveja**. 2006, 105 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista - Unesp - Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, São Paulo, 2006.

REBELLO, F. F. P. (2009). PRODUÇÃO DE CERVEJA. *Revista Agrogeoambiental*, p. 145-155.

ROSA, N. A., AFONSO, J. C. (2014). A Química da Cerveja. *Química e Sociedade*, Vol. 37, N° 2, p. 98-105.

SAVARIS et al., G. (2019). UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE FILTRO DE CERVEJARIA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO. *Acta Iguazu*, 35-44.

SCHALCH et al., V. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. 2002, 93 p. Universidade de São Paulo - USP - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos, São Paulo, 2002.

SILVA, H. A.; LEITE, M. A.; PAULA, A. R. V. de. (2016). Cerveja e Sociedade. *Contextos da Alimentação*, Vol. 4, N° 2, p. 85-91.

SILVA, J. P. V. dos S. **Vidro Estrutural: Caracterização do material e estudo de caso.** 2017, 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba - UFPB. João Pessoa, Paraíba, 2017.

SOUSA, S. N. **Efeito da adição de diatomito nas propriedades tecnológicas dos geopolímeros.** 2016. 75 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica - Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal, 2016.

SOUZA et al, M. T. Produção e caracterização de vidro sódico-cálcico a partir de areias de quartzo do estado de Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21, 2014. Cuiabá. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, novembro-2014, p. 470-477.

SHREVE, R. N.; BRINK JR, J. A. **Indústrias de Processos Químicos**, 4ª edição. Tradução por Horacio Macedo, Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1997.

TOCCHETTO, M. R. L. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais.** 2005, 97 p. Universidade Federal de Santa Maria - Departamento de Química – CCNE, Química Industrial. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.