

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

LAURA DOS REIS GONÇALVES

**A HIALOTECNIA E O VIDRO NO CONTEXTO CIENTÍFICO: CONCEITOS E
APLICAÇÕES PARA A PESQUISA EM QUÍMICA**

São Carlos - SP
2025

LAURA DOS REIS GONÇALVES

A HIALOTECNIA E O VIDRO NO CONTEXTO CIENTÍFICO: CONCEITOS E
APLICAÇÕES PARA A PESQUISA EM QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do título
de Bacharel em Química.

Orientadora: Prof.^a Dra. Karina Omuro Lupetti

São Carlos - SP
2025

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais,
que são a minha base para tudo; e à minha tia,
que eu gostaria que ainda estivesse aqui ao meu lado,
com todo o carinho e apoio que sempre me deu.

Dedico também à minha orientadora, prof^a Karina Omuro Lupetti,
e ao meu supervisor de estágio Ademir Sertori, por todos os
ensinamentos e pelo acolhimento que proporcionaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus amigos, especialmente àqueles que conheci durante a graduação, por tornarem meus dias mais leves e felizes, e por me darem forças sempre que precisei. Ter com quem compartilhar as alegrias e os desafios dessa jornada fez toda a diferença.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Karina Omuro Lupetti, minha gratidão profunda pela inspiração constante, por acreditar em mim, enxergar meu potencial e me incentivar a seguir por esse caminho que, embora repleto de desafios, também é cheio de significado.

E, por último, e mais importante, agradeço à minha família — meus pais, avós e minha tia — por todo o apoio, amor e incentivo incondicional ao longo da minha vida. Vocês são minha base e minha maior fonte de motivação. Em especial, agradeço aos meus pais, não só pelo apoio constante, mas por estarem presentes nos momentos mais felizes, e também nos mais difíceis e solitários; agradeço pelos conselhos, pelos ombros sempre prontos para me acolher e por me darem a segurança de saber que, no fim do dia, sempre terei um lugar para voltar e chamar de lar.

RESUMO

A hialotecnia, arte e técnica de moldar o vidro, é uma prática consolidada na produção, adaptação e reparo de vidrarias científicas, desempenhando um papel fundamental na pesquisa em Química. Sua trajetória acompanha o desenvolvimento do próprio vidro, desde as origens históricas até sua integração como atividade especializada em universidades e centros de pesquisa. Com o avanço da Química, a necessidade de instrumentos precisos e adaptáveis tornou a hialotecnia uma ferramenta para a realização de experimentos com segurança e eficiência. Este trabalho apresenta uma abordagem descritiva e contextualizada da hialotecnia, com ênfase em suas aplicações em laboratórios de ensino e pesquisa. A proposta também inclui a valorização da prática do hialotécnico, profissional que atua na confecção e manutenção das vidrarias. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica, associada a um estudo de caso realizado na oficina de hialotecnia do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), onde foram acompanhadas as etapas de confecção e reparo de peças laboratoriais. O trabalho evidencia que a hialotecnia ultrapassa o papel de suporte técnico nos laboratórios; a profissão contribui para a continuidade de pesquisas, para a economia de recursos e para a confecção de equipamentos não disponíveis comercialmente. Apesar disso, a hialotecnia ainda carece de maior visibilidade e formação formal no Brasil. Valorizar a hialotecnia é, portanto, reconhecer a importância de uma técnica que sustenta a ciência experimental.

Palavras-chave: Hialotecnia. Vidro. Instrumentação.

ABSTRACT

Hyalotechnics, defined as the art and technique of shaping glass, is a consolidated practice in the production, adaptation, and repair of scientific glassware, playing a fundamental role in chemical research. Its historical development parallels that of glass itself, evolving from ancient craftsmanship to a specialized technical activity within universities and research institutions. With the advancement of Chemistry, the demand for precise and adaptable instruments made hyalotechnics a tool to enable safe and efficient experimentation. This study presents a descriptive and contextualized analysis of hyalotechnics, emphasizing its practical applications in academic and research laboratory environments. The work also aims to highlight the role and technical expertise of the hyalotechnician, the professional responsible for the fabrication, modification, and maintenance of laboratory glassware. The methodology involved a comprehensive literature review combined with a case study conducted in the hyalotechnics workshop of the Department of Chemistry at the Federal University of São Carlos (UFSCar), where the stages of manufacturing and repairing laboratory equipment were systematically observed and documented. The study demonstrates that hyalotechnics transcends the notion of auxiliary technical support. It contributes significantly to the continuity of research, cost-effectiveness, and the development of customized scientific instruments not readily available on the market. Despite its relevance, the field still faces a lack of formal training programs and institutional visibility in Brazil. Promoting the recognition of hyalotechnics is, therefore, essential to strengthening the experimental foundations of scientific practice.

Keywords: Hyalotechnic. Glass. Instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Balão de vidro romano soprado, Museu Nacional.....	12
Figura 2 - Exemplar da primeira edição da Historia Naturalis, 1469.....	12
Figura 3 - Galeria dos Espelhos, Versalhes.....	13
Figura 4 - Exemplo de <i>carnival glass</i>	14
Figura 5 - Comparação entre sólidos amorfos e cristalinos: transição vítrea.....	18
Figura 6 - Obsidianas.....	20
Figura 7 - Tectitos.....	20
Figura 8 - Fulguritas.....	20
Figura 9 - Unidade básica da rede de sílica.....	21
Figura 10 - Esquemas bidimensionais para a estrutura do SiO ₂	21
Figura 11 - Hialotécnico Ademir Sertori realizando a técnica de sopro para moldar o vidro ao maçarico.....	40
Figura 12 - Hialotécnico Ademir Sertori aplicando a técnica de solda para consertar uma torneira de um balão de fundo redondo.....	42
Figura 13 - Uso da serra diamantada para corte em vidro.....	46
Figura 14 - Uso de lixa para acabamento.....	48
Figura 15 - Uso do torno para conserto de erlenmeyer.....	49
Figura 16.a - Preparação do corpo do reator.....	57
Figura 16.b - Solda das juntas ao reator.....	57
Figura 16.c - Reator finalizado com todas as suas conexões e peças necessárias.....	58
Figura 17 - Ferramenta de grafite para molde de juntas.....	59
Figura 18.a - Espátula de grafite.....	59
Figura 18.b - Agulha de tungstênio.....	59
Figura 18.c - Suporte para rotacionar tubos de vidro.....	59
Figura 19.a - Aplicação de tinta na lateral do tubo de vidro de chumbo.....	62
Figura 19.b - Solda ponto.....	62
Figura 19.c - Solda de placa de platina ao eletrodo.....	62
Figura 19.d - Aplicação do adesivo epóxi na extremidade do eletrodo.....	62
Figura 19.e - Etapas de um eletrodo durante sua confecção.....	62
Figura 20.a - Confecção da oliva soldada ao condensador.....	64
Figura 20.b - Solda da oliva.....	64
Figura 20.c - Junção do tubo interno com o tubo externo do condensador.....	65
Figura 20.d - Técnica de sopro aplicada à confecção do condensador.....	65
Figura 20.e - Condensador finalizado.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos óxidos comumente encontrados na composição dos vidros.....	23
Tabela 2 - Principais Composições do Vidro Borossilicato.....	24
Tabela 3 - Principais Composições do Vidro Alcalino.....	25
Tabela 4 - Composição do Vidro de Chumbo.....	27
Tabela 5 - Composição do Vidro de Quartzo.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO	17
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
3.1. Estrutura do Vidro.....	17
3.2. Composição do Vidro.....	23
3.2.1. Vidro Borossilicato.....	23
3.2.2. Vidro Alcalino.....	25
3.2.3. Vidro de Chumbo.....	26
3.2.4. Vidro de Sílica.....	27
3.3. Propriedades.....	28
3.4. Hialotecnica: Técnicas para Manuseio em Vidros.....	38
3.4.1. Sopro.....	38
3.4.2. Soldas.....	40
3.4.3. Recozimento.....	42
3.4.4. Gravação e Perfuração.....	43
3.4.5. Cortes.....	45
3.4.6. Lixamento e Polimento.....	46
3.4.7. Tornos.....	48
3.4.8. Espelhamento.....	49
3.4.9. Vácuo.....	50
3.4.10. Tipos de Chama.....	52
4. ESTUDO DE CASO	54
4.1. Confeção de Reator.....	55
4.2. Confeção de um Eletrodo.....	60
4.3. Confeção de Condensador Liebig.....	62
4.4. Comparação com a Literatura	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

A história do vidro tem início nas civilizações mais antigas, e está relacionada com o próprio desenvolvimento da ciência e da tecnologia ao longo dos séculos. Embora a origem exata de sua descoberta tenha se perdido no tempo, há registros históricos que situam a primeira produção acidental de vidro há cerca de 4.000 anos a.C ¹. Um dos relatos mais antigos, atribuído a Plínio, o Velho, na obra *Historia Naturalis* (Figura 1), escrita por volta de 77 d.C, descreve a formação do vidro a partir da fusão de areia e soda durante a preparação de alimentos por marinheiros fenícios, nas margens do rio Belus^{1,2}. Algumas evidências arqueológicas apontam que os primeiros objetos de vidro produzidos intencionalmente foram na Mesopotâmia e no Egito, na forma de pequenas contas e miçangas utilizadas para adorno pessoal, ainda no terceiro milênio antes de Cristo. Existem relatos que apontam que as primeiras produções do material estavam diretamente relacionadas à metalurgia, pois o vidro pode ter se originado como subproduto proveniente dos fornos utilizados para fundir metais. Outra hipótese está relacionada com a técnica de esmaltação cerâmica, desenvolvida na mesma época, em que superfícies de argila eram revestidas com uma camada vítrea colorida durante a queima. Tanto a esmaltação quanto a metalurgia envolviam o uso de fornos e materiais semelhantes, como sílica e óxidos metálicos, e podem ter contribuído para o desenvolvimento do vidro como um material independente. A partir dessas práticas, foram se consolidando os conhecimentos necessários para manipular essas substâncias em altas temperaturas. A primeira grande inovação foi a identificação da mistura adequada de areia, cal e soda — elementos fundamentais que, quando são fundidos em proporções precisas, originam um material vítreo que com o tempo passou a ser transparente, duro e liso — ou seja, o vidro ².

Porém, foi durante o Império Romano que o vidro ganhou destaque como um material útil e acessível ³. Técnicas como a moldagem em núcleo, o uso de óxidos metálicos para coloração do material e, principalmente, a técnica do sopro, criada por volta de 20 a.C, expandiram tanto o seu uso quanto a sua manufatura. Um exemplo dessa técnica está representado na Figura 2, que ilustra um balão romano confeccionado por sopro livre.

Figura 1 - Exemplar da primeira edição da Historia Naturalis. Museu de Vidro Corning, Rochester, Nova York, EUA.



Fonte: Dolbachian, D. Plynus the Elder (Gaius Plinius Secundus), Historia Naturalis, about A.D. 77. Corning Museum Glass. 2014.

Figura 2 - Balão de vidro romano soprado, Museu Nacional.



Fonte: SILVA, Wladimir T.; FILGUEIRAS, Carlos A. L.O VIDRO E SUA IMPORTÂNCIA NA VIDA E NA QUÍMICA. Química Nova, Belo Horizonte, MG, 2022.

Após a queda do Império Romano, a produção de vidros na Europa declinou, enquanto se desenvolvia no mundo islâmico e bizantino ⁴. Na Idade Média, surgiram avanços como a produção de vidro plano e, posteriormente, no século XVII, a técnica de fundição sobre superfícies lisas, desenvolvida pela Manufatura Real de Vidros Saint-Gobain, possibilitou a criação de grandes painéis, como os da Galeria dos Espelhos, em Versalhes ^{4,5} (Figura 3).

Figura 3 - Galeria dos Espelhos, Versalhes.



Fonte: The Hall of Mirrors. Disponível em
<<https://en.chateauversailles.fr/discover/estate/palace/hall-mirrors#the-hall-of-mirrors>>.

Durante o Renascimento, Veneza emergiu como um dos principais centros de produção de vidros, com os artesãos de Murano desenvolvendo novas técnicas. Nesse período, o vidro passou a ser utilizado em instrumentos ópticos e científicos, como telescópios e microscópios, contribuindo para o avanço da ciência moderna^{5,6}.

A partir do século XIX, a produção de vidrarias científicas se industrializou, com destaque para a fundação da “*Glastechnisches Laboratorium Schott & Genossen*”, na cidade alemã de Jena . Nesse contexto, diversos instrumentos laboratoriais em vidro tornaram-se padronizados e essenciais à prática científica. Um marco relevante foi o desenvolvimento do vidro borossilicato, por Otto Schott, posteriormente comercializado nos Estados Unidos como Pyrex, material reconhecido por sua resistência térmica e ampla aplicação em laboratórios ⁶.

As origens da fabricação de vidro no Brasil ainda são incertas, mas estão diretamente ligadas ao comércio marítimo e à importação de produtos vindos de Portugal no período colonial. Durante a ocupação holandesa no Nordeste, entre

1637 e 1644, houve uma breve tentativa de produção local. No entanto, essa iniciativa foi interrompida após a retirada dos holandeses. Posteriormente, o alvará de 1785, emitido por D. Maria I, proibiu o estabelecimento de manufaturas na colônia, dificultando o surgimento de uma indústria vidreira local ⁷.

A primeira fábrica de vidro do país foi fundada apenas em 1810, na Bahia, com a chegada da corte portuguesa. Instalada em Jiquitaia, contou com artesãos portugueses e ingleses e operava com base em modelos fornecidos pelos próprios clientes. Ainda no século XIX, surgiram outras fábricas importantes, como a Fábrica de Vidros São Roque (1839) e a Fábrica Esberard (1878), ambas no Rio de Janeiro. Esta última se destacou pelo uso de areia do mar como fonte de sílica, emprego de maquinário a vapor e ampla diversidade de produtos, incluindo objetos decorativos como o *carnival glass* (Figura 4) ^{6,8}.

Figura 4 - Exemplo de *carnival glass*, popular no final do século XIX e início do século XX.



Fonte: WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Carnival glass.

No início do século XX, a industrialização do setor se intensificou com a fundação da Cisper, que introduziu o uso de máquinas automáticas e atendeu grandes empresas, como a Brahma, a partir de 1918 ⁹. Desde então, a indústria de

vidros brasileira cresceu consideravelmente, atingindo, em 2020, uma produção diária de 7.530 toneladas de vidro plano e um faturamento estimado em 4,5 bilhões de reais ¹⁰. Apesar disso, a produção de vidraria científica continua representando uma fração mínima do setor, com apenas 9 das 47 empresas ativas envolvidas nesse segmento. Em 2011, por exemplo, vidrarias científicas correspondiam a apenas 5,5% da produção nacional ¹¹.

Entre os principais desafios enfrentados, destaca-se a escassez de mão de obra especializada. O Brasil ainda não conta com centros de formação dedicados à área, limitando sua expansão. Apesar disso, iniciativas relevantes contribuíram para o avanço científico, como a criação do Laboratório de Materiais Vítreos (LAMAV), na UFSCar, em 1976 ¹².

Diante de todo esse desenvolvimento tecnológico e histórico, surge a necessidade de compreender como a hialotecnia passou a integrar o universo científico brasileiro. Sua institucionalização nas universidades e centros de pesquisa marca um novo capítulo na relação entre o vidro e a ciência no Brasil.

A hialotecnia se inicia acompanhando o desenvolvimento da própria ciência e da indústria, embora o termo seja mais recente. A palavra deriva da junção de dois termos gregos: *hialos*, que significa 'vidro' ou 'substância transparente', e *téchne*, que pode ser traduzido como 'arte' ou 'técnica'. Portanto, a hialotecnia significa a técnica ou a arte de trabalho em vidro⁴. A prática consiste na manipulação e moldagem do vidro com o objetivo de desenvolver peças destinadas à pesquisas científicas, ou seja, vidrarias para laboratórios, e peças artísticas.

Durante séculos, os mestres vidreiros foram os principais responsáveis por fabricar peças utilitárias ou ornamentais, e sua habilidade era passada oralmente, em oficinas familiares. No entanto, com o avanço da ciência nos séculos XVII e XVIII, e com o crescimento dos laboratórios de pesquisa e a expansão da indústria química, a hialotecnia ganhou cada vez mais relevância, e se fez necessário um profissional capaz de produzir instrumentos mais precisos e adaptados às exigências da experimentação científica.

Foi nesse contexto que surgiu a figura do hialotécnico, inicialmente como um artesão com conhecimento empírico, que aprendia o conteúdo dentro de instituições científicas ou em oficinas vinculadas à universidades e centros de pesquisa. A sua formação era feita, muitas vezes, diretamente no ambiente de trabalho, observando e auxiliando profissionais mais experientes. Com o tempo, esse profissional passou

a ser reconhecido pela sua capacidade de interpretar os projetos técnicos e transformar tubos, bastões e lâminas de vidro em peças mais complexas, como por exemplo diversas vidrarias de laboratórios, como condensadores, balões de fundo redondo, colunas de destilação, entre outros ⁸.

No Brasil, a profissão de hialotécnico se estabeleceu ao longo do século XX, principalmente com a expansão das universidades públicas e dos centros de pesquisa científica. Laboratórios universitários passaram a contar com setores próprios de hialotecnia, onde esses profissionais atuavam na fabricação, adaptação e recuperação de vidrarias de uso laboratorial. O crescimento da demanda por equipamentos científicos específicos e muitas vezes não disponíveis comercialmente também impulsionou a valorização dessa especialidade ^{6,7}.

A atuação do hialotécnico exige um conhecimento interdisciplinar. Além da habilidade manual, o profissional também deve dominar algumas propriedades físico-químicas do vidro, seus diferentes tipos e seu comportamento em altas temperaturas, para entender como a vidraria será utilizada nos experimentos. Também é necessário conhecimento sobre os equipamentos de trabalho, como maçaricos, torno de vidro, fornos e ferramentas específicas de corte e moldagem ^{6,13}.

Faz parte do papel do hialotécnico a capacidade de restaurar diversas vidrarias danificadas. Em vez de descartá-las, muitos laboratórios contam com a prática do hialotécnico para realizar cortes, fusões ou substituições pontuais, prolongando a vida útil dos materiais e, assim, contribuindo para a sustentabilidade e a racionalização de recursos, especialmente em instituições públicas e centros de pesquisa com orçamento restrito.

A hialotecnia também impacta o desenvolvimento da Química enquanto ciência experimental. A possibilidade de produzir peças sob medida, adaptadas a necessidades específicas de cada experimento, oferece aos pesquisadores a execução de investigações e experimentos mais complexos. Além disso, a manutenção e modificação das vidrarias garantem continuidade aos projetos, minimizando interrupções e custos operacionais.

Nesse contexto, é primordial reconhecer a hialotecnia não apenas como atividade de apoio técnico, mas como uma profissão necessária para o avanço da pesquisa científica no Brasil. A ampliação da formação de hialotécnicos, por meio da oferta de cursos técnicos e programas de qualificação específicos, é uma medida

necessária para suprir a demanda existente e fortalecer a capacidade técnica dos laboratórios de pesquisa e ensino no país.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma pesquisa descritiva sobre a hialotecnia e sobre os vidros, abordando suas principais propriedades, aplicações e as técnicas envolvidas na produção e manutenção de peças voltadas para uso laboratorial. Além disso, o trabalho também busca contribuir para a divulgação e valorização da profissão do hialotécnico, que ainda é pouco visível e reconhecida, apesar de sua relevância no contexto científico e acadêmico.

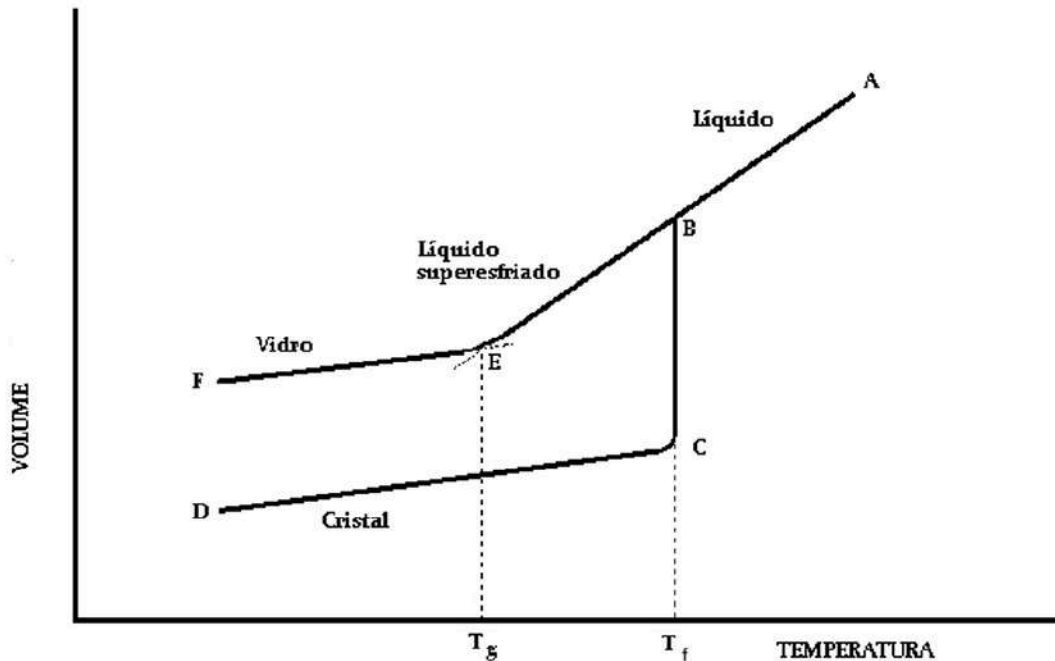
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Estrutura do Vidro

George W. Morey, geólogo e físico-químico norte-americano que contribuiu para o entendimento das propriedades físico-químicas dos vidros, define o vidro como “uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual porém como resultado de uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido”¹⁴. A definição de Morey, embora útil do ponto de vista técnico, não esgota a complexidade do que é o vidro. Em 2017, os professores Edgar Dutra Zanotto (UFSCar) e John Mauro (Penn State University) propuseram uma definição moderna para o vidro, caracterizando-o como um estado da matéria não cristalino e fora do equilíbrio termodinâmico, que aparenta ser sólido em escalas de tempo curtas, mas que relaxa continuamente em direção ao estado líquido¹². Esta definição contempla de forma mais abrangente as diferentes características e propriedades deste material.

A formação do vidro pode ser melhor compreendida por meio da análise da variação do volume em função da temperatura, como demonstra a Figura 5.

Figura 5 - Comparação entre sólidos não cristalinos e cristalinos: transição vítrea observada no gráfico Volume × Temperatura



Fonte: AKERMAN, M. Natureza, Estrutura e Propriedades Do Vidro; Centro Técnico de Elaboração do vidro: São Paulo, 2000.

Partindo de temperaturas mais elevadas, é possível observar o resfriamento do líquido até o mesmo atingir o ponto de solidificação, representado no gráfico por T_f , referente à temperatura de fusão. A partir deste ponto, ele pode se tornar um sólido cristalino com uma transformação descontínua em seu volume, ou então continuar como um líquido super resfriado abaixo dessa temperatura. A mesma substância pode se comportar de uma maneira ou de outra, dependendo das circunstâncias. Ao evitar a formação de núcleos de cristalização, em torno dos quais os cristais podem se formar, existe grande probabilidade de obter-se um líquido super-resfriado ^{5,6}.

No caso do vidro, que se forma a partir do líquido super-resfriado, a curva de volume x temperatura não apresenta a descontinuidade da cristalização. Em vez disso, há uma mudança contínua de inclinação na curva, marcada por uma temperatura característica, conhecida como temperatura de transformação ou temperatura de transição vítrea (T_g). Esta é uma faixa de temperatura na qual o material não cristalino passa de um estado duro e rígido (vítreo) para um estado

mais viscoso. Abaixo de T_g , o material deixa de ser um líquido super-resfriado e passa a se comportar como um sólido vítreo.

O vidro não está em equilíbrio termodinâmico. Sua estrutura desordenada o classifica como um material não cristalino¹⁵, e a sua estrutura é formada desta forma devido ao fato de que, durante a formação do vidro, o resfriamento rápido impede a organização atômica necessária à cristalização. Adicionalmente, o vidro é termicamente instável: mantido por longos períodos acima da sua temperatura de transição vítrea, pode cristalizar parcialmente ou totalmente — processo conhecido como desvitrificação.

Na natureza, ele pode ser encontrado sob a forma de obsidianas, tectitos e fulguritas, todos produzidos mediante fenômenos naturais que geram a fusão de rochas. Dentre as três, a obsidiana é a forma mais comumente encontrada e pode ser observada na Figura 6, produzida através do processo de resfriamento rápido do magma, que impede a formação de cristais^{16,17}. Os tectitos são pequenos fragmentos de vidro, que, em sua composição, variam entre 60-80% de dióxido de silício (SiO_2), e são encontrados principalmente na Costa do Marfim, Austrália, América do Norte e República Tcheca. Eles são formados através do impacto de fragmentos de meteoritos, que ao colidirem com a superfície terrestre em altas temperaturas, se fundem com detritos da superfície formando um material vítreo (Figura 7). Já as fulguritas são formadas pelo impacto de raios sob a superfície terrestre, variando em suas composições de acordo com a constituição química do local de impacto, sendo areia, rocha e argila os três principais constituintes responsáveis por gerar esse fenômeno (Figura 8).

Figuras 6, 7 e 8 - Vidros encontrados sob a forma de obsidianas, tectitos e fulguritas, respectivamente (da esquerda para a direita).

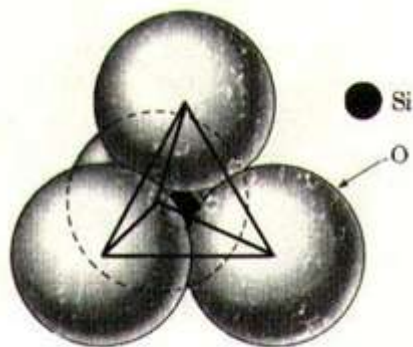


Fonte: Wikipedia

Os vidros apresentam uma estrutura composta por redes tridimensionais extensas e desordenadas. Na sílica, ou dióxido de silício, de fórmula mínima SiO_2 , os átomos de silício estão no centro de um tetraedro formado por oxigênios nos vértices, formando uma estrutura regular polimorfa. Já no vidro, essa regularidade observada na sílica é substituída por uma estrutura irregular, que se costuma comparar à estrutura de um líquido, mas de um líquido super-resfriado com alta viscosidade ¹⁸.

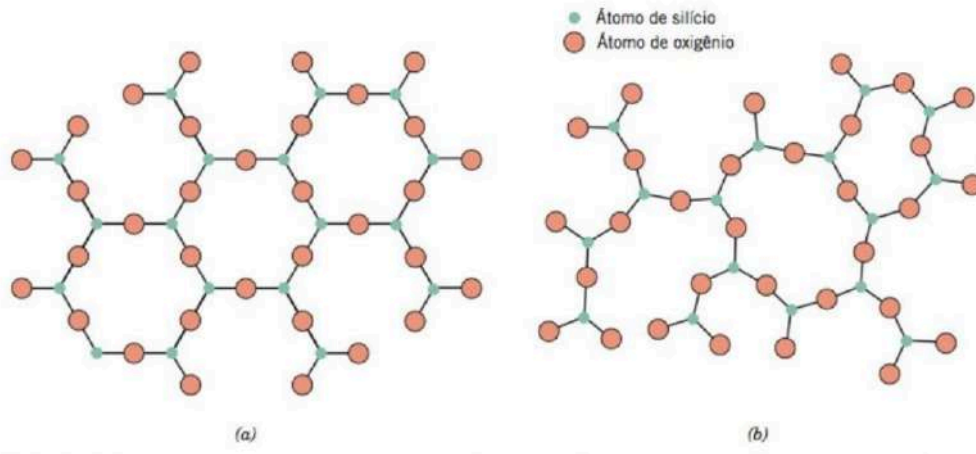
Nos vidros e minerais de sílica pura, como o quartzo, os tetraedros de sílica estão interligados entre si por seus vértices, ou seja, compartilham átomos de oxigênio com tetraedros vizinhos. Cada oxigênio compartilhado é denominado “bridging oxygen”, pois atua como uma ponte entre dois átomos de silício. Quando todos os quatro oxigênios de um tetraedro estão nessa posição, forma-se uma rede tridimensional altamente conectada e contínua, característica do SiO_2 ^{5,18}. As Figuras 9 e 10 representam a unidade estrutural básica da rede de sílica e também as estruturas encontradas para um sólido cristalino e para o vidro.

Figura 9 - Unidade básica da rede de sílica.



Fonte: Akerman, M. Natureza, Estrutura e Propriedades Do Vidro; Centro Técnico de Elaboração do vidro: São Paulo, 2000.

Figura 10 - Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não cristalino.



Fonte: CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais. 8. ed. 2012.

A partir da análise dos arranjos atômicos em determinados compostos químicos, tornou-se possível compreender a estrutura necessária para a formação dos vidros. Alguns elementos cujos átomos possuem tamanhos adequados para serem coordenados por quatro átomos de oxigênio podem formar arranjos tetraédricos, como o silício, formando o SiO_2 , gerando cadeias que se organizam de forma desordenada, produzindo os vidros. Os óxidos desses elementos são chamados de formadores de rede ¹⁴. Por outro lado, elementos cujos átomos apresentam maior tamanho e altos números de coordenação tendem a se ligar a mais de quatro oxigênios, como por exemplo os metais alcalinos e alcalinos-terrosos, formando óxidos conhecidos como modificadores. Eles atuam quebrando ligações Si–O–Si da estrutura tridimensional contínua da sílica (SiO_2), que é o principal formador da estrutura vítrea. Ao interromper essa estrutura, formam-se unidades terminais (não ligadas) com oxigênios não compartilhados, conhecidos como “non bridge oxygen”. Essa mudança estrutural resulta em uma diminuição significativa da viscosidade do vidro, além de baixar também seu ponto de fusão. Como consequência, o vidro pode torna-se mais fluido e maleável quando aquecido, o que favorece sua conformação por sopro, prensagem ou moldagem em processos industriais. Ou seja, quando adicionados aos formadores de rede, os modificadores influenciam na viscosidade, ponto de fusão e durabilidade química ^{5,14}.

Há ainda um terceiro grupo de óxidos denominado intermediários, que não conseguem formar vidros de forma isolada, como por exemplo o Al_2O_3 . Contudo, na presença de formadores de rede, esses óxidos passam a atuar como extensores da

rede vítrea, adquirindo seu número de coordenação e contribuindo para a estabilidade estrutural do material. A sua atuação depende da proporção em que são adicionados ao vidro, além da presença de outros componentes. Em geral, os formadores de rede são óxidos ácidos, os modificadores são básicos e os intermediários são anfóteros.

Alguns óxidos são adicionados em quantidades reduzidas na rede vítrea com finalidades específicas, como, por exemplo, o ajuste da coloração do vidro. Óxidos de metais de transição, como FeO, Fe₂O₃, Co₂O₃, CuO e Cr₂O₃, são comumente utilizados como corantes, resultando em colorações variadas, como azul, verde e tons intermediários ¹⁴. Além disso, compostos como o trióxido de arsênio (As₂O₃) e o trióxido de antimônio (Sb₂O₃) são empregados para facilitar o refino do vidro, promovendo a eliminação de bolhas. Outros aditivos, como sulfetos, selenetos e fluoretos, também são utilizados na produção de vidros opalinos e coloridos.

3.2. Composição do Vidro

A caracterização dos vidros pode ser realizada de forma eficaz por meio da análise química. Nessa abordagem, os elementos constituintes são geralmente expressos sob a forma de seus óxidos correspondentes. A soma das massas desses óxidos tende a coincidir com a massa total da amostra analisada, dentro dos limites aceitáveis de erro experimental, o que constitui uma forte evidência de que os vidros são predominantemente compostos por óxidos ⁶.

Os óxidos presentes no vidro combinam-se para formar estruturas simples e complexas. Devido à sua complexidade estrutural e variabilidade nas composições, é comum descrevê-lo em termos percentuais. A Tabela 1 abaixo demonstra os óxidos comumente encontrados na composição dos vidros.

Tabela 1 - Classificação dos óxidos comumente encontrados na composição dos vidros ¹⁴.

Formadores de rede	Intermediários	Modificadores
B ₂ O ₃ - óxido de Boro	Al ₂ O ₃ - óxido de Alumínio	MgO - óxido de Magnésio
SiO ₃ - óxido de Silício	Sb ₂ O ₃ - óxido de Antimônio	Li ₂ O - óxido de Lítio
GeO ₂ - óxido de Germânio	ZrO ₂ - óxido de Zircônio	BaO - óxido de Bário
P ₂ O ₅ - óxido de Fósforo	TiO ₂ - óxido de Titânio	CaO - óxido de Cálcio
V ₂ O ₅ - óxido de Vanádio	PbO - óxido de Chumbo	SrO - óxido de Estrôncio
As ₂ O ₃ - óxido de Arsênio	BeO - óxido de Berílio	Na ₂ O - óxido de sódio
	ZnO - óxido de Zinco	K ₂ O - óxido de Potássio

A seguir, serão apresentadas e discutidas as composições dos principais tipos de vidros que já foram e ainda são utilizados na Hialotecnia.

3.2.1. Vidro Borossilicato

O vidro borossilicato é o mais comumente utilizado na produção de vidrarias laboratoriais. É caracterizado pela presença em quantidade significativa de óxido de boro (B₂O₃) em sua composição, geralmente entre 12% e 15%, além de sílica (SiO₂) como principal composto em sua composição ^{8,14}. A introdução do B₂O₃ na estrutura vítrea resulta em uma rede tridimensional mais estável e menos suscetível a variações volumétricas com a temperatura, conferindo ao material elevada resistência ao choque térmico. Isso ocorre porque o B₂O₃ atua reduzindo a expansão térmica do vidro, tornando-o menos propenso a fraturas sob mudanças bruscas de temperatura. Além disso, o boro também contribui para uma maior resistência química, pois forma ligações fortes e pouco reativas com os oxigênios da estrutura, dificultando a penetração de agentes agressivos ¹⁴.

Em razão dessas propriedades, o vidro borossilicato é muito utilizado na fabricação de ampolas para injetáveis, frascos de fármacos e vacinas, bem como em diversas vidrarias para laboratório que podem ser aquecidas diretamente e expostas a agentes corrosivos, como béqueres, tubos de ensaio, condensadores, balões de fundo redondo, erlenmeyers, colunas de cromatografia, entre outros ¹⁹. Também é aplicado em utensílios domésticos resistentes ao forno, como travessas e tigelas, e até mesmo em lentes para óculos, e para microscópios e telescópios, devido à sua

transparência e estabilidade.

Por essas razões, o borossilicato permanece como um dos materiais vítreos mais versáteis e valorizados na indústria científica, farmacêutica e doméstica. A seguir, a Tabela 2 demonstra as principais composições do vidro borossilicato.

Tabela 2 - Principais Composições do Vidro Borossilicato (% em massa)¹⁴

Óxidos	Composição 1	Composição 2	Composição 3	Composição 4
SiO ₂	81%	74%	70%	79%
B ₂ O ₃	13%	10%	7%	13%
Al ₂ O ₃	2%	5%	6%	2,5%
Na ₂ O	4%	6%	6%	5,5%
BaO	--	1%	3%	--
CaO	--	2%	--	--
	(1)	(2)	(3)	(4)

A composição 1 é a mais empregada para os vidros borossilicatos utilizados em vidrarias de laboratório, enquanto as composições 2 e 3 são as mais utilizadas na fabricação de ampolas para injetáveis. Já a composição 4 é a mais utilizada para utensílios domésticos.

3.2.2. Vidro Alcalino

Também conhecido como vidro soda-cal, é um vidro de baixo custo de produção, pois seus componentes são abundantes, baratos e fáceis de se fundir, o que o torna acessível para diversas aplicações, sendo o vidro mais produzido no mundo (cerca de 95% de todo o vidro produzido no mundo é alcalino)¹⁴. Seu uso é destinado à produção de garrafas, vidro plano para obras civis e para a indústria automotiva, frascarias em geral, entre outros. O vidro alcalino pode ser utilizado também para aparelhagens de laboratório, contanto que as mesmas não sejam expostas a grandes variações de temperatura, como por exemplo provetas, pipetas e buretas. Além de ter em sua estrutura componentes abundantes e baratos,

diminuindo seu custo de produção, a maior facilidade de fusão e moldagem do vidro soda-cal também é uma das razões do seu baixo custo. A Tabela 3 resume as principais composições encontradas para o vidro alcalino.

Tabela 3 - Principais Composições do Vidro Alcalino ^{8, 14}.

Óxidos	Composição 1	Composição 2	Composição 3
SiO ₂	72%	72%	71%
Na ₂ O	16%	15%	17%
Al ₂ O ₃	2%	2%	1%
CaO	6%	11%	11%
MgO	4%	--	--
	(1)	(2)	(3)

A composição 1 é normalmente utilizada em vidros alcalinos para bulbo de lâmpada incandescente, enquanto a composição 2 é empregada em vidros para garrafas e frascos, e a composição 3 utilizada para vidros planos.

3.2.3. Vidro de Chumbo

Também conhecido como cristal, o vidro chumbo é caracterizado por apresentar um elevado teor de óxido de chumbo (PbO) em sua composição, geralmente entre 10 a 29%, podendo ultrapassar 50% em aplicações específicas^{8,14,5}. A presença do PbO confere ao material um índice de refração significativamente mais alto do que o dos vidros comuns, favorecendo a refração e a dispersão da luz. Como resultado, o vidro chumbo exibe maior brilho e transparência — características estéticas que justificam seu uso tradicional na fabricação de peças artísticas, como taças, lustres e esculturas de cristal.

Outro efeito importante da presença do chumbo é a redução da condutividade elétrica do vidro em comparação aos vidros alcalinos, uma vez que os íons Pb²⁺, embora grandes e polarizáveis, não se movimentam livremente na estrutura, dificultando a condução de corrente elétrica. Por isso, o vidro chumbo é utilizado em instrumentação científica e eletrônica, como tubos de raios catódicos, válvulas

termiônicas e invólucros ^{20,21}. Em concentrações superiores a 50% de PbO, esses vidros passam a atuar como escudos protetores contra radiações, como os raios gama e raios X, sendo empregados em ambientes hospitalares, laboratoriais e industriais.

Entretanto, seu uso tem sido progressivamente reduzido devido aos riscos ambientais e à toxicidade do chumbo, que pode contaminar o solo e a água e provocar efeitos adversos à saúde humana, especialmente neurotóxicos ^{22,23}. Como alternativa, vêm sendo desenvolvidos vidros livres de chumbo, formulados com óxidos como os de bismuto (Bi₂O₃) ou bário (BaO), que oferecem propriedades ópticas e densidade semelhantes, porém com impacto ambiental significativamente menor ^{24,25}. Na Tabela 4, é possível observar as principais composições encontradas para o vidro chumbo.

Tabela 4 - Principais Composições para o Vidro Chumbo ^{8,14}.

Óxidos	Composição 1	Composição 2
SiO ₂	60%	60%
PbO	29%	20%
K ₂ O	8%	14%
Na ₂ O	3%	6%

A primeira composição é mais utilizada para vidros de chumbo aplicados à tubos de Crookes (tubos de raios catódicos), enquanto a segunda composição é mais empregada para o uso em lentes ópticas.

3.2.4. Vidro de Sílica (ou Quartzo)

O vidro de sílica é o vidro que possui maior porcentagem de SiO₂ (acima de 96%), obtido pela fusão de areia e de quartzo entre 2000 - 2100°C que, ao se resfriar, passa pelo estado vítreo com formação espacial molecular desorganizada ⁸. Possui alta resistência ao choque térmico e baixo coeficiente de expansão, portanto são utilizados em vidrarias de laboratório que requerem resistência térmica de

trabalho altas e vidrarias que requerem propriedades ópticas, como reatores, cadinhos, fibra óptica, entre outros^{6,14}. A Tabela 5 demonstra a composição do vidro de quartzo.

Tabela 5 - Composição do Vidro de Quartzo⁸.

Óxidos	Composição
SiO ₂	96,5%
Al ₂ O ₃	0,5%
B ₂ O ₃	3%

3.3. Propriedades do Vidro

a) Viscosidade

A viscosidade é uma das propriedades mais relevantes do vidro, e influencia diretamente todas as etapas de sua fabricação, conformação e tratamento térmico. Ela determina as condições de fusão, temperaturas de trabalho, parâmetros de recozimento, comportamento durante a afinagem (remoção de bolhas), taxa de devitrificação e até mesmo a temperatura máxima de utilização do material²⁶.

O vidro, ao contrário dos cristais que se solidificam de maneira ordenada ao atingir a temperatura de solidificação, apresenta um comportamento diferente: sua viscosidade elevada impede o rearranjo atômico necessário para a formação de estruturas cristalinas. Essa resistência ao escoamento é justamente o que permite a existência do estado vítreo.

Durante o processo de fusão das matérias-primas para a formação do vidro, formam-se inúmeros gases, os quais tendem a permanecer e se dispersar na massa do material sob a forma de bolhas, devido à sua elevada viscosidade. A etapa de refino do vidro tem como objetivo eliminar essas bolhas, o que só é possível se a fluidez (inverso da viscosidade) do vidro for suficientemente alta para permitir a sua liberação¹⁴. Portanto, a definição da temperatura máxima de fusão do

vidro precisa levar em conta a fluidez necessária para garantir a homogeneização e a eliminação desses gases.

Na etapa de conformação, a viscosidade precisa atingir um valor ideal: baixa o suficiente para permitir a moldagem do vidro com esforço reduzido, mas elevada o bastante para preservar a forma adquirida. Ao final da etapa, a viscosidade deve aumentar gradualmente, garantindo a moldagem da forma final da peça até o resfriamento completo. Nos processos industriais automatizados e contínuos, como a fabricação de garrafas, lâminas ou fibras, o vidro precisa apresentar uma viscosidade constante, pois flutuações nessa propriedade podem gerar variações dimensionais e outros defeitos.

A composição química do vidro tem papel fundamental no controle da viscosidade. A sílica (SiO_2), principal formadora de rede, é responsável por elevar significativamente a viscosidade, o que contribui para a estabilidade do estado vítreo. Já os óxidos alcalinos, como Na_2O e K_2O , atuam como modificadores, reduzindo a viscosidade ao quebrar ligações na estrutura da rede do vidro⁵. Óxidos tipo CaO e MgO , têm efeitos variados: em altas temperaturas tendem a reduzir a viscosidade, mas em temperaturas mais baixas podem aumentá-la. O óxido de chumbo (PbO), por sua vez, contribui para a diminuição da viscosidade mesmo em faixas de temperatura mais baixas, sendo utilizado para produzir vidros mais maleáveis, apropriados para manuseios prolongados. Já a alumina (Al_2O_3), quando presente em pequenas quantidades, “endurece” o vidro, elevando sua viscosidade a tal ponto que seu uso é limitado na fabricação convencional. No entanto, em composições complexas com menos de 50% de sílica, a alumina pode contribuir para vidros extremamente fluidos, como os utilizados na produção de lã de rocha. A interação entre os diversos óxidos presentes na composição tem ainda o efeito de suavizar a variação da viscosidade com a temperatura, ampliando a faixa de trabalho do vidro e tornando-o mais resistente à devitrificação^{5, 8, 14}.

b) Resistência Química (ou Durabilidade)

É a propriedade dos vidros de resistirem mais ou menos a ação de agentes artificiais ou naturais, como por exemplo a umidade do ar, água, gases da

atmosfera, ácidos, etc. Até mesmo os vidros mais puros como o de dióxido de silício (SiO_2), não são completamente inertes. Todos os vidros sofrem, em maior ou menor grau, alterações superficiais quando entram em contato com muitas soluções^{5,8}.

A alta resistência química dos vidros está relacionada à natureza da própria sílica (SiO_2), que é um composto quimicamente muito estável. A sílica é praticamente insolúvel em água e soluções neutras, especialmente em temperatura ambiente. Mesmo os ácidos comuns têm pouco efeito sobre a sílica, com exceção do ácido fluorídrico (HF), que é capaz de romper ligações Si–O, promovendo a dissolução da estrutura vítrea. O ácido fosfórico (H_3PO_4), sob temperaturas elevadas, também pode reagir com a sílica, ainda que de maneira mais restrita¹⁴.

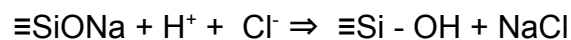
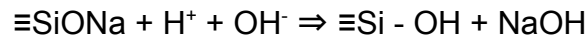
Entretanto, a resistência do vidro à ação de bases é consideravelmente menor. A solubilidade da sílica aumenta com o pH básico, uma vez que íons hidróxido (OH^-) podem atacar os oxigênios ligantes da rede tridimensional, rompendo a estrutura e facilitando a dissolução. Os vidros comerciais, por conterem outros óxidos além da sílica, são mais suscetíveis ao ataque químico do que a sílica pura. Nos vidros com óxidos modificadores, como os óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O), os íons metálicos se localizam em regiões mais abertas ou menos densamente conectadas da estrutura^{5,27}. Nesses locais, os cátions mantêm certa mobilidade iônica, tornando-se suscetíveis à extração por soluções aquosas ou ácidas. Essa mobilidade é responsável pela lixiviação superficial do vidro em contato com certos reagentes, o que compromete sua estabilidade a longo prazo.

Para aumentar a resistência química dos vidros, especialmente frente à água e agentes agressivos, são incorporados à sua composição óxidos como CaO , MgO , Al_2O_3 e B_2O_3 . Estes óxidos conferem maior rigidez à rede vítrea, formando ligações mais estáveis^{27,28}.

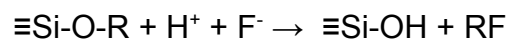
Quando o vidro entra em contato com a água, ocorre o ataque hidrolítico, um processo caracterizado pela substituição de cátions alcalinos (como Na^+ e K^+) presentes na rede vítrea, por íons hidrogênio (H^+) provenientes da solução. Inicialmente, há uma difusão iônica em que os íons H^+ penetram na estrutura superficial do vidro e substituem os íons alcalinos. Estes, por sua vez, são liberados para a solução, originando uma camada hidratada rica em grupos hidroxila (Si–OH). A reação fundamental envolve a hidrólise das ligações Si–O–R, onde R representa um cátion alcalino ou alcalino-terroso (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , etc.). Ao serem substituídos por H^+ ou H_3O^+ , os grupos resultantes, Si–OH, passam a compor um gel hidroxilado na

superfície, que atua como uma barreira difusiva. Com o tempo, esse gel se torna mais espesso, reduzindo a taxa de reação, o que caracteriza um processo autolimitante ¹⁴.

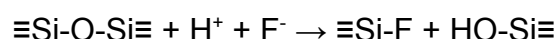
O ataque dos ácidos, com exceção do ácido fluorídrico, ocorre de modo semelhante ao ataque hidrolítico.



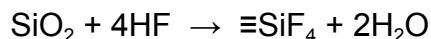
O ácido fluorídrico (HF) apresenta um mecanismo de ataque exclusivo e extremamente destrutivo. Os íons fluoreto (F^-), devido à sua semelhança em tamanho com os íons OH^- e à sua forte reatividade, são capazes de substituir os grupos hidroxila ligados ao silício, promovendo a quebra das pontes de oxigênio da rede silicatada. Esse ataque gera produtos voláteis como o tetrafluoreto de silício (SiF_4) ou forma fluorsilicatos alcalinos, removendo efetivamente o silício da rede vítrea. O ataque por HF é utilizado tecnicamente para gravação de vidros, mas em contextos indesejados pode resultar em completa desintegração da estrutura do material ^{5,14}.



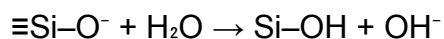
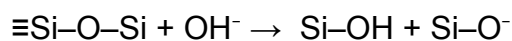
Analogamente, pode atuar sobre as pontes de oxigênio:



destruindo progressivamente o retículo de silício para formar o tetrafluoreto de silício volátil:



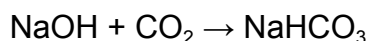
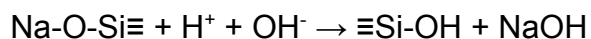
O ataque alcalino ao vidro representa um dos modos mais agressivos de degradação estrutural. Ao contrário do ataque hidrolítico, o ataque alcalino compromete as próprias ligações Si–O–Si da rede tridimensional do vidro. Os íons hidroxila (OH⁻), extremamente nucleofílicos, promovem a ruptura dessas ligações, levando à despolimerização da rede vítrea.



Esse processo é dependente do pH, da temperatura e do tempo de exposição. A velocidade do ataque alcalino cresce exponencialmente com o aumento do pH e da temperatura ²⁹.

Outro tipo importante de degradação do vidro é o intemperismo, causado pela ação da umidade e de gases atmosféricos, especialmente o dióxido de carbono (CO₂). Nesse processo, o CO₂ dissolvido na água atmosférica (chuva, névoa, condensação) forma ácido carbônico (H₂CO₃), que interage com a superfície do vidro promovendo a troca iônica entre Na⁺ e H⁺, aumentando o pH da solução local

14,30

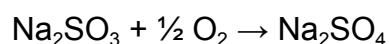
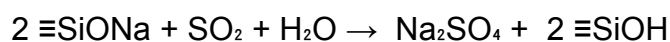


A evaporação da água intensifica o ataque ao concentrar a solução de hidróxido de sódio (NaOH) formada, o que pode causar foscagem ou manchas na superfície vítrea. O NaOH liberado pode ainda reagir com o CO₂ do ar, formando

cristais de bicarbonato de sódio (NaHCO₃) e sílica, que se depositam na superfície. Se o ataque for leve, esses depósitos podem ser removidos por lavagem com água ou solução diluída de HCl, sem deixar danos permanentes. E em casos mais severos, a degradação é irreversível, comprometendo a aparência e integridade da peça.

Vidros de borossilicato, por apresentarem menor teor de alcalinidade e maior teor de sílica, são mais resistentes ao intemperismo ¹⁴. Nessas formulações, o pH gerado pela umidade dificilmente ultrapassa 8 ou 9, valores insuficientes para quebrar a camada rica em Si–OH formada na superfície.

Para aumentar a durabilidade dos vidros expostos ao ambiente ou ao contato com reagentes, uma estratégia eficaz é a remoção dos alcalinos superficiais, processo conhecido como desalcalinização ³¹. Um método industrial consiste na exposição do vidro a vapores de dióxido de enxofre (SO₂) e vapor d'água em alta temperatura (geralmente durante o recozimento), promovendo a seguinte reação na superfície:



Esse tratamento forma uma camada fina de sulfato de sódio (Na₂SO₄), que não é agressiva e pode ser removida facilmente por lavagem com solução diluída de ácido clorídrico. Como resultado, obtém-se uma superfície mais resistente ao ataque químico e menos suscetível à lixiviação de alcalinos.

Técnicas similares podem utilizar compostos organoclorados ou organofluorados para obter efeitos equivalentes. Esse tipo de tratamento é frequentemente aplicado em vidros planos e vidrarias de laboratório, como forma de aumentar sua longevidade química e estabilidade em ambientes reativos ^{8,14}.

c) Resistência Mecânica

A resistência mecânica do vidro está ligada a sua estrutura e à presença ou ausência de defeitos em sua superfície. Embora seja um material rígido, sua

resistência à impactos é relativamente baixa quando comparada a metais ou cerâmicas cristalinas. Isso se deve ao fato de que pequenas microfissuras superficiais, muitas vezes invisíveis a olho nu, atuam como pontos de tensão, favorecendo a propagação de trincas sob esforço mecânico ⁵. Na ausência de tais defeitos, o vidro pode suportar tensões consideráveis.

Técnicas como a têmpera térmica ou química são empregadas para aumentar a resistência mecânica do vidro. Esses tratamentos introduzem tensões compressivas na superfície, dificultando a nucleação e propagação de trincas. Como resultado, o vidro temperado pode apresentar uma resistência à impactos até quatro vezes maior do que a do vidro comum, além de, quando quebrado, se fragmentar em pequenos pedaços menos cortantes, aumentando sua segurança em aplicações estruturais.

d) Resistência ao Choque Térmico

A expansão térmica do vidro ocorre em resposta ao aumento da temperatura. No entanto, diferente das substâncias homogêneas, o vidro apresenta uma expansão térmica não uniforme, variando conforme a faixa de temperatura e, principalmente, em função de sua composição química. Esse comportamento é quantificado por meio do coeficiente de expansão térmica linear (α), que representa a variação fracionária no comprimento de uma peça de vidro por grau de elevação térmica ¹⁴. Matematicamente, esse coeficiente pode ser expresso por:

$$\alpha = \Delta l / \Delta t \quad \text{ou} \quad l = l_0 (1 + \alpha t)$$

onde Δl é o aumento de comprimento sofrido pelo comprimento l_0 de uma peça de vidro, quando tem sua temperatura elevada a Δt graus.

O conhecimento do coeficiente de expansão linear é necessário para aplicações industriais e laboratoriais, especialmente em processos que envolvem a soldagem entre vidro e vidro ou vidro e metal. Isso se deve ao fato de que diferenças nos coeficientes de expansão podem gerar tensões internas e falhas

estruturais ^{14,32}.

A presença e a proporção dos diferentes óxidos no vidro também influenciam seu comportamento térmico. A sílica (SiO_2), por exemplo, pode reduzir o coeficiente de expansão, enquanto a soda (Na_2O) o eleva. Óxidos como o CaO e o MgO , possuem efeito intermediário. Já o óxido de boro (B_2O_3), em pequenas quantidades, age de forma similar à sílica, mas em concentrações superiores a 15% pode provocar o efeito inverso, elevando o coeficiente de expansão.

e) Coloração

A coloração dos vidros ocorre pela adição de substâncias capazes de interagir com a sua estrutura, sendo classificados em dois grupos principais. No grupo 1, estão as substâncias que produzem cor quando são dissolvidas no vidro sob forma de óxidos, ou combinadas sob forma de silicatos. No grupo 2, estão as que produzem cor por estarem dispersas na massa do vidro ^{5,14}.

O grupo 1 conta com elementos como o vanádio, manganês, cromo e ferro. O vanádio pode ocorrer sob diferentes estados de oxidação, destacando-se os óxidos V_2O_3 e V_2O_5 . O óxido trivalente V_2O_3 confere ao vidro uma tonalidade verde-amarelada, porém seu uso é limitado devido ao alto custo do vanádio. Já o pentóxido de vanádio V_2O_5 , um óxido ácido, forma vanadatos de cor amarela quando combinado com a sílica do vidro. No entanto, durante o processo de fusão, ele é reduzido termicamente a V_2O_3 , dando ao vidro uma coloração verde no produto final.

O cromo se apresenta na forma de dois óxidos também, o CrO_3 (trióxido de cromo - óxido ácido) e o Cr_2O_3 (óxido de cromo III - óxido básico e termicamente mais estável) ^{14,33}. Durante a fusão do vidro, mesmo que o composto adicionado seja CrO_3 , ele é convertido, sob a ação do calor e/ou de agentes redutores, ao óxido trivalente Cr_2O_3 , que proporciona ao vidro uma cor verde-esmeralda intensa e estável. Esse processo ocorre espontaneamente em fornos de alta temperatura, sem necessidade de adição de redutores. Quantidades tão pequenas quanto 1 parte de Cr_2O_3 em 1000 partes de vidro já são suficientes para gerar uma coloração verde marcante.

O manganês é um dos mais antigos agentes de coloração de vidros. Ele pode

atuar tanto como corante quanto como descolorante, dependendo de seu estado de oxidação. Os óxidos mais relevantes incluem o dióxido de manganês (MnO_2), óxido de manganês III (Mn_2O_3) e monóxido de manganês (MnO). Durante o aquecimento, o MnO_2 se decompõe, sendo o corante ativo predominante o íon Mn^{3+} , presente em Mn_2O_3 , responsável por tons que variam do violeta ao púrpura. No entanto, essa coloração é sensível ao calor e pode ser atenuada em etapas posteriores do processo (como o recozimento), conhecida como "queima de cor" ^{5,34}. Além disso, a tonalidade obtida com o manganês depende do tipo de base presente no vidro. Vidros com maior teor de potássio tendem ao violeta, enquanto a substituição por sódio leva a um tom vermelho-violeta. A proporção necessária para uma coloração visível é de 1 parte de manganês para cada 200 partes de vidro.

O ferro é o elemento que mais comumente influencia a coloração dos vidros devido à sua presença frequente nas matérias-primas. Ele pode existir na forma de FeO (óxido ferroso), e nesse caso confere coloração azul-esverdeada, ou então na forma de Fe_2O_3 (óxido férrico), dando uma coloração verde-amarelada para o vidro ^{14,34}. A tonalidade do vidro irá depender da relação entre Fe^{2+} e Fe^{3+} , conhecida como fator redox. Condições redutoras favorecem o Fe^{2+} e cores mais azuladas, enquanto ambientes oxidantes produzem mais Fe^{3+} , com tons amarelados. Esse equilíbrio afeta não apenas a aparência do vidro, mas também suas propriedades ópticas e térmicas. O óxido ferroso é altamente absorvente na faixa do infravermelho, influenciando a transmissão de calor por radiação.

Os elementos pertencentes ao grupo II, são responsáveis por gerar cores no vidro por meio da formação de fases separadas, como cristais microscópicos ou coloidais. Diferente dos corantes do grupo I, que se dissolvem na massa do vidro, os do grupo II não se integram quimicamente à estrutura do material: eles permanecem como partículas dispersas que interagem com a luz ¹⁴. Entre os elementos presentes nesse grupo, podemos citar o ouro, prata, cobre, selênio.

No caso de coloração com os elementos do grupo II, as peças não desenvolvem cor logo após a sua fabricação; a cor aparece durante o recozimento da peça. Estes vidros podem desenvolver coloração vermelha devido ao ouro e ao cobre, e cor amarela devido à prata. O selênio, quando é utilizado na presença do sulfeto de cádmio, produz a cor vermelha também, em outra tonalidade. Já os vidros opalinos e alabastro têm uma aparência peculiar devido à presença de pequenas inclusões dispersas na sua massa, causando a difusão da luz.

f) Propriedades Ópticas

Dentre as propriedades ópticas que os vidros apresentam, destacam-se a transparência, o índice de refração, a dispersão da luz e, em alguns casos, a absorção seletiva de radiações eletromagnéticas ^{5,8}. A transparência está relacionada à falta de microestrutura e ausência total ou parcial de absorção da luz para excitação eletrônica, impedindo a formação de planos de difração como os encontrados em materiais cristalinos, permitindo a passagem da luz visível com baixa dispersão. Vidros altamente puros, como o sílica fundida (SiO_2), podem apresentar transparência também no ultravioleta e no infravermelho próximo, o que os torna úteis em óptica de precisão e espectroscopia.

O índice de refração (n) determina o grau de curvatura (refração) da luz ao atravessar o vidro ^{5,14}. Ele varia de acordo com a composição química do vidro, sendo influenciado principalmente pela presença de óxidos metálicos. A introdução de óxidos como o óxido de chumbo (PbO), por exemplo, faz com que seu índice de refração aumente. Isso porque o índice de refração de um material depende da polarizabilidade eletrônica dos átomos que o compõem, ou seja, da facilidade com que os elétrons da estrutura podem ser deslocados em resposta a um campo elétrico oscilante, como o da luz. Quanto mais facilmente os elétrons se deslocam, maior a polarizabilidade, e maior o índice de refração. O chumbo, por ser um elemento pesado, com número atômico elevado ($Z = 82$) e uma nuvem eletrônica difusa, faz com que seus elétrons externos sejam altamente polarizáveis, contribuindo para aumentar a constante dielétrica do material e, conseqüentemente, seu índice de refração ^{14,35}. Além disso, estruturalmente, o chumbo também se comporta como um modificador de rede no vidro, como visto anteriormente. Ele se insere na matriz de sílica (Si-O-Si), rompendo as ligações e criando ligações mais fracas. Isso torna a estrutura mais "maleável" do ponto de vista eletrônico, facilitando ainda mais a polarização e reforçando a resposta óptica do material. Vidros com altos índices de refração são empregados, por exemplo, em lentes ópticas de alta precisão.

Já a dispersão cromática determina a capacidade do vidro de separar as cores ao refratar a luz branca, e influencia no desenvolvimento de sistemas ópticos

que minimizem imperfeições cromáticas, como em microscópios, telescópios e lentes corretivas ³⁵.

Além disso, é possível modificar as propriedades ópticas dos vidros por meio da adição de íons metálicos ou de tratamentos térmicos e químicos, resultando em vidros coloridos, fotossensíveis, fluorescentes, entre outros ^{34,35}.

3.4. Hialotecnia: Técnicas para o manuseio do vidro

A produção de vidrarias científicas exige um domínio preciso das propriedades do vidro e das técnicas envolvidas em sua conformação. A seguir, serão apresentadas as principais práticas empregadas na moldagem e soldagem do vidro no contexto da hialotecnia voltada para o uso em laboratórios, portanto o foco será em técnicas aplicadas ao vidro borossilicato, por ser o vidro mais utilizado em peças de laboratório, destacando os métodos mais comuns e os cuidados necessários para garantir a eficácia e funcionalidade das peças produzidas.

3.4.1. Sopro

A técnica de sopro é uma das mais tradicionais e versáteis formas de moldagem de vidro, podendo ser aplicada na produção de vidrarias de laboratório. Diferente do sopro convencional com o uso de cana metálica, no sopro livre aplicado à hialotecnia o profissional sopra diretamente em extremidades dos tubos de vidro previamente aquecidos, manipulando o material até alcançar a forma específica desejada ³⁶, como pode ser visto na Figura 11 abaixo.

O vidro utilizado nesse processo é frequentemente o borossilicato, pois apresenta alta resistência térmica e química, além de possuir um coeficiente de dilatação térmica reduzido, tornando-o ideal para aplicações laboratoriais.

Do ponto de vista estrutural, o vidro não possui uma organização cristalina regular; trata-se de um material não cristalino, cuja rede tridimensional de tetraedros de SiO_4 é conectada por átomos de oxigênio chamados de “bridging oxygens”. Durante o aquecimento, essa rede adquire fluidez gradual à medida que a temperatura se eleva, sem apresentar um ponto de fusão definido, como ocorre em

sólidos cristalinos. Essa transição térmica leva o material a um estado viscoso, permitindo a deformação da massa vítrea sem que ocorra ruptura das ligações primárias da rede. Assim que o ponto ideal de amolecimento do vidro é atingido, o hialotécnico aquece localmente o tubo ou bastão de vidro com o uso de um maçarico e então sopra diretamente em uma das extremidades da peça ^{5,8}. A introdução controlada de ar gera uma inflação interna do tubo, formando uma bolha que pode ser expandida, afinada, achatada ou alongada conforme a rotação e o manuseio do material. Esse sopro gera uma diferença de pressão interna, que, aliada à viscosidade do vidro aquecido e à gravidade, permite a moldagem da peça de maneira precisa. A espessura das paredes do vidro depende da quantidade de ar soprada e da homogeneidade do calor aplicado. O controle térmico é fundamental, já que regiões mais finas resfriam mais rapidamente e tornam-se mais viscosas, impedindo deformações indesejadas (ou favorecendo moldagens específicas, se bem manipuladas).

Durante esse processo, não ocorrem mudanças na composição química do vidro, mas sim transformações físicas na sua estrutura. O arranjo em sua estrutura se reorganiza conforme o resfriamento, estabelecendo novas conexões entre os tetraedros de SiO_4 sem formar cristais. Quando resfriado rapidamente, o vidro retém sua forma moldada e permanece metaestável, característica que o distingue de sólidos cristalinos. O resfriamento controlado da peça é necessário para evitar tensões internas ⁵.

Após a moldagem, o vidro é geralmente submetido a um processo de recozimento, no qual a peça é lentamente resfriada em um forno apropriado, para que as tensões internas geradas pelas diferenças de temperatura não se acumulem.

Essa técnica pode ser aplicada para a produção de balões de fundo redondo, tubos de ensaio, condensadores, colunas fracionadas e de cromatografia, funis de separação, entre outros. A técnica possibilita a junção entre diferentes peças, criação de diferentes formatos e correção de falhas durante a produção.

Figura 11 - Hialotécnico Ademir Sertori realizando a técnica de sopro para moldar o vidro ao maçarico.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.4.2. Soldas

A fusão térmica é uma técnica utilizada na hialotecnia para a soldagem de vidrarias de laboratório, baseada no aquecimento localizado das extremidades das peças de vidro até que atinjam um ponto de amolecimento suficiente para que suas superfícies possam ser unidas. A soldagem por fusão térmica pode ser empregada tanto para unir duas partes semelhantes, como tubos, quanto para adicionar peças específicas, como saídas laterais, bulbos ou ramificações nas peças de vidro. O processo exige um controle rigoroso da temperatura, do fluxo de gás e da rotação

das peças ⁶ (Figura 12).

Para realizar a solda, as extremidades das peças a serem unidas são previamente preparadas, limpas e aquecidas até que comecem a brilhar em tom alaranjado, indicando que atingiram o estado viscoso ideal. Nesse ponto, o hialotécnico aproxima as duas partes com precisão, utilizando movimentos rotacionais ou lineares, dependendo do tipo de solda, para garantir uma união homogênea. Ao retirar o calor, a área fundida se solidifica gradualmente, formando uma junção transparente e estável.

Existem diferentes configurações de soldagem por fusão térmica, cada uma com suas particularidades. A solda frontal, por exemplo, ocorre quando duas extremidades abertas de tubos ou peças cilíndricas são unidas axialmente. Esse tipo de soldagem requer um alinhamento cuidadoso, pois qualquer desalinhamento compromete a continuidade do diâmetro interno, o que pode prejudicar o funcionamento da peça. Já a solda lateral envolve a união de uma peça perpendicular ou inclinada ao corpo principal do vidro, como no caso da inserção de um tubo lateral em um balão ou condensador. Nesse caso, o corte na parede da peça precisa ser preciso, e o ajuste da temperatura deve considerar a diferença de espessura entre as partes, para evitar trincas por tensões térmicas.

Entre os cuidados para garantir uma solda de qualidade, destaca-se o uso de vidros com coeficientes de expansão térmica compatíveis. A incompatibilidade pode gerar tensões internas que levam à ruptura da peça, especialmente após o resfriamento. Além disso, é imprescindível realizar o recozimento da peça ao final do processo, para aliviar as tensões acumuladas durante a soldagem ³⁷.

Embora essa técnica exija habilidade manual e domínio da manipulação da chama, ela continua sendo uma das mais seguras na produção e reparo de vidrarias científicas. Sua aplicação permite que peças sejam moldadas, adaptadas ou restauradas com precisão, mantendo as propriedades físico-químicas do vidro e garantindo sua funcionalidade nos mais diversos experimentos nos laboratórios.

Figura 12 - Hialotécnico Ademir Sertori aplicando a técnica de solda para consertar uma torneira de um balão de fundo redondo.



Fonte: acervo pessoal da autora.

3.4.3. Recozimento

A utilização de um forno de recozimento é uma etapa necessária após qualquer trabalho em vidro, principalmente na produção de vidrarias de laboratório. Esses fornos são projetados para promover um resfriamento controlado e gradual, até que o vidro atinja o ponto onde as tensões internas começam a se relaxar, evitando que a peça produzida tenha mais chances de sofrer uma ruptura ⁶.

Um forno típico de recozimento apresenta uma câmara (ou passagem) com controle preciso de temperatura, que mantém a peça em uma temperatura uniforme adequada, por tempo calculado com base na composição do vidro, espessura e tipo de peça. Durante essa etapa, os átomos na estrutura do vidro reorientam-se, reduzindo tensões adquiridas na conformação, e evitam fissuras durante o resfriamento final. O vidro não recozido pode permanecer suscetível a fraturas espontâneas, ou romper com fortes choques térmicos ou mecânicos.

A passagem pelo forno segue um perfil de queda de temperatura controlada: geralmente, décimos de graus por hora para peças espessas, até dezenas de graus nas mais finas, garantindo uniformidade térmica interna e externa ^{6,8}.

O forno de recozimento pode utilizar aquecimento a gás ou elétrico; sistemas elétricos oferecem maior eficiência térmica e melhor controle de atmosfera interna, minimizando contaminações. Entre os cuidados operacionais, é importante se atentar a calibração periódica do sensor, ter um projeto adequado de ventilação para dissipação de vapor ou subprodutos, limpeza interna para remoção de resíduos de vidro, e proteção pessoal com luvas térmicas e óculos de segurança.

Um ciclo padrão para vidro borossilicato é aquecer até cerca de 560 °C, manter por tempo suficiente (tipicamente 15–60 minutos, variando conforme a espessura da peça) e depois resfriar gradualmente até a temperatura ambiente. Para o vidro alcalino e vidro chumbo, suas temperaturas de recozimento estão por volta de 400 - 450 °C e 350 - 400 °C, respectivamente. Já para o quartzo, sua resistência ao choque térmico é tão grande, que ele pode ser resfriado imediatamente ao término do trabalho ^{6,14}.

Em suma, o forno de recozimento é indispensável para garantir que as vidrarias finais possuam máxima resistência mecânica, estabilidade térmica e confiabilidade, qualificando os artefatos para uso em condições laboratoriais exigentes, onde a integridade do vidro é crítica.

3.4.4. Gravação e Perfuração

Um dos métodos mais utilizados para a gravação de inscrições em vidrarias laboratoriais, como indicações de volume e graduações, é a gravação química com ácido fluorídrico. O procedimento consiste, primeiramente, na aplicação de uma camada fina de cera de abelha derretida sobre a superfície do vidro previamente limpo. Em seguida, utiliza-se uma tinta aderente ao vidro (como a tinta nanquim) para traçar a inscrição desejada ⁶. Após a secagem da tinta, um estilete pontiagudo é utilizado para remover a cera nas regiões que devem ser atacadas pelo ácido. O vidro, então, é imerso por aproximadamente quinze minutos em uma solução de ácido fluorídrico. Após esse período, a peça é retirada, lavada abundantemente em

água corrente, e a gravação permanece visível na superfície do vidro.

O ácido fluorídrico apresenta alta reatividade, sendo capaz de corroer o vidro devido à sua capacidade de atacar a rede de sílica. Essa propriedade faz com que seu uso exija extremo cuidado. Para manuseá-lo com segurança, é obrigatório o uso de equipamentos de proteção individual como aventais, luvas, óculos e máscaras, além de realizar as operações preferencialmente em capelas com exaustão adequada^{6,38}. Os recipientes utilizados para conter o ácido devem ser de materiais resistentes, como polietileno, chumbo ou vidro protegido com cera ou parafina. Em caso de contato com a pele ou inalação dos vapores, é essencial proceder à lavagem imediata com água corrente e buscar atendimento médico.

Além da gravação, os hialotécnicos também são responsáveis pela calibração de vidrarias, procedimento que garante a precisão dos volumes medidos em equipamentos como provetas, pipetas, balões e buretas. A calibração é realizada com base em colunas de medidas aferidas, posicionadas de forma a facilitar a leitura do menisco. O ácido acético diluído pode ser utilizado para reduzir a aderência de gotas nas paredes do vidro, o que melhora a visibilidade e a confiabilidade da medição.

Outro procedimento relevante envolve a perfuração de vidrarias. Existem diferentes métodos de perfuração, sendo os mais comuns: uso do sopro, bastões de vidro, agulhas de tungstênio e brocas metálicas. A perfuração com bastão envolve o uso de um bastão previamente aquecido para aplicar calor ao ponto de fusão e, então, rompê-lo com leve pressão. Já a agulha de tungstênio, aquecida e aplicada com leve pressão rotacional, permite cortes mais finos, embora exija maior habilidade devido à tensão gerada no ponto de contato³⁸.

Por fim, a perfuração com brocas de metal, geralmente aplicada a vidros planos como os de janelas ou frascos de reagentes, é feita com furadeiras elétricas fixas e brocas de cobre ou latão. A operação deve ser realizada com o auxílio de abrasivos (como esmeril em pó) misturados com líquidos como água ou querosene. Um guia inicial é feito na superfície do vidro para orientar a perfuração, e o procedimento deve ser executado com pressão controlada e constante irrigação da área para evitar quebras abruptas.

3.4.5. Cortes

O corte em vidros pode ser realizado por diferentes métodos, de acordo com o tipo de vidro, espessura e finalidade da peça. A escolha correta da ferramenta e do procedimento garante cortes mais precisos, seguros e com menor risco de fraturas.

Entre os instrumentos mais utilizados no corte manual, destacam-se os riscadores com ponta de carbeto de tungstênio ou de diamante industrial, além das ferramentas com ponta de grafite temperado ^{6,8,38}. Esses instrumentos são empregados para marcar uma linha de tensão sobre a superfície do vidro, geralmente acompanhada de uma leve pressão, criando uma linha de fratura controlada. Após o risco, o vidro é levemente pressionado ou apoiado sobre uma superfície com elevação sob a linha marcada, permitindo que se rompa de forma limpa. Esse método é comum na preparação de tubos, lâminas e placas finas de vidro.

Para cortes mais espessos ou em peças que exigem maior precisão, utilizam-se equipamentos mecânicos como as serras de disco diamantado ou com pastilhas abrasivas. Esses dispositivos, geralmente fixos, operam com alta rotação e são refrigerados por água ou óleos específicos para reduzir o atrito e o aquecimento do vidro, evitando sua ruptura por choque térmico ⁶. As serras são especialmente indicadas para o corte de blocos de vidro, tubos de grande diâmetro e placas espessas, sendo frequentemente encontradas em oficinas de hialotecnia de maior porte ou em laboratórios que produzem equipamentos personalizados.

Independentemente da técnica utilizada, o corte de vidro exige que a peça esteja limpa e isenta de tensões residuais, sendo recomendável o recozimento prévio em alguns casos. Após o corte, é preciso realizar o lixamento das bordas com lixas abrasivas para evitar acidentes e melhorar o acabamento. Quando necessário, pode-se utilizar polimento a quente ou com pasta abrasiva para refinar as bordas (Figura 13).

Figura 13 - Uso de serra diamantada para corte em vidro



Fonte: acervo pessoal da autora

3.4.6. Lixamento e Polimento

Após o corte das peças de vidro, o lixamento e o polimento são etapas necessárias para seguir, garantindo a segurança, funcionalidade e qualidade estética às vidrarias. Esses processos têm como finalidade reduzir imperfeições e eliminar pontos de tensão que podem comprometer a resistência mecânica do vidro ao longo do uso.

O lixamento consiste na abrasão controlada da superfície do vidro, geralmente realizada com o uso de lixas específicas (como por exemplo carbeto de silício) ou pedras abrasivas ^{6,8}. Esse processo pode ser feito manualmente ou com o auxílio de equipamentos rotativos, como microretíficas. Em procedimentos manuais, utiliza-se a água como lubrificante e agente refrigerante, o que diminui o atrito, evita o superaquecimento da peça e prolonga a vida útil da lixa. O lixamento deve ser

feito com movimentos uniformes e pressão constante, para evitar qualquer desgaste. Na Figura 14 é possível observar essa técnica.

Já o polimento tem como objetivo suavizar ainda mais a superfície lixada, promovendo um acabamento mais fino, transparente e homogêneo. Existem diferentes métodos, dependendo do nível de polimento desejado. Para polimento básico, utilizam-se pastas abrasivas finas, compostas por óxidos metálicos, como o óxido de cério (CeO_2), aplicadas com feltros ou discos de pano. O movimento circular e contínuo sobre a superfície promove o desgaste controlado das microirregularidades, devolvendo o brilho ao vidro. Em casos que exigem maior precisão, o polimento pode ser feito em torno de vidro com rodas de polimento específicas, geralmente com auxílio de soluções abrasivas líquidas ³⁹.

Além do aspecto visual, o polimento desempenha um papel técnico importante, especialmente em superfícies de contato ou vedação. Imperfeições, mesmo que microscópicas, podem comprometer a vedação entre peças de laboratório ou favorecer o acúmulo de resíduos, impactando na exatidão de experimentos químicos. Por isso, em equipamentos de medição ou manipulação de substâncias, o acabamento polido é frequentemente obrigatório.

Figura 14 - Uso de lixa para acabamento



Fonte: acervo pessoal da autora

3.4.7. Tornos

O uso do torno é recorrente na fabricação e no acabamento de peças cilíndricas ou tubulares, como balões, tubos de ensaio, condensadores e outras vidrarias que requerem ajustes mais simétricos.

O equipamento funciona de forma semelhante a um torno mecânico tradicional, promovendo a rotação controlada da peça de vidro em torno de um eixo horizontal ⁴⁰. Durante o processo, o hialotécnico manipula chamas aplicadas pontualmente sobre o vidro em rotação. Isso permite o aquecimento uniforme da região trabalhada, necessário para evitar tensões internas e fraturas. Uma vez que o vidro atinge a temperatura adequada para ser maleável, o hialotécnico pode realizar diversas operações, como alongamento, estreitamento, fusão, inserção de ramificações, soldagem de partes ou formação de esmerilhados e bocais.

O torno também pode ser utilizado em etapas de acabamento ³⁶. Quando acoplado a ferramentas de corte, lixa ou polimento, ele permite retificar bordas e alisar superfícies. Isso é particularmente importante para juntas esmerilhadas ou conexões que exigem vedação hermética. Seu uso contribui para o aumento da produtividade e para a redução de perdas por quebra ou defeitos estruturais, e pode-se observar seu manuseio na Figura 15.

Para utilizá-lo, é preciso conseguir controlar a chama ao mesmo tempo que se tem domínio sobre os tempos de aquecimento e resfriamento, incluindo o recozimento do vidro na própria chama para evitar tensões pontuais.

Figura 15 - Uso do torno para conserto de erlenmeyer



Fonte: acervo pessoal da autora

3.4.8. Espelhamento

A técnica de espelhamento consiste na aplicação de uma fina camada metálica sobre a superfície interna ou externa de vidros, conferindo aos mesmos propriedades refletivas. Embora mais comum em dispositivos ópticos e decorativos, o espelhamento também possui aplicações relevantes na área laboratorial, principalmente em experimentos que envolvem manipulação de luz, calor e radiação⁶.

O processo mais utilizado para espelhamento de vidros em laboratório envolve a deposição química de prata metálica por meio de uma reação de redução. Em geral, utiliza-se uma solução contendo nitrato de prata (AgNO_3), amônia (NH_3), hidróxido de sódio (NaOH) e um agente redutor como a sacarose ou o formaldeído⁴¹. O vidro, previamente limpo e desengordurado, é mantido em contato com essa solução aquecida. A prata metálica, ao ser reduzida, deposita-se uniformemente sobre a superfície interna do recipiente, formando uma película reflexiva contínua.

O espelhamento pode ser aplicado em tubos, balões ou câmaras de reação que necessitam de controle térmico por reflexão da radiação infravermelha, ou em experimentos onde a luz deve ser redirecionada sem transmissão pelo vidro. Em alguns casos, o espelhamento também é utilizado para criar cavidades ópticas ou para proteger soluções sensíveis à luz visível, funcionando como uma barreira parcial⁶.

Além da prata, outros metais como alumínio e ouro podem ser utilizados no espelhamento por meio de técnicas mais avançadas, como a deposição a vácuo ou por pulverização catódica, comuns em laboratórios com infraestrutura mais especializada. No entanto, devido ao custo e à complexidade desses métodos, a deposição química continua sendo a opção mais acessível para pequenos laboratórios e aplicações técnicas específicas.

Após o espelhamento, o vidro deve ser adequadamente lavado e, quando necessário, protegido com uma camada de verniz transparente para evitar a oxidação da superfície metálica.

3.4.9. Vácuo

Os sistemas à vácuo são projetados para operar sob pressões reduzidas, minimizando a presença de gases residuais e umidade. A construção de peças de vidro para uso com vácuo exige materiais com boa resistência térmica e mecânica, sendo o borossilicato o mais utilizado devido à sua baixa dilatação térmica e estabilidade frente a gradientes de temperatura e pressão ^{6,42}.

As peças geralmente são feitas no torno, para que seja possível unir precisamente tubos, válvulas, ampolas, etc. As soldagens devem ser homogêneas e livres de imperfeições, já que qualquer microfissura ou bolha pode comprometer a estanqueidade e a eficiência do sistema.

O processo é efetuado com diferentes tipos de bombas, conforme a exigência do sistema: bombas rotatórias a óleo, bombas de difusão e bombas de jato d'água são frequentemente utilizadas. As bombas hidráulicas reduzem a pressão de 760 mmHg até cerca de 20 mmHg, enquanto bombas mecânicas a óleo atingem faixas entre 10^{-4} e 10^{-7} mmHg. Porém, antes é necessário realizar a limpeza rigorosa dos componentes por meio de lavagem com soluções ácidas e posterior secagem completa, a fim de eliminar impurezas que poderiam afetar os níveis de vácuo ^{36,42}.

A classificação dos diferentes regimes de vácuo contempla desde o vácuo grosseiro (até 1 mmHg), passando pelo vácuo fino (de 1 a 10^{-3} mmHg), alto vácuo (de 10^{-3} a 10^{-7} mmHg), até o vácuo superalto (abaixo de 10^{-7} mmHg). Para mensuração dessas pressões, são utilizados manômetros variados. Entre eles, o manômetro de tubo em "U", que opera com a diferença de nível de um líquido (geralmente mercúrio); os manômetros térmicos, baseados na condutividade térmica dos gases; e os manômetros de ionização, que utilizam eletrodos para gerar uma corrente elétrica proporcional à pressão do sistema ^{6,36}.

É necessária a lubrificação adequada das torneiras com graxas específicas, bem como a utilização de vidros com paredes apropriadas à magnitude do vácuo. Juntas e torneiras devem ser polidas com compostos abrasivos finos e numeradas para assegurar a correta montagem e vedação. Também é recomendado o aquecimento prévio dos sistemas com pistolas de ar quente, a fim de eliminar resíduos de umidade que possam comprometer o desempenho.

O teste de estanqueidade final é determinante para a funcionalidade do sistema. Pode ser realizado por meio da detecção de vazamentos com hélio ou observação indireta da pressão interna ^{42,43}. Pequenas falhas podem ser corrigidas com

resselagens localizadas, enquanto defeitos estruturais exigem a substituição da peça.

3.4.10. Tipos de Chama

É importante saber utilizar o maçarico que possua características compatíveis com o tipo de chama a ser usada, a fim de realizar o trabalho com economia de tempo e custos. Existem vários tipos de maçaricos, e geralmente cada um exige uma mistura de gases com valores caloríficos para o seu funcionamento. Podemos classificá-los em: maçarico manual, maçarico fixo ou de bancada, maçarico de um bico, dois, três, etc; maçarico de bicos sequenciais para confecção de espirais e aquecimento de grandes extensões de tubos de vidro ⁶.

A seguir, será discutido o tipo de chama necessária para trabalhar com os vidros mais utilizados em vidrarias de laboratório.

a) Chama para trabalhar com Vidro Borossilicato

O borossilicato exige uma chama com mistura de oxigênio, gás butano e ar comprimido. Para entender melhor a mistura dos gases e a ação da chama sobre o vidro, é possível observar a coloração da chama: coloração azulada indica uma chama de alto teor de oxigênio e gás butano, enquanto uma chama que apresenta coloração azul menos intensa do que a primeira, tendo um filete amarelo no centro, mostra a presença de uma grande porcentagem de gás butano ^{6,44}. Esse tipo de chama deve ser utilizada no início do trabalho, para evitar choques térmicos no vidro, e também após a fase de amolecimento do material, facilitando a homogeneização e a permanência da temperatura do vidro.

A chama de coloração mais azulada possui um alto poder calorífico, e proporciona um aquecimento e derretimento rápido do vidro, dificultando a modelagem do mesmo, além de provocar tensões e até podendo causar desvitrificação.

A temperatura de trabalho do borossilicato é por volta de 1000 - 1200 °C ^{6,8}.

b) Chama para trabalhar com Vidro Alcalino

Por apresentar uma maior tendência à devitrificação e uma temperatura de amolecimento mais baixa do que vidros borossilicato ou de quartzo, o vidro alcalino deve ser aquecido de forma gradual e com uma chama menos agressiva, evitando choques térmicos e tensões internas. A chama mais adequada para o trabalho com esse tipo de vidro é uma chama ligeiramente redutora. Em termos técnicos, trata-se de uma chama em que o fornecimento de oxigênio é moderado em relação ao combustível (geralmente GLP, propano ou gás natural), o que evita uma oxidação excessiva da superfície do vidro durante o aquecimento ^{6,8,36}. Isso se reflete visualmente em uma chama com núcleo azulado e envoltório amarelado, que fornece calor suficiente para o amolecimento do vidro sem promover superaquecimento localizado. Chamas excessivamente oxidadas tendem a deixar o vidro opaco, promover bolhas ou provocar a formação de cristais visíveis na superfície, o que compromete tanto a estética quanto a resistência mecânica da peça. Por outro lado, uma chama muito redutora, com excesso de combustível, pode causar fuligem e impurezas, dificultando a aderência entre partes soldadas. A temperatura ideal de trabalho do vidro alcalino gira em torno de 700 a 800 °C.

c) Chama para trabalhar com Vidro de Chumbo

Por apresentar uma alta proporção de óxido de chumbo em sua composição, a temperatura de fusão desse vidro é reduzida e ele se torna mais maleável, deixando-o mais suscetível à deformação e à desvitrificação durante o trabalho. Portanto, a atenção deve ser redobrada com o tipo de chama a ser utilizada ^{6,45}.

A chama ideal para o seu manuseio é a chama levemente redutora, ou seja, uma chama com leve excesso de GLP em relação ao oxigênio, evitando uma possível oxidação do chumbo na superfície do vidro, o que poderia resultar na formação de manchas escuras, perda de brilho e falhas de aderência em processos

posteriores. A chama deve ter aspecto amarelo-alaranjado na parte exterior, com um núcleo menos definido que na chama oxidante. O vidro de chumbo amolece a temperaturas relativamente baixas, entre 600 e 700 °C.

d) Chama para trabalhar com Quartzo

Para esse tipo de vidro é necessário utilizar uma chama altamente oxidante e de alta temperatura, pois o mesmo apresenta uma das maiores temperaturas de amolecimento entre os vidros, por volta de 1700 °C. Esse tipo de chama possui um núcleo extremamente quente, com aparência azul clara ou incolor, ideal para fundir a sílica pura sem deixar resíduos ou causar contaminações por fuligem, que poderiam comprometer a transparência óptica do material ^{6, 36}.

Ao contrário de outros vidros, o quartzo não sofre transição vítrea perceptível: ele passa gradualmente do estado sólido para o viscoso, sem apresentar um ponto de fusão definido. Isso exige precisão na observação do brilho e da deformação do material durante o aquecimento, além de um controle rigoroso do tempo de exposição à chama.

4. ESTUDO DE CASO

A fim de aproximar os aspectos teóricos da prática, esta última seção apresenta um estudo de caso baseado em observações realizadas durante a confecção de peças de vidraria para laboratórios na Oficina de Hialotecnia UFSCar. Trata-se de um espaço técnico especializado, equipado com bancadas resistentes ao calor, maçaricos de diferentes potências, torno para vidro, fornos de recozimento, máquinas para polimento, serras e lixas específicas para o corte e acabamento de vidrarias, além de variadas ferramentas utilizadas na modelagem e soldagem.

Importante ressaltar o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) nas atividades de hialotecnia, tendo em vista os riscos associados ao manuseio de vidro em altas temperaturas, como cortes e queimaduras. Dentre os EPIs obrigatórios

estão aventais resistentes ao calor, luvas apropriadas, e, especialmente, os óculos de didímio. Esses óculos possuem lentes tratadas com elementos da família dos lantanídeos, como neodímio e praseodímio, que filtram seletivamente o brilho intenso amarelo-sódio emitido pela chama, proporcionando maior conforto visual e protegendo os olhos da fadiga e de possíveis danos provocados pela exposição contínua. Além disso, os óculos de didímio permitem ao hialotécnico visualizar com maior nitidez o ponto de fusão do vidro, o que contribui para a precisão técnica e a segurança do processo.

Na oficina, os tipos de vidro mais comumente utilizados são o borossilicato, o vidro de quartzo e o vidro chumbo, selecionados conforme as propriedades físico-químicas exigidas em cada aplicação.

As atividades foram conduzidas pelo hialotécnico responsável, Ademir Sertori, cujo trabalho foi acompanhado de forma direta em diferentes momentos do processo. Ao longo dessas observações, foi possível identificar tanto semelhanças quanto diferenças em relação ao que é descrito na literatura especializada, considerando desde a escolha das técnicas até as condições de trabalho e o comportamento do material em cada etapa. A seguir, serão descritas algumas das peças produzidas, com ênfase nos procedimentos utilizados e nas particularidades que emergiram durante a prática.

4.1. Confecção de Reator

A estrutura principal do reator consiste em um tubo cilíndrico de vidro borossilicato. O projeto da peça prevê a construção de um reator de bancada, voltado para o uso em experimentações na área da Eletroquímica. O planejamento inclui a adição de 5 conexões ao reator, uma junta central lisa de dimensão 19/20 e quatro juntas laterais do tipo lisa também, todas com dimensão 14/20, destinadas à inserção de eletrodos e outras peças necessárias de acordo com o experimento realizado posteriormente; além de também incluir a definição precisa das dimensões das juntas e sua distribuição ao longo do reator, considerando simetria, funcionalidade e sua resistência estrutural.

As etapas de confecção da peça se iniciam com a preparação do corpo base

do reator. A partir de um tubo de vidro borossilicato, o hialotécnico realizou o aquecimento progressivo com maçarico em diferentes zonas do tubo, utilizando uma chama mais ampla e rica em gás liquefeito de petróleo (GLP), e com menor proporção de oxigênio. Essa configuração de chama branda é necessária para evitar choques térmicos, permitindo que a peça alcance uma temperatura homogênea antes de ser submetida a etapas mais intensas de aquecimento localizado. A temperatura de trabalho observada para o borossilicato foi de aproximadamente 1000 °C.

Em seguida, por meio de técnicas de rotação e sopro, o tubo foi deformado e expandido até adquirir a forma arredondada observada no corpo principal do reator, como ilustrado na Figura 16 - a) abaixo. Com o corpo do reator devidamente formado, iniciou-se o processo de aplicação das juntas previamente preparadas (processo descrito logo abaixo).

A técnica utilizada para a fixação das juntas foi a solda por fusão, empregando a técnica de solda lateral para as conexões secundárias, demonstrada na Figura 16 - b). Primeiramente, a junta maior e central foi inserida à base do reator, cuja fixação envolveu o aquecimento localizado da região do tubo com uma chama mais concentrada, até atingir a viscosidade adequada para a fusão da junta previamente preparada. Na sequência, as juntas laterais foram adicionadas, marcando previamente os pontos de encaixe conforme o projeto. Com a peça aquecida, a chama foi ajustada para uma configuração mais fechada e centrada, concentrando calor na região onde seria feito o furo para encaixe da junta. O furo foi realizado diretamente na chama, utilizando uma pinça para remoção do vidro fundido e, em seguida, uma ferramenta de grafite para modelar a abertura até atingir o diâmetro ideal para acomodar a junta 14/20. A junta previamente preparada foi então aproximada da abertura com a chama ainda aberta para se aderir superficialmente ao corpo da peça. Essa adesão inicial possibilita ao hialotécnico posicionar a junta corretamente antes da solda definitiva. Uma vez ajustada, a chama foi centralizada novamente sobre a região de contato entre a junta e o tubo, iniciando o processo de solda. O objetivo nessa etapa é fundir completamente o vidro de ambas as peças, evitando o acúmulo de massa. Durante a solda, o hialotécnico controlou cuidadosamente a temperatura de todo o entorno da peça, aplicando uma chama de recozimento nas regiões adjacentes para manter o corpo do reator aquecido e minimizar a formação de tensões no material.

Em alguns pontos próximos à solda, o vidro apresentou uma opacidade temporária, indicando formação de tensão térmica, corrigida pela reaplicação da chama até que a transparência fosse restaurada. A ferramenta de grafite foi novamente utilizada, ainda com o vidro em temperatura de trabalho, para o ajuste fino da posição final da junta e a eliminação de irregularidades. Esse procedimento foi repetido para a fixação das outras juntas.

A etapa final consistiu na homogeneização térmica da peça como um todo, com o uso da chama branda ao longo de toda a superfície para um resfriamento mais lento e gradual que precedeu o recozimento completo. O recozimento é necessário para a liberação das tensões residuais e para assegurar a integridade estrutural do reator (Figura 16 - c). Ao todo, a confecção da peça demandou cerca de três dias, incluindo todas as fases de planejamento, moldagem, soldagem, ajuste e tratamento térmico.

Figura 16 - a) Preparação do corpo do reator



Figura 16 - b) Solda das juntas ao reator



Fonte: acervo pessoal da autora

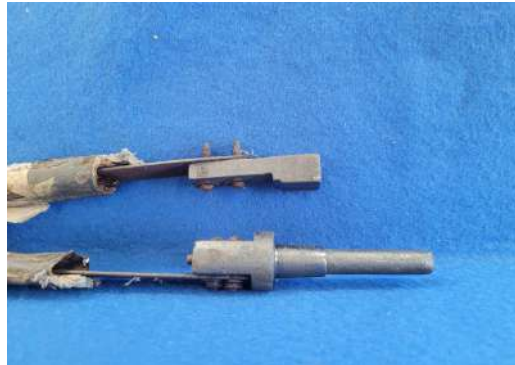
Figura 16 - c) Reator finalizado com todas as suas conexões e peças necessárias



Fonte: Acervo pessoal da autora

Para preparar uma junta de vidro, é necessário utilizar uma ferramenta de grafite com o molde exato correspondente ao formato desejado (Figura 17). No caso das juntas para esse reator, as juntas laterais têm medidas de 14/20 e a junta central medida de 19/20. Existem ferramentas de diversos tamanhos, que permitem fabricar juntas com proporções variadas, adequadas a diferentes necessidades. As juntas preparadas nesse caso são lisas.

Figura 17 - Ferramenta de grafite para molde de juntas



Fonte: acervo pessoal da autora

O processo inicia-se com o aquecimento do tubo de vidro de borossilicato no maçarico.

Para facilitar o trabalho, o tubo de vidro é apoiado em um suporte, que permite rotacioná-lo de maneira uniforme enquanto a junta é fabricada. Após o aquecimento, a ferramenta de grafite é aplicada ao vidro para moldá-lo. Além disso, pode-se utilizar uma espátula de grafite para auxiliar no acabamento, garantindo que a borda da junta fique reta e bem definida. Algumas das ferramentas utilizadas no processo podem ser observadas na Figura 18.

Figura 18 - Ferramentas utilizadas para moldagem e suporte dos vidros

a) espátula de grafite

b) agulha de tungstênio

c) suporte para rotacionar tubos de vidro



Fonte: acervo pessoal da autora

Na penúltima etapa, lixa-se a junta para que sejam removidas possíveis imperfeições e lascas nas bordas, criando uma superfície lisa e uniforme para receber depois a junta macho. O processo ocorre utilizando uma máquina para uso de abrasivo, na qual um cone de aço de ângulo de 3 graus é inserido. Nesse cone é colocado um abrasivo: carbetto de silício de granulometria de 320 micrômetros. É preciso molhar o abrasivo antes de adicioná-lo ao cone, e a junta que será lixada também. É recomendado molhar o vidro ao usar lixas e serras pois a água ajuda a reduzir o calor gerado durante o processo de lixamento e corte, evitando o risco de rachaduras ou quebras, além de diminuir a poeira, tornando o trabalho mais seguro.

Para finalizar, a peça de vidro é soldada ao centro do reator e, posteriormente, é levada ao forno para recozimento, na temperatura de 565 °C aproximadamente.

4.2. Confeção de um Eletrodo

O eletrodo atua como um condutor de corrente entre o circuito elétrico e o meio reacional. Sua função depende da natureza dos materiais utilizados em sua construção, tanto metálicos quanto isolantes, assim como da forma como esses materiais são montados e protegidos. Em alguns tipos de eletrodos laboratoriais, é necessário encapsular parte do contato metálico em vidro, deixando apenas a área ativa exposta — o que exige conhecimento específico em técnicas de hialotecnica.

No caso específico descrito, a confecção do eletrodo é realizada a partir de um tubo de vidro de chumbo com 5 mm de diâmetro. O vidro de chumbo é escolhido por apresentar menor temperatura de trabalho em comparação ao vidro borossilicato, além de maior maleabilidade e facilidade de fundir, o que é vantajoso para operações como a soldagem de metais à sua superfície. No entanto, esse tipo de vidro também requer maior cuidado no manuseio quando exposto à chama, devido à sua sensibilidade a tensões e propensão a trincas.

O processo de fabricação inicia-se com a marcação de uma das laterais do tubo, utilizando tinta vermelha específica para vidro. Essa tinta em pó, é diluída em água e aplicada com pincel (Figura 19 - a). Após a secagem, a peça é levada à chama do maçarico para que a tinta seja aquecida homoganeamente. A

temperatura ideal de queima varia entre 550 °C e 600 °C, e a mudança de coloração (escurecimento e posterior retorno ao tom original) indica a fixação térmica adequada do pigmento.

Na sequência, é preparada a conexão metálica interna do eletrodo. Um fio de cobre tem sua extremidade soldada a um pequeno segmento de fio de platina, o qual será posteriormente unido a uma plaqueta de platina com dimensões aproximadas de 10 × 10 mm. A escolha da platina como material condutor se deve à compatibilidade de seu coeficiente de expansão com o do vidro de chumbo, evitando assim causar alguma trinca durante o processo de aquecimento e resfriamento do material quando o mesmo for soldado a esse metal. A soldagem entre o fio e a placa de platina é realizada com equipamento de solda ponto (Figura 19 - b).

A extremidade oposta à marcada com tinta é então aquecida na chama do maçarico. Esse aquecimento cria uma redução do diâmetro interno do tubo, formando um estreitamento que permitirá a passagem justa do fio metálico. Após a inserção do fio de cobre com a platina no interior do tubo, a placa de platina é posicionada na lateral externa e soldada diretamente ao vidro ainda aquecido, como pode ser observado na Figura 19 - c). Esta etapa requer o uso de uma chama concentrada e oxidante, atingindo entre 800 °C e 850 °C, a fim de garantir uma adesão eficaz sem provocar acúmulo de tensões térmicas.

Uma vez concluída a soldagem, aplica-se uma capa isolante sobre o fio de cobre presente no interior do tubo. Depois, realiza-se a preparação do contato elétrico externo: o excedente do fio de cobre, do lado previamente marcado com tinta, é cortado, deixando apenas o suficiente para ser encaixado em um pino banana de 2 mm de diâmetro. Este pino é previamente preenchido com fio de estanho, que é fundido utilizando uma chama fina e oxidante a cerca de 200 °C. O fio de cobre é então inserido no estanho fundido, formando a conexão elétrica. Por fim, o pino banana é fixado à extremidade do tubo com adesivo epóxi (Figura 19 - d).

O eletrodo final possui aproximadamente 12 cm de comprimento. Embora o recozimento não seja obrigatório nesse caso, pelo vidro de chumbo possuir baixa temperatura de trabalho, o eletrodo pode ser submetido a um alívio de tensões em forno a cerca de 400 °C, caso se observe qualquer indicativo de fragilidade após o resfriamento. Todo o processo de fabricação, desde a preparação dos materiais até

a montagem final, pode ser concluído em aproximadamente uma hora. A Figura 19 - e) abaixo demonstra as etapas de um eletrodo até seu resultado final.

Figura 19 - a) Aplicação de tinta na lateral do tubo de vidro de chumbo

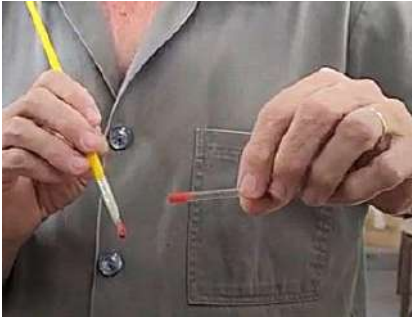


Figura 19 - b) Solda ponto



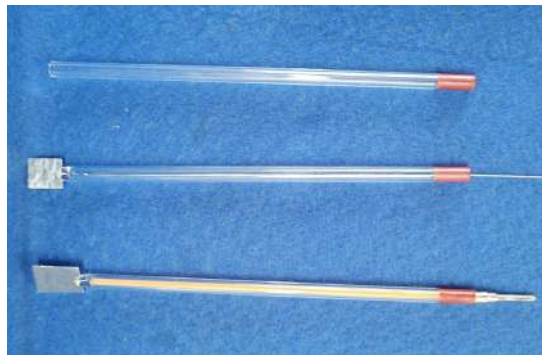
Figura 19 - c) Solda da placa de platina ao eletrodo



Figura 19 - d) Aplicação do adesivo epóxi na extremidade do eletrodo



Figura 19 - e) Etapas de um eletrodo durante sua confecção



Fonte: acervo pessoal da autora

4.3. Confeção de Condensador Liebig

O condensador tipo reto Liebig é utilizado principalmente em processos de destilação simples. Sua base consiste em dois tubos concêntricos de vidro borossilicato: um tubo interno, por onde passa o vapor, e um tubo externo, por onde circula água, geralmente em contracorrente, para que seja possível o resfriamento do vapor até sua conversão em líquido.

O projeto da peça envolve a junção entre os dois tubos de vidro e a instalação de conexões laterais (olivas) para a entrada e saída da água, além de juntas de vidro que permitem a inserção dos demais componentes do sistema de destilação. A confecção do condensador envolve técnicas como moldagem ao maçarico, soldagem, uso de ferramentas de grafite e processos de recozimento para alívio de tensões.

A fabricação do condensador se inicia a partir da preparação do tubo externo de vidro, com diâmetro de 30 mm. A extremidade superior deste tubo é fechada por meio do derretimento e remodelagem do vidro com a chama do maçarico, enquanto a extremidade inferior permanece aberta para permitir as etapas subsequentes de montagem. No caso, esse condensador possui comprimento de 30 cm.

Em paralelo, são confeccionadas as olivas que serão posteriormente soldadas ao tubo externo. As olivas são produzidas com auxílio de um suporte de grafite em formato de carretel, no qual se insere um tubo de vidro de 10 mm de diâmetro. Durante a moldagem, o tubo é mantido em rotação enquanto é aquecido na chama. É possível observar essa etapa na Figura 20 - a).

Também são preparadas as juntas que serão soldadas ao tubo externo. Essas juntas, com dimensões padrão de 24/40 (ou, alternativamente, 14/20), são ajustadas utilizando-se uma lixa com abrasivo de carbetto de silício, para garantir o ângulo correto para a solda e o encaixe no sistema final.

Após o preparo das olivas, realiza-se a abertura de um orifício no tubo externo para a soldagem da oliva superior. Essa abertura é feita com uma ferramenta de grafite enquanto o tubo é aquecido na chama. A oliva é então posicionada e soldada (Figura 20 - b). Depois, para realizar o acabamento dessa etapa é utilizada uma chama mais aberta e com maior proporção de oxigênio em relação ao GLP, ou seja, uma chama mais oxidante, para permitir um melhor acabamento da peça com maior

eficiência, removendo possíveis imperfeições e zonas opacas com tensões residuais.

O tubo interno do condensador, com 12 mm de diâmetro e também 30 cm de comprimento, é preparado logo após. A extremidade que será soldada ao tubo externo é moldada com o auxílio de uma ferramenta de grafite sob aquecimento, permitindo o encaixe adequado. Na etapa de junção entre os tubos, o tubo interno é inserido dentro do tubo externo e soldado em sua extremidade superior, mantendo a extremidade inferior centralizada, a fim de evitar desalinhamentos que comprometam a vedação (Figura 20 - c). Após a solda, utiliza-se a técnica de sopro para formar uma bolha com o excesso de vidro fundido, que é então removido para evitar acúmulo de material (Figura 20 - d).

É necessário que uma das extremidades do tubo externo permaneça aberta durante todas as etapas de montagem, pois por ali serão feitas as soldas das olivas, das juntas e do tubo interno. Com a estrutura superior montada, a junta fêmea é soldada à extremidade superior do tubo externo, onde antes ele havia sido fechado. Em seguida, o condensador é submetido ao recozimento, sendo levado a uma temperatura de aproximadamente 565 °C. Após atingir essa temperatura, o forno é desligado e o resfriamento ocorre de forma controlada.

No dia seguinte, procedeu-se à finalização da parte inferior do condensador. A extremidade inferior do tubo externo é então fechada fazendo o uso do maçarico. A oliva inferior, responsável pela saída de água, é soldada utilizando o mesmo procedimento aplicado na oliva superior. Posteriormente, a junta macho é preparada e soldada à parte inferior do tubo, seguindo as mesmas etapas anteriores. Durante todas as etapas de soldagem, realiza-se a homogeneização do vidro fundido na região da junta para minimizar tensões e evitar falhas.

Figura 20 - a) Confeção da oliva soldada ao condensador



Figura 20 - b) Solda da oliva



Figura 20 - c) Junção do tubo interno com o tubo externo

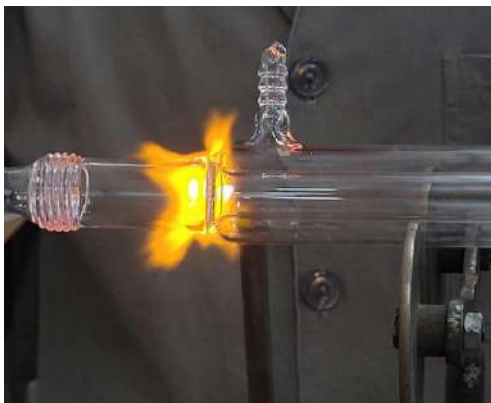
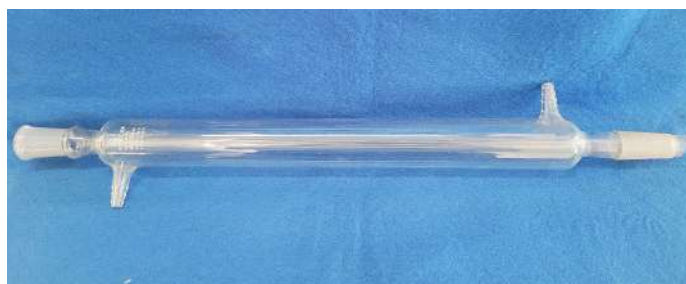


Figura 20 - d) Técnica de sopro aplicada ao condensador



Figura 20 - e) Condensador finalizado



Fonte: acervo pessoal da autora

4.4. Comparação com a literatura

Ao acompanhar de perto o trabalho do hialotécnico, foi possível observar que a prática na oficina dialoga com os conhecimentos descritos na literatura sobre a Hialotecnia. Aspectos como as temperaturas de trabalho e de recozimento do vidro, o uso de diferentes tipos de maçaricos e chamas (mais abertas ou mais fechadas, com proporções diferentes de GLP e gás oxigênio conforme cada etapa do processo), os tipos de vidro mais adequados para cada finalidade, os tempos de resfriamento, e os cuidados com a segurança e com o resultado final das peças, são seguidos com precisão e refletem os parâmetros discutidos em manuais, livros e artigos sobre o tema.

A vivência na oficina permitiu também observar todo o planejamento necessário para a confecção de cada peça. Enquanto na literatura muitas vezes os processos são descritos isoladamente, na prática o hialotécnico precisa antecipar toda a sequência da construção da peça, pois qualquer etapa esquecida ou feita fora de ordem e sem os acabamentos necessários, resultaria em um comprometimento da peça num todo no final da produção, causando trincas ou quebras por tensões térmicas ou residuais.

Outro ponto importante é que na prática o hialotécnico precisa reconhecer visualmente, por meio da cor da chama e da viscosidade do vidro trabalhado, o ponto exato em que o material está maleável e pode ser moldado, e de que forma pode ser moldado, a fim de evitar deformações indesejadas e possíveis trincas.

Embora a literatura proponha normas e protocolos bem definidos, o hialotécnico muitas vezes precisa adaptar ferramentas, criar soluções pontuais para problemas imprevistos ou modificar brevemente alguns procedimentos em função de variáveis como o tamanho da peça, o tipo de vidro ou as condições ambientais (umidade, ventilação, temperatura ambiente).

Por fim, algo que a literatura muitas vezes não consegue transmitir é o olhar treinado do hialotécnico, o quanto é necessário se manter atento e cauteloso em todos os momentos da confecção, a criatividade para adaptar projetos e ferramentas sem deixar de lado todo o conhecimento necessário para trabalhar com um material tão complexo quanto o vidro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de trabalho com vidro, reunidas no campo da hialotecnia, ocupam um papel central na prática em laboratórios. As técnicas envolvidas na moldagem, reparo e adaptação de peças de vidro permite não apenas a manutenção da infraestrutura de muitos laboratórios, mas também a criação de projetos específicos para as demandas experimentais que não podem ser atendidas por materiais ou equipamentos padronizados.

Cada etapa da fabricação ou reparo de uma vidraria exige compreensão das propriedades do material, domínio sobre as ferramentas e controle térmico preciso, além de atenção aos aspectos de segurança. Ao mesmo tempo, o trabalho do hialotécnico demanda diálogo constante com pesquisadores, docentes e estudantes, tornando-se parte integrante do processo de produção do conhecimento científico.

Dessa forma, ao abordar a hialotecnia neste trabalho, buscou-se não apenas documentar técnicas e procedimentos específicos, mas também reconhecer e valorizar o ofício do hialotécnico e sua contribuição para a ciência. Em um momento em que se intensifica a padronização de materiais laboratoriais e a substituição de dispositivos customizados por soluções industriais, compreender e preservar o conhecimento artesanal vinculado ao vidro é também uma forma de defender a autonomia e a criatividade no fazer científico.

REFERÊNCIAS

- (1) BERETTA, M.; *The Alchemy of Glass: Counterfeit, Imitation and Transmutation in Ancient Glassmaking*; Science History Publication:USA, 2009
- (2) SPARAVIGNA, Amelia Carolina, *Materials Science in Ancient Rome*; Archaeogate, July 23, 2011
- (3) WHITEHOUSE, David. *Glass: A Short History*. Smithsonian Books, 2012
- (4) SILVA, Wladimir T.; FILGUEIRAS, Carlos A. L. *O Vidro e sua Importância na Vida e na Química*; Química Nova, Belo Horizonte, MG, 2022.
- (5) AKERMAN, M. *Natureza , Estrutura e Propriedades Do Vidro*; Centro Técnico de Elaboração do vidro: São Paulo, 2000.
- (6) FONSECA, C. P.; MARTINS, S. E. *Hialotécnica: Arte e Vidro*, 1st ed.; Editora UFMG: Belo Horizonte-MG, 2011.
- (7) PIRENNE, H. *História Econômica e Social Da Idade Média*, 6th ed.; Editora Mestre Jou: São Paulo - SP, 1982.
- (8) SILVA, Wladimir T. *Modelagem de Laboratório - Referência em Hialotecnica: Mapeamento Histórico-Técnico-Demográfico das Melhores Práticas em Hialotecnica em Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil*; Belo Horizonte, MG, 2021.
- (9) ABCERAM | Associação Brasileira de Cerâmica | Vidro. Disponível em: <<https://abceram.org.br/vidro/>>. Acesso em: 5 jun. 2025.

(10) Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (Abravidro); O Mercado Vidreiro em Números - edição 2021, 10ª ed.; Panorama Abravidro: São Paulo, 2022. acessado em 5 jun. 2025.

(11) FREIRE, L. L. R.; *Caderno Setorial do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste*; 2016. acessado em 6 jun.2025

(12) ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. *Journal of Non-Crystalline Solids*, set. 2017.

(13) Understanding Glass and Its Properties: Essential Knowledge for Glass Blowing. Disponível em: <<https://jiyushe.com/glass-blowing/understanding-glass-and-its-properties-essential-knowledge-for-glass-blowing.html>>. Acesso em: 18 jun. 2025.

(14) BERG, Samuel. *O Vidro e sua Fabricação*. Rio de Janeiro, 2003.

(15) DOREMUS, R. H.; *Glass Science*. New York: John Wiley & Sons. 339 p.

(16) AMIN, A. E. *Fluid Jet Polishing of Glass Material*; Blekinge Institute of Technology - Karlskrona, Sweden, 2013.

(17) BUNDE, A.; FUNKE, K.; INGRAM, M. D. *Ionic Glasses: History and Challenges*. *Solid State Ionics* 1998, 105 (1–4), 1–13.

(18) CALLISTER, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 8. ed. 2012.

(19) Vidro de Borossilicato da SCHOTT. Disponível em: <<https://www.schott.com/pt-br/especializacao/materiais/vidro-de-borossilicato>>.

(20) BABISK, M. P. et al. *Desenvolvimento de vidros ao chumbo contendo resíduos de rochas ornamentais*. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 21;12 dez. 2023.

(21) MARKETING. *Vidro Plumbífero: o que é e onde usar?* Disponível em: <<https://archglassbrasil.com.br/artigos/tipos-de-vidro/vidro-plumbifero-o-que-e-e-onde-usar/>> . Acesso em: 18 jun. 2025

(22) TOMASELLA, R. C. et al. *Avaliação do potencial de compostos naturais (argila, turfa e carvão) na remoção de chumbo e toxicidade de um efluente industrial*. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 20, p. 251–258, 2015.

(23) Monitores CRT: vidro com chumbo é o maior problema - eCycle. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/monitores-crt-vidro-com-chumbo-e-o-maior-problema/>>. Acesso em:15 jun. 2025.

(24) VARSHNEYA, A. K.; MAURO, J. C. *Fundamentals of inorganic glasses*. Amsterdam, Netherlands ; Cambridge, Ma: Elsevier, 2019.

(25) HORST SCHOLZE; LAKIN, M. J. *Glass : nature, structure and properties*. New York ; Berlin: Springer-Vlg, 1991.

(26) MOREY, G.W.; *The Properties of Glass*. New York: Reinhold Publishing Corp., 1938.

(27) VIDRADO. Durabilidade química do vidro - VIDRADO®. Disponível em: <<https://vidrado.com/noticias/artigos/durabilidade-quimica-do-vidro/>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

(28) SANTOS, William J. *Caracterização de vidros planos transparentes comerciais*. SCIENTIA PLENA, 2008.

(29) JANETTI, P. F.; JAIME, S. B. M. *Resistência hidrolítica: ataque químico do vidro pela água e suas implicações no segmento farmacêutico*. Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, Campinas, v. 22, n. 2, p. 1–5, abr./jun. 2010.

(30) Mistério desvendado. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/a-santa-das-vidracas-mais-um-mito-do-vidro/>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

(31) SHELBY, James E. *Introduction to Glass Science and Technology*. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2005.

(32) LYONS, Arthur. *Materials for Architects and Builders*. London: Routledge, 2019.

(33) MONTANARELLA, Federico. *Three Millennia of Nanocrystals*. ACS Nano, 2022.

(34) CIONTI, Carolina. *Mimicking Stained Glass: A Hands-On Activity for the Preparation and Characterization of Silica Films Colored with Noble Metal Ions and Nanoparticles*. Journal Of Chemical Education, 2022.

(35) JAI SINGH. *Optical properties of materials and their applications*. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, 2020.

(36) LE PINNET, Paul. *Laboratory Scientific Glassblowing: Advanced Techniques and Glassblowing's Place in History*. Hackensack, NJ: World Scientific, 2022

(37) DUNHAM, Bandhu Scott. *Contemporary Lampworking: A Practical Guide to Shaping Glass in the Flame*, v. 1–2. Eugene, OR: GlassCraft, 2003.

(38) FRARY, Francis C. *Laboratory Manual of Glass-blowing*. New York: McGraw-Hill, 1914.

(39) RAYLEIGH, Lord. Grinding and Polishing of Glass Surfaces. In: *Scientific Papers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009

(40) HILARION GALLERY. *Glass Blowing on the Glass Lathe: A Manual of Basic Techniques*. Nevada City, CA: Bethlehem Apparatus Co., s.d

(41) BOLAS, Bernard D. *A Handbook of Laboratory Glass-Blowing*. London: Project Gutenberg, 2010.

(42) ALVES, Oswaldo Luiz. *Técnicas de Síntese em atmosfera inerte*. Química Nova, São Paulo, 1986

(43) SLATER, S. N. *Glassblowing for Laboratory Technicians, Including Vacuum Line Accessories and Their Applications*. Londres: Victoria University of Wellington, 1970 (2ª ed.)

(44) NORTHSTAR GLASSWORKS. *Colored Borosilicate Glass Art Flame Settings*. Northstar Glassworks, 2024.

(45) THIELEN, M. Glass-o-maniacs. Disponível em: <<https://signsofthetimes.com/glass-o-maniacs/>>. Acesso em: 19 jun. 2025.