

EMPREGO DE LENDA URBANA COMO ELEMENTO DE INTEGRAÇÃO MULTIDISCIPLINAR

José Carlos Lauria – jclauria@maua.br

Escola de Engenharia Mauá, Departamento de Engenharia Mecânica e Metalúrgica

Praça Mauá, 1

09580-900 São Caetano do Sul – SP

***Resumo.** Emprega-se a noção recorrente de que o vidro seria um fluido para discutir a modelagem de situações físicas segundo a integração de noções pertinentes à ciência dos materiais, processos de conformação, resistência dos materiais e mecânica dos fluidos. Confrontam-se argumentos pró e contra a classificação do vidro como fluido, para depois, como elemento de decisão conclusiva, avaliar o intervalo de tempo requerido para a sua deformação.*

***Palavras-chave:** Modelagem, Fluido, Materiais, Vidro.*

1. INTRODUÇÃO

Buscar soluções consiste em preencher a lacuna entre uma situação inicial e um objetivo final. Toda atividade profissional, de uma maneira ou de outra, significa resolver problemas.

Na forma em que a sociedade está organizada atualmente, quem não consegue tratar a contento de uma questão de seu interesse procura alguém com a capacitação necessária para tanto. Com a complexidade crescente do ambiente em que vivemos, mais e mais informações precisam ser integradas para a busca da solução ótima.

A preparação profissional, portanto, deve colocar o estudante em situações que o estimule a refletir sobre a importância de uma sólida base conceitual, aliada à investigação exploratória das peculiaridades inerentes a cada problema, bem como identificar e selecionar a parcela relevante dentre a miríade de informações disponíveis.

Discutir situações nos termos em que elas são encontráveis na vida prática (ou “estudos de caso”) tem-se revelado uma técnica altamente eficaz de preparação profissional. O vivenciamento de situações-problema, por si só, constitui relevante fator de estímulo aos estudantes pois eles se sentem valorizados ao serem tratados como engenheiros.

Relata-se neste trabalho o emprego de uma lenda urbana –a noção recorrente de que o vidro seria um líquido– como forma de integração multidisciplinar e incentivo à investigação detalhada dos fatos.

Em forma de parecer técnico, o texto apresenta conceituação de elementos que poderiam levar ao vidro ser suposto como líquido, registra argumentos a favor e contra a classificação segundo pesquisa bibliográfica convencional e na Internet e, finalmente, modela o vidro com

comportamento de fluido para verificar o tempo de relaxamento sob condições extremas de sollicitação mecânica.

Noções pertinentes à ciência dos materiais, processos de conformação, resistência dos materiais e mecânica dos fluidos são confrontadas para a discussão dos fatos, tendo como centro integrador a modelagem de situações físicas.

O tema é desenvolvido pelo autor como conclusão ao tópico sobre comportamento viscoso dos meios contínuos na disciplina de Mecânica dos Fluidos para a modalidade de produção mecânica da Escola de Engenharia Mauá.

2. FORMA DE APRESENTAÇÃO

No próximo item é exposto o texto completo do estudo de caso desenvolvido. O material é reprografado e distribuído individualmente aos alunos, com a apresentação por transparências de modo a permitir discussão ampla do assunto e a concentração dos alunos no tema.

Complementa-se o texto fornecido com figuras ilustrativas. Primeiro sobre a estrutura molecular de metais e do vidro, segundo Guy (ver referências), para traçar um paralelo entre o comportamento de ambas quanto à fusão. Depois sobre processo de fabricação artesanal de vidro conforme disponível nas enciclopédias *Ciência Ilustrada* volumes III e V e *Conhecer* volume XI, além de Plumb (1989) (ver bibliografia e referências).

3. O ESTUDO DE CASO

Reza uma crença bastante disseminada ser o vidro, em condições regulares de utilização, um líquido de elevadíssima viscosidade. Alguns o classificam como “líquido subresfriado”, outros como “líquido superresfriado”.

Verificar a validade da suposição.

3.1 Identificação

Pouco se conhece sobre as primitivas fases da arte da fabricação do vidro. Estudos arqueológicos ainda não conseguiram determinar com precisão o local e a data da descoberta. Sabe-se, porém, que fenícios e egípcios manufaturavam peças de barro vitrificado como objetos de decoração há pelo menos 45 séculos.

Sob a forma atualmente conhecida, a fabricação de vidro data de cerca de 1500 a. C., a partir de quando sua técnica de produção começou a ser aperfeiçoada no Egito.

Diversas formulações são encontradas hoje em dia para o vidro. Os mais comuns são obtidos pela fusão, e conseqüente solidificação, de sílica (principal componente da areia) em cerca de 70 por cento, mais óxidos de alumínio, cálcio, magnésio e sódio.

A presença de óxidos serve para rebaixar a condição de fusão e regular certas propriedades como cor, coeficiente de expansão térmica, índice de refração, constante dielétrica e estabilidade química.

Em condições ambientes, o vidro se apresenta como material transparente, rígido e quebradiço. Possui a isotropia típica dos líquidos e a tenacidade peculiar dos sólidos.

3.2 Resposta térmica

Solidificados, os materiais metálicos têm suas moléculas organizadas em rede cristalina. Quando aquecidos, as ligações entre as moléculas são rompidas em uma temperatura bem definida, dando início à fusão.

No vidro a estrutura molecular é desorganizada, sem forma determinada; à semelhança dos fluidos.

A característica mais evidente das substâncias sólidas amorfas é a ausência de nítido ponto de fusão. Ao serem aquecidas elas passam lentamente de uma condição de amolecimento a uma constituição pastosa, a qual se torna cada vez mais plástica até alcançar a constituição líquida.

3.3 Resposta mecânica

Quando um meio material sofre solicitação mecânica, tem início um processo de reajustamento molecular pelo qual as tensões são pouco a pouco aliviadas. Persistindo o esforço além de certo período, ou *tempo de relaxamento*, o corpo adquire nova configuração fixa.

Sob tal ponto de vista, todas as substâncias seriam classificáveis com fluido. Todavia, dependendo do meio material, o comportamento plástico só é evidenciado quando de solicitações intensas por períodos exagerados.

De amplo conhecimento é o fato de o tempo de relaxamento diminuir com a temperatura, situação bastante evidente em vidros.

3.4 Origem e disseminação da crença

Aquecido, o vidro apresenta elevada fluidez: condição essencial para uma modelagem cômoda e da qual se valem os artesões para elaborar os mais variados objetos. A elevada facilidade em assim trabalhar o vidro é bastante sugestiva em compará-lo a fluido escoando.

Newmann (1996) especula que a origem da interpretação do vidro como líquido pode ter advindo da leitura incorreta de livro influente publicado em 1933 pelo físico alemão Gustav Tammann (1861-1938), um dos pioneiros a estudar o vidro como sistema termodinâmico.

Pesquisando referências ao livro de Tammann, sem conseguir localizar algum exemplar, Newmann acredita que na sua obra o físico alemão tenha classificado o vidro como “*líquido subresfriado congelado*” e alguns autores tenham omitido o “*congelado*” em suas citações a Tammann e posteriormente outros autores repetiram tais citações sem consulta ao original.

Plumb (1989; e Internet, s.d.), por sua vez, menciona registros sobre histórias de vidro suposto com comportamento líquido remontando a aulas de química em 1947.

De longa data a classificação também é encontrada em livros de física e citada em documentários de televisão.

Em 1994 e 1997 o jornal Folha de São Paulo em secção sobre ciência tratou em termos genéricos da questão de o vidro ser sólido ou líquido em resposta a pergunta de leitores.

Wysession (1995) em artigo sobre a constituição e comportamento do interior da Terra faz a comparação entre o intervalo de tempo para a deriva dos continentes e o suposto tempo de relaxamento de um milênio para o vidro em vitrais de catedrais.

3.5 Argumentos

A favor

Defensores do vidro como líquido buscam sustentação da sua tese na existência em catedrais centenárias de vitrais com espessura maior na parte inferior do que na superior, adotado como prova do escoamento do vidro sob o campo gravitacional.

Sem dúvida, a disseminação do argumento conta com a firme colaboração de guias turísticos em catedrais, sempre dispostos a impressionar a sua platéia.

Outros citam, sem especificar o local depositário, a recuperação de peças de vidro em escavações arqueológicas com “sinais evidentes de escoamento”.

Também já foi apontada a existência (sem discriminação do local) de certa esfera de vidro centenária com mudança de geometria apenas pela ação do campo gravitacional.

Contra

Plumb (1989; e Internet, s.d.), contudo, atribui a variação dimensional dos vitrais ao processo de fabricação de vidro à época, quando a obtenção de espessura uniforme era de elevada dificuldade. Cientes do fato, é provável que os artesões do passado colocavam de propósito a parte mais espessa para baixo para garantir a condição mais estável de fixação. Descrição ilustrada de processo de fabricação de vidro é feita por Plumb em artigo de 1989; outro processo de fabricação é delineado no volume XI da Enciclopédia Conhecer.

Gibbs (1996) apresenta duas outras evidências para refutar a tese. A disponibilidade de telescópios com excelentes qualidades ópticas mesmo após 150 anos de construção: a mínima deformação das lentes causaria a perda do foco.

Outro exemplo são pontas de flechas da idade da pedra feitas de obsidiana (vidro natural) conservando-se afiadas como navalha após dezenas de milhares de anos.

No site da Internet “Fibertec” (jun. 1999) há a citação de trabalho mostrando que um escoamento capaz de alterar cinco por cento a espessura de uma placa de vidro vertical com um metro de comprimento significaria uma redução na altura de cerca de 10 mm. Em decorrência, estando correta a crença, os vitrais antigos deveriam apresentar lacunas no seu interior pois não são verificadas folgas com o caixilho.

A partir de considerações sobre propriedades termodinâmicas do vidro para estimar o coeficiente de viscosidade e segundo comportamento viscoelástico, Zanotto (1998) avaliou em pelo menos 10^{32} anos o tempo de relaxação para o vidro na temperatura ambiente e sob a influência da gravidade. Posteriormente, Zanotto e Gupta (1999) revisaram o trabalho anterior e, por refinamento do modelo da viscosidade, chegaram a uma estimativa de 2×10^{23} anos. Tal valor, apesar de muitíssimo abaixo da avaliação original, ainda é superior à idade comumente aceita para o universo de 15×10^9 anos.

3.6 Análise quantitativa

Por meio da avaliação do tempo requerido para deformar uma amostra de vidro é possível analisar tecnicamente a validade da noção.

Em razão da experiência cotidiana com o vidro é de se prever a necessidade de elevado nível de tensão para causar pequenas variações de configuração. Assim, a meta será a avaliação do intervalo de tempo para aumentar em um por cento o comprimento de um corpo de prova submetido a uma tensão de tração próxima à ruptura.

Assim, em vez de procurar estimar o tempo de relaxamento do vidro pelo modelo viscoelástico como Zanotto e Gupta, analisam-se aqui os acontecimentos segundo a resposta mecânica do material para escoamento puramente viscoso em temperatura ambiente.

3.7 Modelagem

Suposto o vidro como líquido, o modelo geral a ser adotado é o de comportamento newtoniano, para o qual são requeridas as premissas:

- Meio contínuo;

- Solicitação segundo processo quase-estático;
- Deslizamento das partículas elementares em camadas paralelas uma às outras;
- Módulo do volume das partículas elementares permanece constante;
- Ação da gravidade é desprezada;
- Temperatura constante;
- Coeficiente de viscosidade constante.

Em tais condições o vidro seguirá a equação constitutiva da viscosidade: tensão de cisalhamento (τ) proporcional à velocidade de deformação angular ($\dot{\gamma}$), sendo μ o coeficiente de viscosidade

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

As informações experimentais, sob temperatura ambiente, para a resistência do vidro a solicitações mecânicas são comumente disponíveis na forma de resistência à tração, a qual provoca uma deformação linear (ϵ).

Supondo o vidro como líquido, de acordo com o modelo de Newton, uma solicitação à tração (σ) provocará uma variação proporcional na velocidade de deformação angular, tal que

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

O aproveitamento de informações experimentais da resistência à tração do vidro implica na correlação entre deformação volumétrica e deformação linear.

Seja um cubo de aresta a constituído de material isotrópico (Fig. 1). O seu volume inicial é $V_0 = a^3$. Solicitado de modo uniforme em todas as suas arestas, o volume passará a $V = (a + da)^3$. A deformação volumétrica será

$$\gamma = \frac{(a + da)^3 - a^3}{a^3} = \frac{a^3 + 3a^2 da + 3ada^2 + da^3 - a^3}{a^3}$$

Desprezando os diferenciais de ordem superior

$$\gamma = \frac{3a^2 da}{a^3} = 3 \frac{da}{a}$$

Com a definição de deformação linear, $\epsilon = \frac{da}{a}$, tem-se

$$\gamma = 3\epsilon \quad (3)$$

Derivando no tempo

$$\dot{\gamma} = 3 \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4)$$

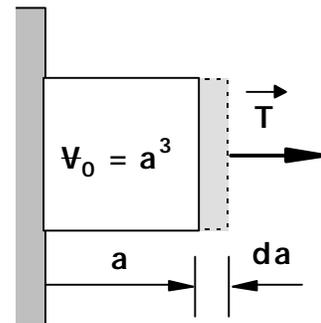


Figura A. Deformação volumétrica

Aplicando na Eq. 2

$$\sigma = 3\mu \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (5)$$

Na deformação volumétrica, por decorrência da variação tridimensional, é requerida uma sollicitação três vezes maior para produzir uma mesma deformação linear.

Separando as variáveis da Eq. 5

$$dt = \frac{3\mu}{\sigma} d\varepsilon$$

Imaginando agora um corpo de prova de vidro de comprimento inicial x_0 sob tensão constante (Fig. 2) e com a deformação linear, $d\varepsilon = \frac{dx}{x}$ obtém-se

$$dt = \frac{3\mu}{\sigma} \frac{dx}{x}$$

Integrando

$$\Delta t = \frac{3\mu}{\sigma} \ln \frac{x}{x_0} \quad (6)$$

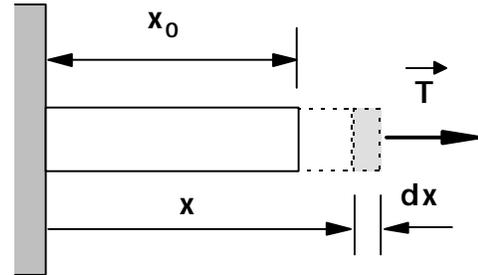


Figura 2. Sollicitação à tração

3.8 Informações experimentais

A partir de informações de Ruoff (1973, p. 514) é construído o gráfico da Fig. 3. Extrapolação indica ser de ***pelo menos*** $\mu = 1,0 \times 10^{20}$ Pa s o coeficiente de viscosidade do vidro de óxido de sódio na temperatura de 25 °C.

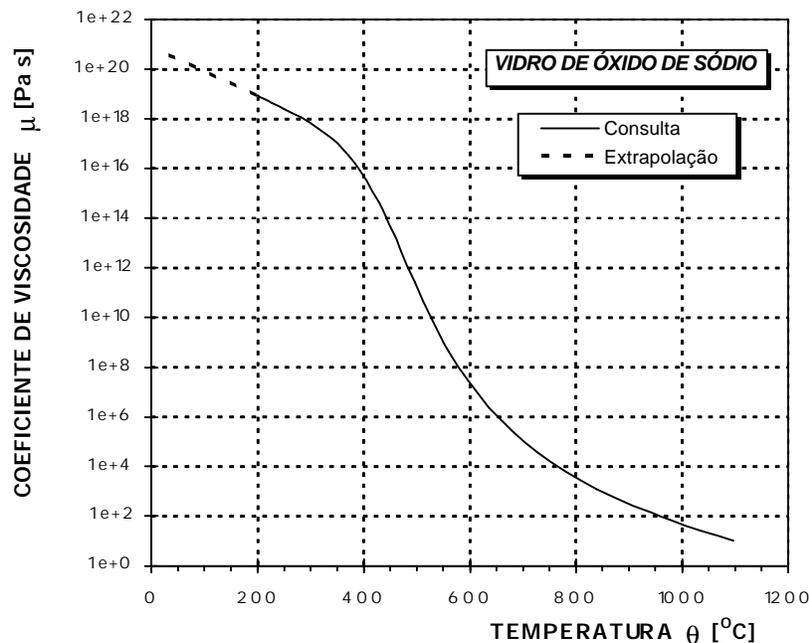


Figura 3. Coeficiente de viscosidade para vidro de óxido de ferro

Guy (1980, p. 173) diz ser também de $1,0 \times 10^{20}$ Pa s uma estimativa grosso modo para o coeficiente de viscosidade do vidro no ambiente e indica $\sigma_{\max} = 1,0 \times 10^8$ Pa para a tensão máxima suportável antes da ruptura do vidro.

Petrucci (1976, p. 399), por sua vez, cita uma resistência à ruptura por tração do vidro como $\sigma_{\text{rup}} = 2,5 \times 10^8$ Pa.

Zanotto (1998) e depois Zanotto e Gupta (1999) enfocam em detalhes a avaliação do coeficiente de viscosidade do vidro em condições ambientes. A partir de modelo elaborado e abrangente, eles (1999, p. 261) avaliam a viscosidade do vidro como $\mu = 1,9 \times 10^{41}$ Pa s.

3.9 Análise numérica

Aplicando na Eq. 6 os valores pesquisados para o mínimo coeficiente de viscosidade e uma tensão de solitação de 95 por cento da tensão de ruptura indicada por Petrucci, obtém-se uma estimativa de limite inferior do intervalo de tempo para uma deformação de um por cento

$$\Delta t = \frac{3 \times 1,0 \times 10^{20}}{0,95 \times 2,5 \times 10^8} \ln \frac{1,01}{1,0} = 1,26 \times 10^{10} \text{ s} \Rightarrow \Delta t = 400 \text{ anos}$$

Portanto, pelo menos quatro séculos para uma solitação próxima da ruptura provocar uma deformação de um por cento!

3.10 Discussão

Fosse adotada a viscosidade indicada por Zanotto e Gupta, o resultado do item anterior seria de 7×10^{23} anos, cerca de três vezes acima do valor estimado por eles conforme citado no item 3.5) *Contra*. A justificativa da diferença está na equação descritiva da deformação empregada para a avaliação dos acontecimentos. Eles (p. 260) se valem da equação de Maxwell para o tempo de relaxamento (τ) para o vidro segundo o modelo viscoelástico

$$\tau = \frac{\mu}{G} \tag{7}$$

onde G é o módulo de elasticidade transversal, cujo valor é adotado por Zanotto e Gupta como 30×10^9 Pa..

O modelo viscoelástico combina as características de deformação de sólidos e fluidos, enquanto a Eq. 5 se refere a escoamento puramente viscoso.

De acordo com a ordem de grandeza do coeficiente de viscosidade do vidro em condições ambientes, porém, os comportamentos viscoelástico e puramente viscoso acabam se confundindo. Seja qual for o modelo escolhido, a conclusão final não é alterada.

Por outro lado, apesar de bastante sugestiva pelo comportamento da curva, a extrapolação da Fig. 3 não proporciona elementos adequados de decisão, ficando em muito abaixo da realidade como se deduz por comparação com Zanotto e Gupta (1999, p. 261).

3.11 Conclusão

A modelagem matemática de sistemas físicos apresenta diversas nuances podendo englobar aspectos enganosos. O procedimento se torna mais crítico à medida que a análise se afasta de situações corriqueiras ou engloba informações não consolidadas; bem como quando se faz necessária a integração de diversos ramos do conhecimento.

Muito se tem falado a respeito do vidro como meio material com comportamento reológico de líquido. Argumentos de cunho qualitativo, tanto pró como contra a classificação, têm sido manifestados e elevada controvérsia envolve o tema.

Evidências consistentes indicam não ser possível a aceitação da classificação do vidro como um líquido.

Em distribuição molecular o vidro se assemelha a líquidos, não significando a obrigatoriedade de, quando solicitado mecanicamente, ele apresentar habilidade em escoar como fluido.

De forma quantitativa, estimativas feitas aqui e na bibliografia assinalam que o vidro não pode ser classificado como líquido segundo o senso comum a respeito desse estado físico.

Há a possibilidade de a crença no vidro como meio líquido ter se originado da interpretação incorreta de tratado sobre a termodinâmica do vidro escrito na década de 30 na Alemanha e ter sido disseminada com o auxílio de professores de química e de física, bem como de guias turísticos e repórteres.

REFERÊNCIAS

- Enciclopédia Conhecer. **Fabricação do vidro**. Vol. XI, pp. 2652-3. São Paulo: Editora Abril, 1969.
- “Fibertech” *Does glass flow?* www.cableau.net/fibertech/glass.html, jun. 1999.
- Folha de São Paulo, Seção “*Sem Mistério*”, edição de 27/3/1994, p. 6-15.
- _____, Seção “*Sem Mistério*”, edição de 16/2/1997, p. 5-13.
- Gibbs, Phillip *Is glass liquid or solid?* www.math.ucr.edu/home/baez/physics/glass.html, 1996.
- Guy, A. C. **Ciência dos materiais**. Trad. José Roberto G. da Silva. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.
- Neumann, Florin *Glass: liquid or solid – science vs. an urban legend*. www.ualberta.ca/~bderksen/florin.html, 1996.
- Petrucci, Eládio G. R. **Materiais de construção**. Porto Alegre: Globo, 1976.
- Plumb, Robert C. *Antique windowpanes and the flow of supercooled liquids*. **J. of Chemical Education**, v. 66, n. 12, Dec. 1989, pp. 994-6.
- _____. *Antique windowpanes and the flow of supercooled liquids*. www.ualbeta.ca/~bderksen/windowpane.html, (s.d.).
- Ruoff, Arthur L. **Materials science**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1973.
- Zanotto, Edgar Dutra *Do cathedral glasses flow?* **American J. of Physics**, v. 66, n. 5, May 1998, pp. 392-5.
- _____ & Gupta, Prabhat K. *Do cathedral glasses flow? – Additional remarks*. **American J. of Physics**, v. 67, n. 3, Mar 1999, pp. 260-2.
- Wysesession, Michael *The inner workings of the Earth*. *American Scientist*, v. 83, n. 2, Mar-apr 1995, p. 134.

BIBLIOGRAFIA

- Enciclopédia Ciência Ilustrada. **A preparação do vidro**. Vol. 3, pp. 1158-61. São Paulo: Editora Abril, 1970.

Enciclopédia Ciência Ilustrada. **O vidro na fábrica**. Vol. 5, pp. 1851-5. São Paulo: Editora Abril, 1970.

Enciclopédia Ciência Ilustrada. **A reologia**. Vol. 5, pp. 2002-5. São Paulo: Editora Abril, 1970.

Grande Enciclopédia Larousse Cultural. **Vidro**. Vol. 24, pp. 5940-1. São Paulo: Nova Cultural, 1998.

Jdánov, L. S. & Jdánov, G. L. **Física**. Moscovo: Mir, 1985.

Nova Enciclopédia Barsa. **Vidro**. Vol. 14, pp. 375-7. Rio de Janeiro: Enciclopaedia Britannica do Brasil, 1999.

Wu, C. *Analysis shatters cathedral glass myth*. www.sciencenews.org/sn_arc98/5_30_98/fob3.htm.

www.okanagan.bc.ca/phys/dbmu/980512b.html.

www.rabi.phys.virgini.edu/HTW//windows_and_glas.html.

www.urbanlegends.com/science/glass_flow.html.