



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería de Minas
MI3010-1 Fenómenos de Transporte en Metalurgia Extractiva

PROPIEDADES VISCOSAS DE FLUIDOS

Fenómeno de Transporte en Metalurgia Extractiva

Prof. Leandro Voisin

Prof. Auxiliar: Yerko Yávar del Pino

Viscosidad de gases

- Ecuación de viscosidad para gases **no polares a bajas presiones** desarrollada por Chapman & Enskog.

$$\mu = 2.67 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}}$$

- μ - viscosidad del gas, poises
- M - peso molecular del gas, g/mol
- T - temperatura, K
- σ - diámetro característico de la molécula, Å
- Ω_{μ} - integral de colisión de Chapman-Enskog

Viscosidad en mezcla de gases

- La teoría de Chapman-Enskog ha sido extendida para incluir mezcla de gases multicomponentes a baja densidad. Ecc. De Wilke

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \times \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

- n - número de especies químicas en la mezcla
- x_i, x_j - fracciones molares de las especies i y j
- μ_i, μ_j - viscosidades de las especies i y j a la T° y P° del sistema
- M_i, M_j - pesos moleculares de i y j
- Φ_{ij} - parámetro adimensional, para $i=j$, $\Phi_{ij}=1$

Viscosidad de Líquidos metálicos y aleaciones

- Para líquidos moleculares:

$$\mu = A \exp\left(\frac{\Delta G_{vis}^{\circ}}{RT}\right) \quad A \cong \frac{N_o h}{\hat{V}} \quad \Delta G^{\circ} \cong 0.41 \Delta E_{vap}$$

- No es valido para líquidos metálicos

Viscosidad de Líquidos metálicos y aleaciones

- Chapman: Relación para viscosidad reducida, μ^* , la cual es función de la temperatura, T^* , y volumen, V^* , reducidos.

$$\mu^*(V^*)^2 = f(T^*) \quad \mu^* = \frac{\mu\delta^2 N_o}{\sqrt{MRT}} \quad T^* = \frac{\kappa_B T}{\varepsilon} \quad V^* = \frac{1}{n\delta^3}$$

- δ = dist.interatomica en el paquete cristalino a 0 K, Å
- ε = parámetro energético característico específico del metal.
- N_o = Numero de Avogadro.
- R = Cte. De los gases
- T = temp. Absoluta, K.
- κ_B = Cte. De Boltzmann's
- n = numero de átomos por unidad de volumen.

Viscosidad de Líquidos metálicos y aleaciones

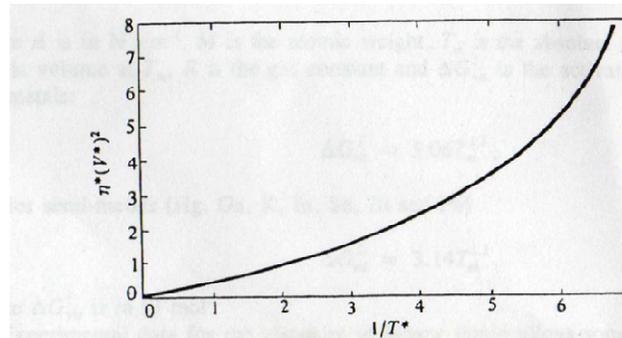


Fig. 1.10 Correlation curve for viscosities of liquid metals. (From Chapman, *ibid.*)

Table 1.4 Empirically determined values of ϵ/κ_B (from Chapman, *ibid.*)

Metals	δ , Å	ϵ/κ_B , K	Metals	δ , Å	ϵ/κ_B , K
Na	3.84	1970	Rb	5.04	1600
K	4.76	1760	Ag	2.88	6400
Li	3.14	2350	Cd	3.04	3300
Mg	3.20	4300	In	3.14	2500
Al	2.86	4250	Sn	3.16	2650
Ca	4.02	5250	Cs	5.40	1550
Fe	2.52	10 900	Au	2.88	6750
Co	2.32	9550	Hg	3.10	1250
Ni	2.50	9750	Pb	3.50	2800
Cu	2.56	6600	Pu	3.10	5550
Zn	2.74	4700			

- Se logró estimar una relación que permite estimar la viscosidad, para metales con altos puntos de fusión

$$\frac{\epsilon}{\kappa_B} = 5.20 T_m; K$$

Viscosidad de escorias fundidas, silicatos y sales

- Las escorias consisten en cationes e aniones resultantes de la ionización de los constituyentes acido-base en las soluciones de oxido fundidas.
- Consideramos un componente ácido, a un óxido el cual al ser disuelto en la escoria, adquiere iones de Oxigeno adicionales para formar un anión.
- Mientras un óxido básico contribuye un ion de Oxigeno para la fusión.
- Comp. ácido: SiO_2 , Al_2O_3
- Ox. Básico: CaO

Viscosidad de escorias fundidas, silicatos y sales

□ Fig 1.15

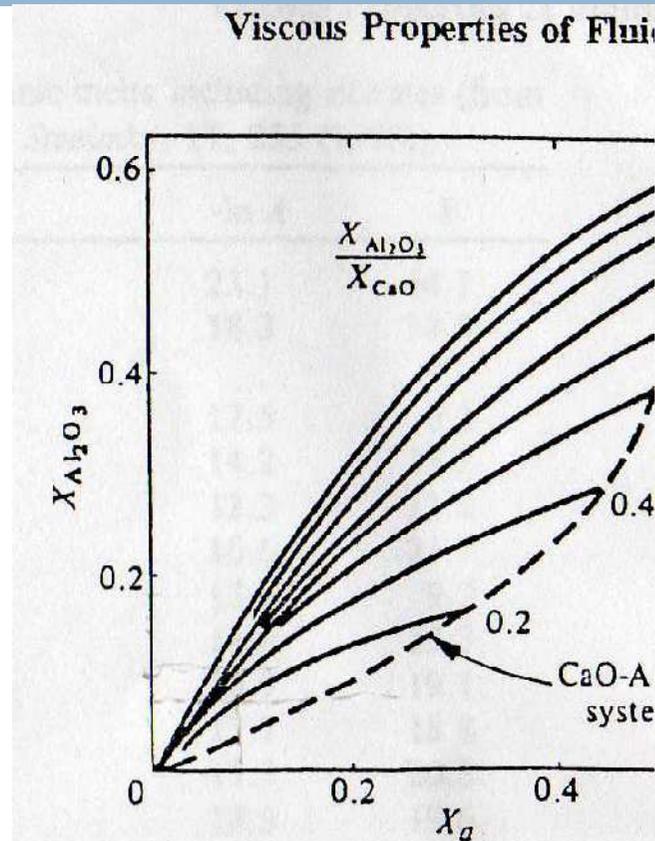
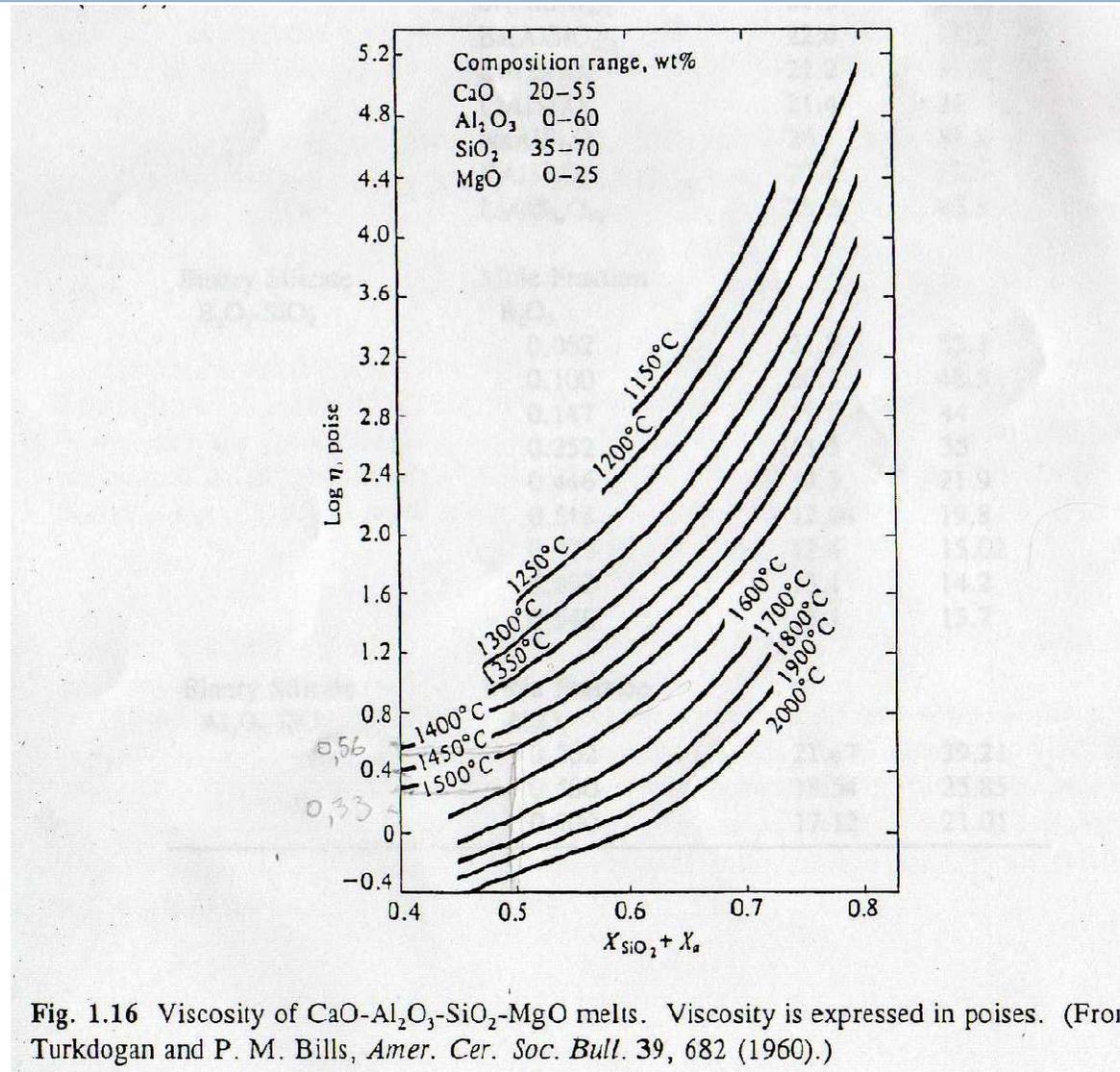


Fig. 1.15 Silica equivalence of alumina related to alumina molar concentration: lime molar ratios. (From *J. Iron and Steel Inst.* 201, 133 (1963))

Viscosidad de escorias fundidas, silicatos y sales

□ Fig.1.16

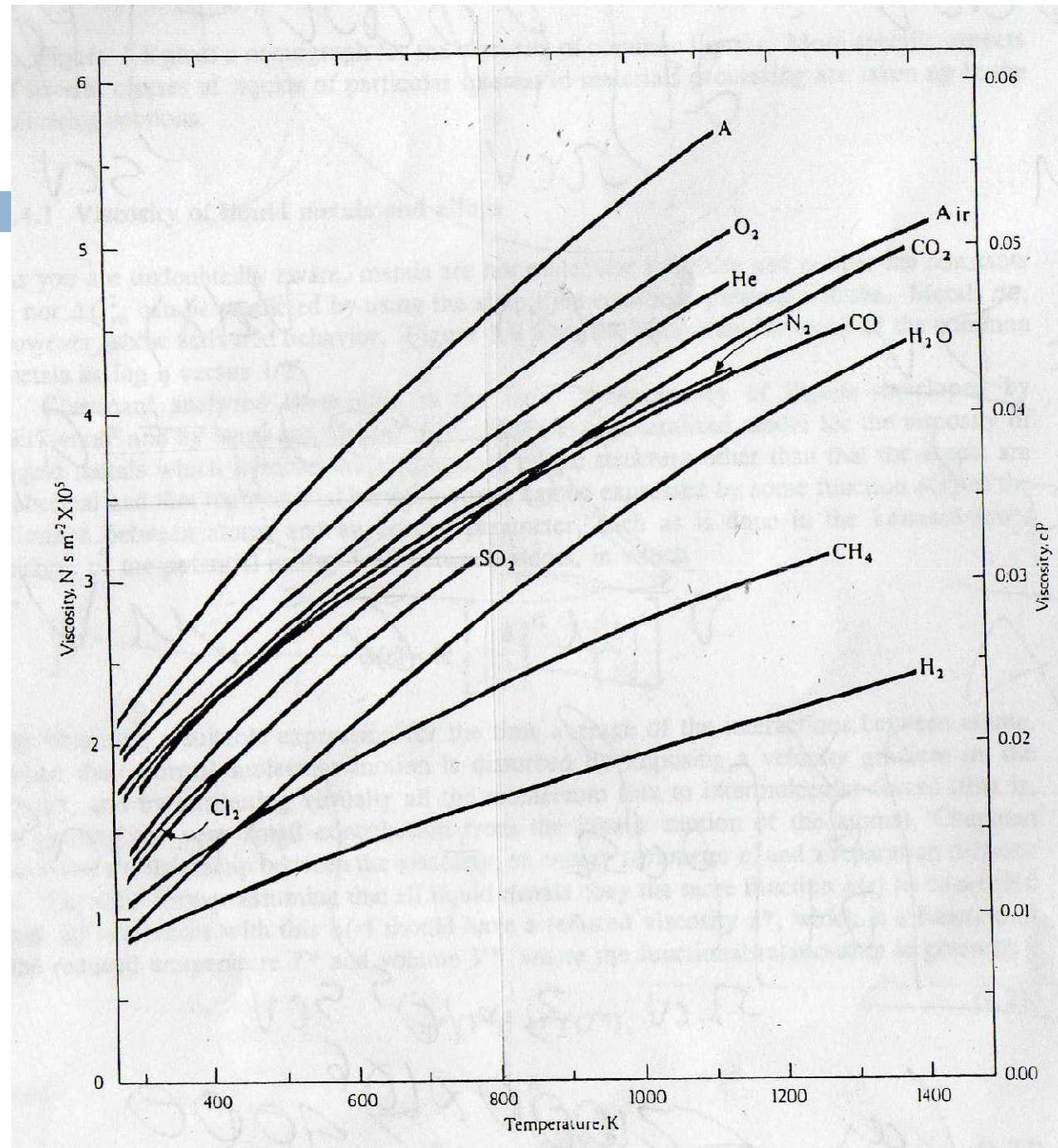


Problema 1

- Estimar la viscosidad de gas compuesto por 30% CO, 20% CO₂, 20%SO₂ y 30%N₂ , a 10^5 N/m² (aprox. 1 atm). A 750 K

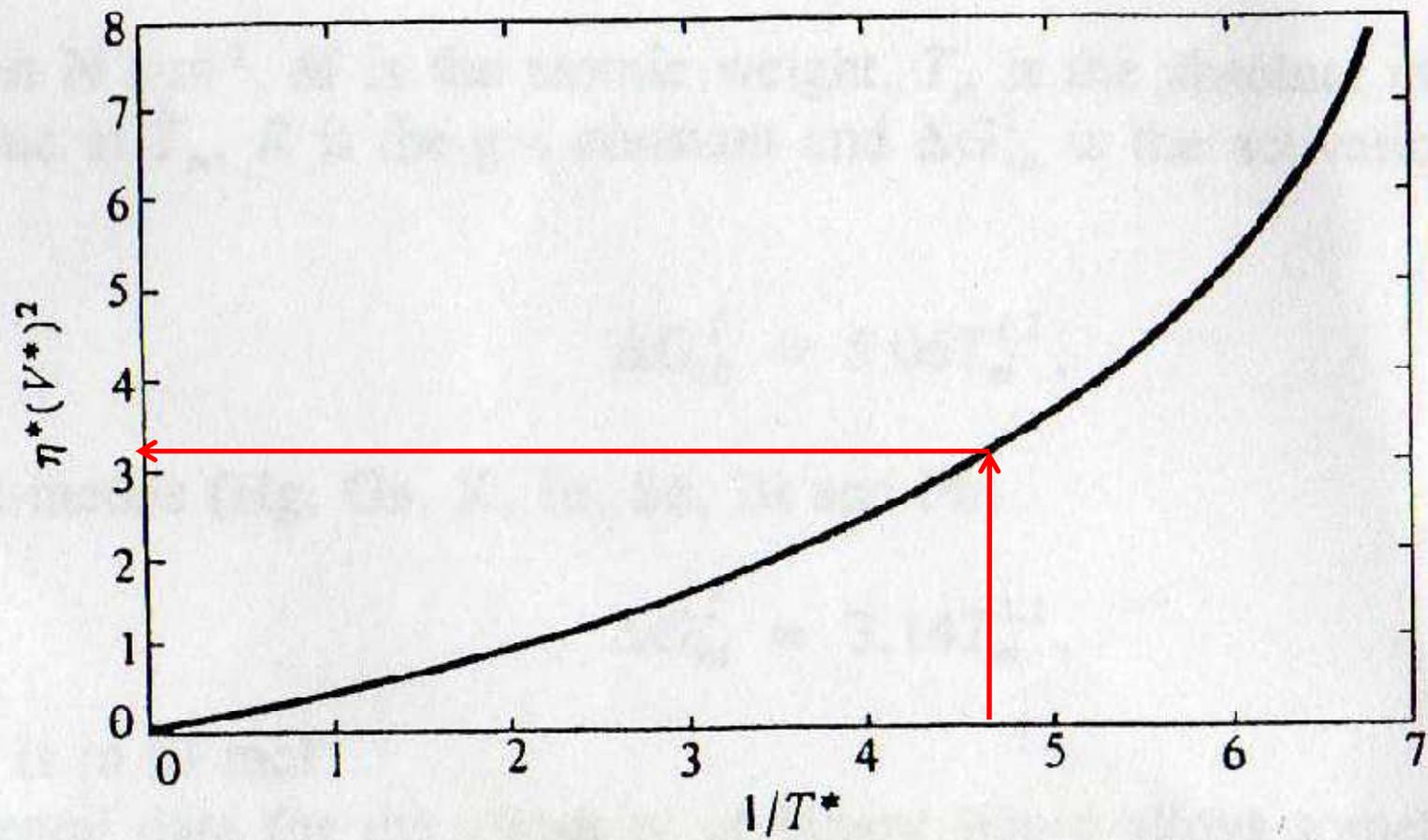
Componente	Xi	Mi [g/mol]	μ_i [Ns/m ²]
1)CO ₂	0.2	44.011	3.37×10^{-5}
2)CO	0.3	28.011	3.43×10^{-5}
3)SO ₂	0.2	64.063	3.10×10^{-5}
4)N ₂	0.3	28.013	3.49×10^{-5}

□ Fig 1.7



Problema 2

- Estimar la viscosidad del Titanio líquido a 2120 K.
Se tiene los siguientes datos:
- $T_m = 1943 \text{ K}$ (1670°C)
- $M = 47.9 \text{ g/mol}$
- $\rho = 4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $\delta = 0.289 \text{ nm}$



Problema 3

- Calcular la viscosidad de una escoria compuesta por 40% CaO, 40% SiO₂, 8% MgO, 12% Al₂O₃ a 1600°C y a 1500°C.

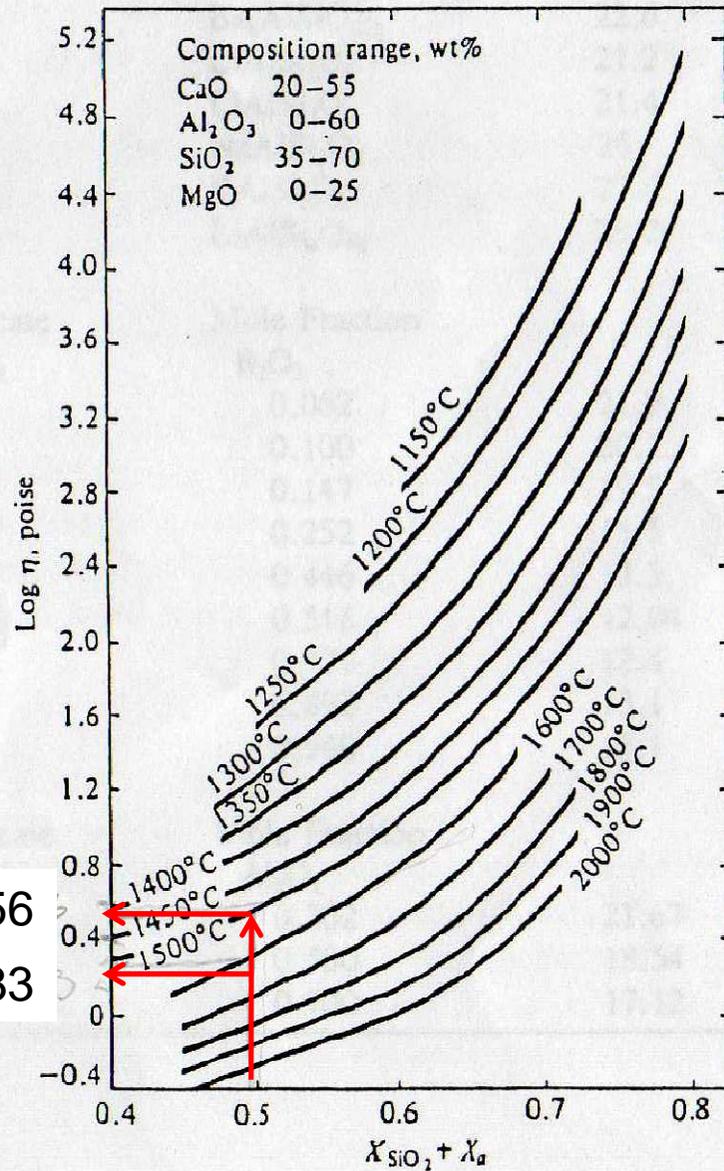


Fig. 1.16 Viscosity of CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO melts. Viscosity is expressed in poises. (From Turkdogan and P. M. Bills, *Amer. Cer. Soc. Bull.* **39**, 682 (1960).)