Materiales Refractarios

parte 3

Cátedra Materiales para Ingeniería

Ing. Teresa Antequera

Propiedades de los materiales refractarios y formas de control

❑Temperatura de fusión y ablandamiento - Refractariedad

- **Refractariedad**

Indica la temperatura a la cual el material se deforma por ablandamiento, a medida que se incrementa la temperatura

Depende de

- **El efecto de la composición**
- **El efecto de la velocidad de calentamiento**
- **Efecto de la microestructura**

Rango de fusión ← Formación de fase líquida

Punto de fusión → óxidos simples

Punto de reblandecimiento → materiales refractarios

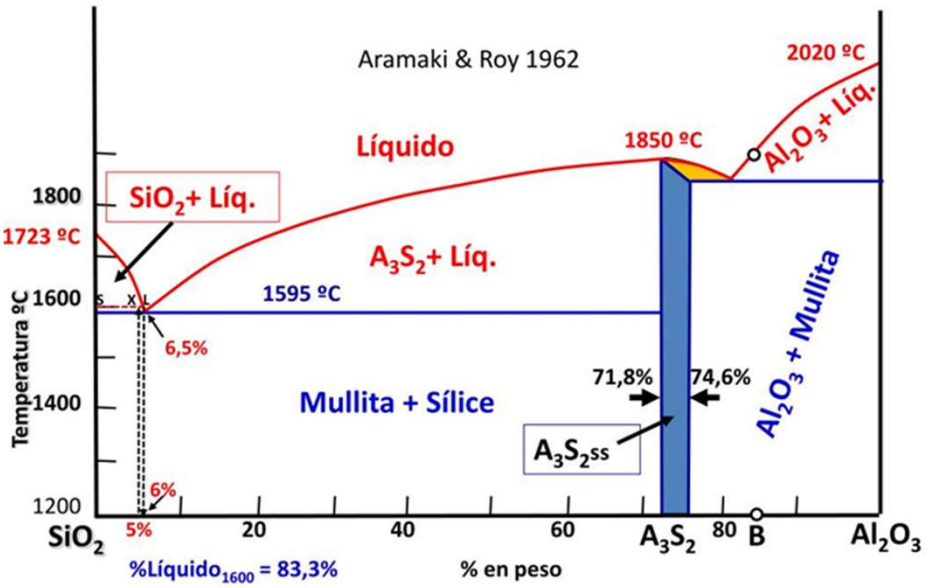
- **Determinación de la refractariedad**
  - ✘ Por comparación con los conos pirométricos (ASTM C-24)
  - ✘ Mediante pirómetros ópticos





Conceptos importantes

La línea de líquidus en un diagrama de fases binario (como el SiO_2–Al_2O_3) representa el límite superior de temperatura a partir del cual una mezcla comienza a solidificarse. Por encima de esta línea, el sistema está completamente en estado líquido.



La refractariedad es la capacidad de un material para resistir altas temperaturas sin fundirse ni descomponerse. Se mide como la temperatura máxima a la que el material mantiene su forma y propiedades físicas.

Temperatura de trabajo de materiales refractarios: Es la temperatura máxima a la que un ladrillo refractario puede operar de forma continua sin perder su integridad estructural ni funcional.

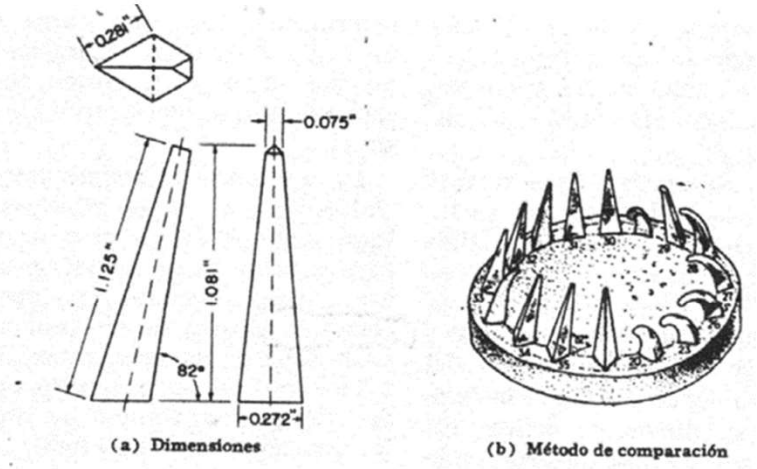
Refractariedad y Temperatura de trabajo

Tipo de ladrillo	Refractariedad (°C)	Temp. máx. trabajo (°C)
Sílice	1700–1730	1500–1600
Semisílice	1650–1700	1400–1500
Silicoaluminoso	1580–1700	1300–1450
Aluminoso	1650–1750	1400–1600
Alta alúmina Grupo I	1700–1750	1500–1650
Alta alúmina Grupo II	1750–1800	1600–1750



SELECCIÓN DE CONOS PIROMÉTRICOS ORTON
TABLA DE TEMPERATURAS EQUIVALENTES ºC

	Autosoportados (Self Supporting Cones)						Conos Grandes				Pequeños
	Regular			Sin Hierro			Regular		Sin Hierro		Regular
	Velocidad de calentamiento (˚C/hora)						*para últimos 100º C*				
Cono	**15**	**60**	**150**	**15**	**60**	**150**	**60**	**150**	**60**	**150**	**300**
022		586	590				N/A	N/A			630
021		600	617				N/A	N/A			643
020		626	638				N/A	N/A			666
019	656	678	695				676	693			723
018	686	715	734				712	732			752
017	705	738	763				736	761			784
016	742	772	796				769	794			825
015	750	791	818				788	816			843
014	757	807	838				807	836			870
013	807	837	861				837	859			880
012	843	861	882				858	880			900
011	857	875	894				873	892			915
010	891	903	915	871	886	893	898	913	884	891	919
09	907	920	930	899	919	928	917	928	917	926	955
08	922	942	956	924	946	957	942	954	945	955	983
07	962	976	987	953	971	982	973	985	970	980	1008
06	981	998	1013	969	991	998	995	1011	991	996	1023
05½	1004	1015	1025	990	1012	1021	1012	1023	1011	1020	1043
05	1021	1031	1044	1013	1037	1046	1030	1046	1032	1044	1062
04	1046	1063	1077	1043	1061	1069	1060	1070	1060	1067	1098
03	1071	1086	1104	1066	1088	1093	1086	1101	1087	1091	1131
02	1078	1102	1122	1084	1105	1115	1101	1120	1102	1113	1148
01	1093	1119	1138	1101	1123	1134	1117	1137	1122	1132	1178
1	1109	1137	1154	1119	1139	1148	1136	1154	1137	1146	1184
2	1112	1142	1164				1142	1162			1190
3	1115	1152	1170	1130	1154	1162	1152	1168	1151	1160	1196
4	1141	1162	1183				1160	1181			1209
5	1159	1186	1207				1184	1205			1221
5½	1167	1203	1225				N/A	N/A			N/A
6	1185	1222	1243				1220	1241			1255
7	1201	1239	1257				1237	1255			1264
8	1211	1249	1271				1247	1269			1300
9	1224	1260	1280				1257	1278			1317
10	1251	1285	1305				1282	1303			1330
11	1272	1294	1315				1293	1312			1336
12	1285	1306	1326				1304	1324			1355
13	1310	1331	1348				1321*	1346*			N/A N/A
14	1351	1365	1384				1388*	1366*			



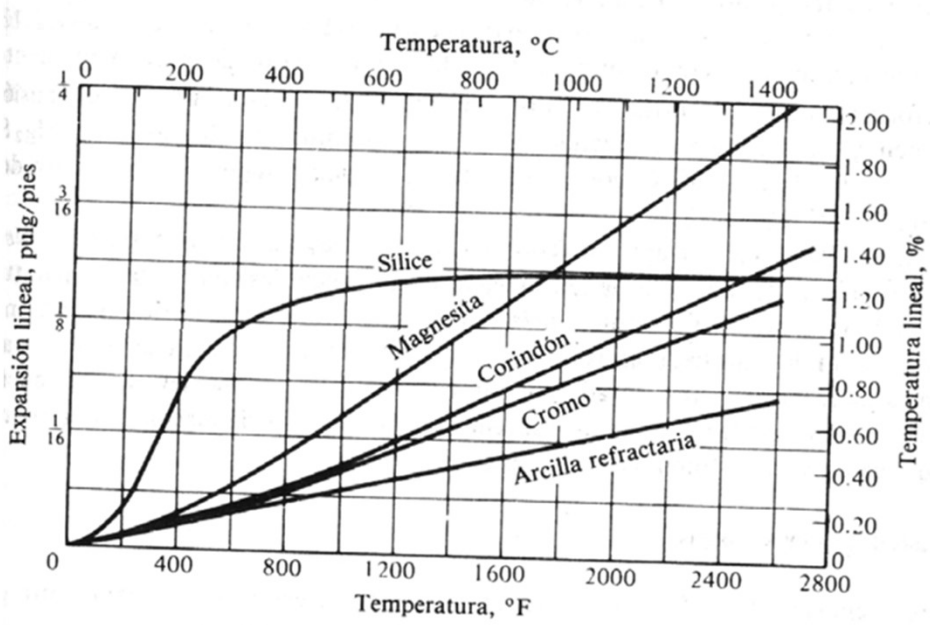




❑ Resistencia al choque térmico

La resistencia al choque térmico es una función

- ❖ Del coeficiente de expansión térmica,
- ❖ De la resistencia mecánica
- ❖ Del módulo de elasticidad
- ❖ De la existencia de transformaciones polimórficas.



La sílice sufre transformaciones cristalográficas durante el calentamiento:
a 573 °C (cuarzo α a cuarzo β), a 870 °C (cuarzo β a tridimita), y a 1470 °C (tridimita a cristobalita)

Spalling, desconchado o descantillado

- ✓ Spalling térmico
- ✓ Spalling mecánico
- ✓ Spalling estructural





La resistencia al choque térmico se puede medir experimentalmente por uno de los siguientes métodos:

- Por relación de módulos de rotura a la flexión (IRAM 12616)
- Determinación del máximo salto de temperatura que pueda soportar una pieza sin fracturarse al sumergirla en agua a temperatura ambiente. Se determina por el número de sucesivos ciclos térmicos: inmersión en agua desde una temperatura dada de calentamiento, que es capaz de aguantar sin fracturarse (vidrios y refractarios)
- Determinación de un índice analítico de resistencia al choque térmico

donde:
k: Conductividad. térmica
R: Carga de rotura
α: Coeficiente de dilatación
E: Modulo de Young
Ce: Calor especifico
Una alta carga de rotura R permite soportar tensiones más altas sin fractura

$$Ir = \frac{k * R}{\alpha * E * C}$$

❑ Resistencia Mecánica a baja temperatura

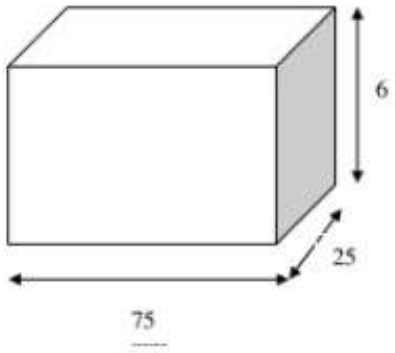
Existen dos tipos de ensayos para determinar la resistencia:

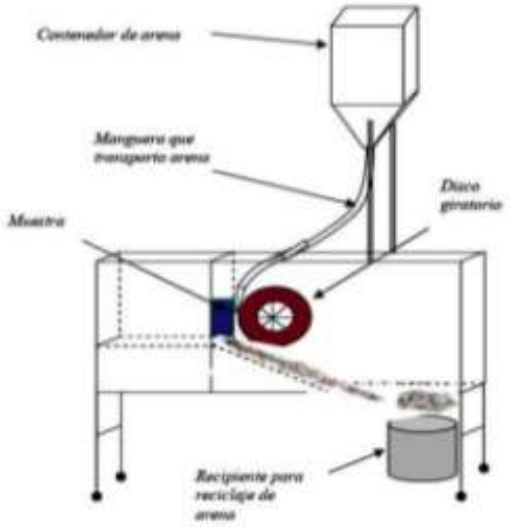
- Ensayo de resistencia a la compresión
- Determinación del módulo de elasticidad y carga de rotura a la flexión

$$MOR = Rf = \frac{3 * G * L}{2 * a * e^2}$$

Rf = Resistencia a la rotura por flexión en Kg/cm2
G = Carga de rotura en Kg
L = Distancia entre apoyos en cm
a = ancho de probeta en cm
e = espesor de la probeta en cm

❑ Resistencia a la abrasión





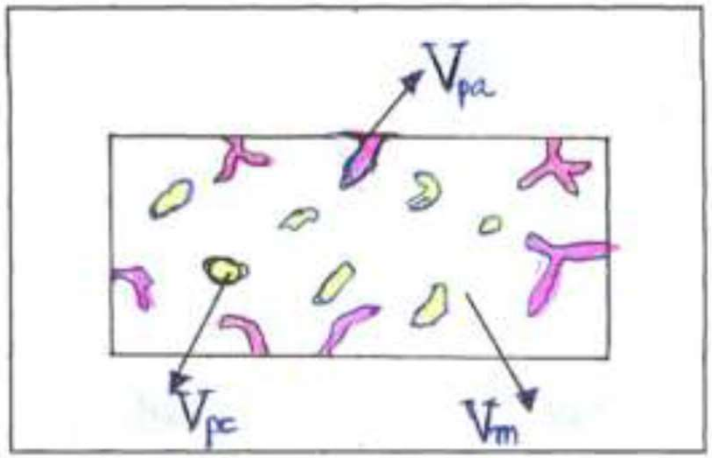
Propiedades de los materiales refractarios

Densidad de un material $\rho = \frac{M}{V}$

Masa probeta= Masa sólido + Masa aire ≅ Masa sólido

Vt = Vm + Vpc + Vpa

Vm = Volumen ocupado por la masa del material (volumen másico)
Vpc = Volumen ocupado por los poros cerrados (no comunicados con el exterior)
Vpa = Volumen ocupado por los poros abiertos (accesibles desde el exterior)



Va = Vm + Vpc

Va = Volumen aparente

Densidad real = $\rho = \frac{M}{V_m}$

Densidad aparente = $\rho_{ap} = \frac{M}{V_{ap}}$

Densidad global = $\rho_g = \frac{M}{V_t}$

Propiedades de los materiales refractarios

De la misma forma que se han definido tres densidades, existen sus correspondientes porosidades

$$P_a = \frac{V_{pa}}{V_T} 100 \ , \qquad P_c = \frac{V_{pc}}{V_T} 100 \ , \qquad P_T = \frac{V_{pa} + V_{pc}}{V_T} 100$$

Pa: Porosidad abierta
P_c: Porosidad cerrada
P_T: porosidad total

A menos que se recurra a procesos muy costosos, todos los refractarios producidos tienen una cierta cantidad de poros, cuyo número, tamaño y continuidad tendrán una influencia muy importante en el comportamiento del material refractario.



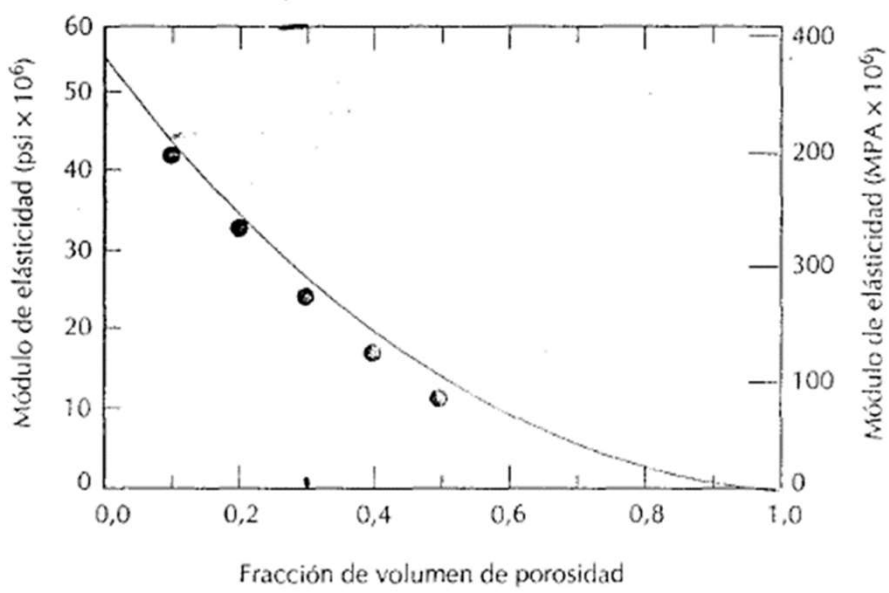
Porosidad

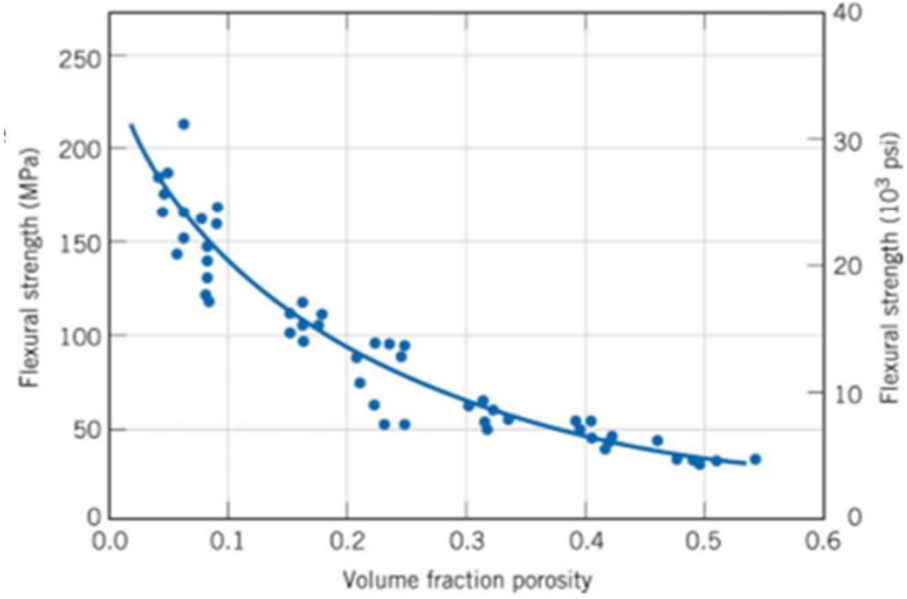
La porosidad deteriora las propiedades mecánicas.

La magnitud del módulo elástico E, disminuye con la fracción volumétrica de porosidad P

$$\mathbf{E = E_0 (1 - 1{,}9P + 0{,}9P^2)}$$

Donde Eo es el módulo de elasticidad





Ecuación de Ryshkewitch
La resistencia mecánica disminuye exponencialmente con la fracción volumétrica de poros P.

$$\mathbf{\sigma rf = \sigma_0 exp(-nP)}$$

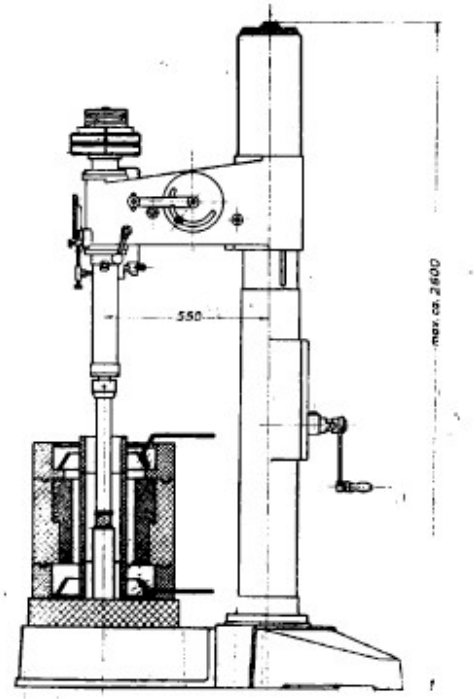
σ_0 y n son constantes experimentales

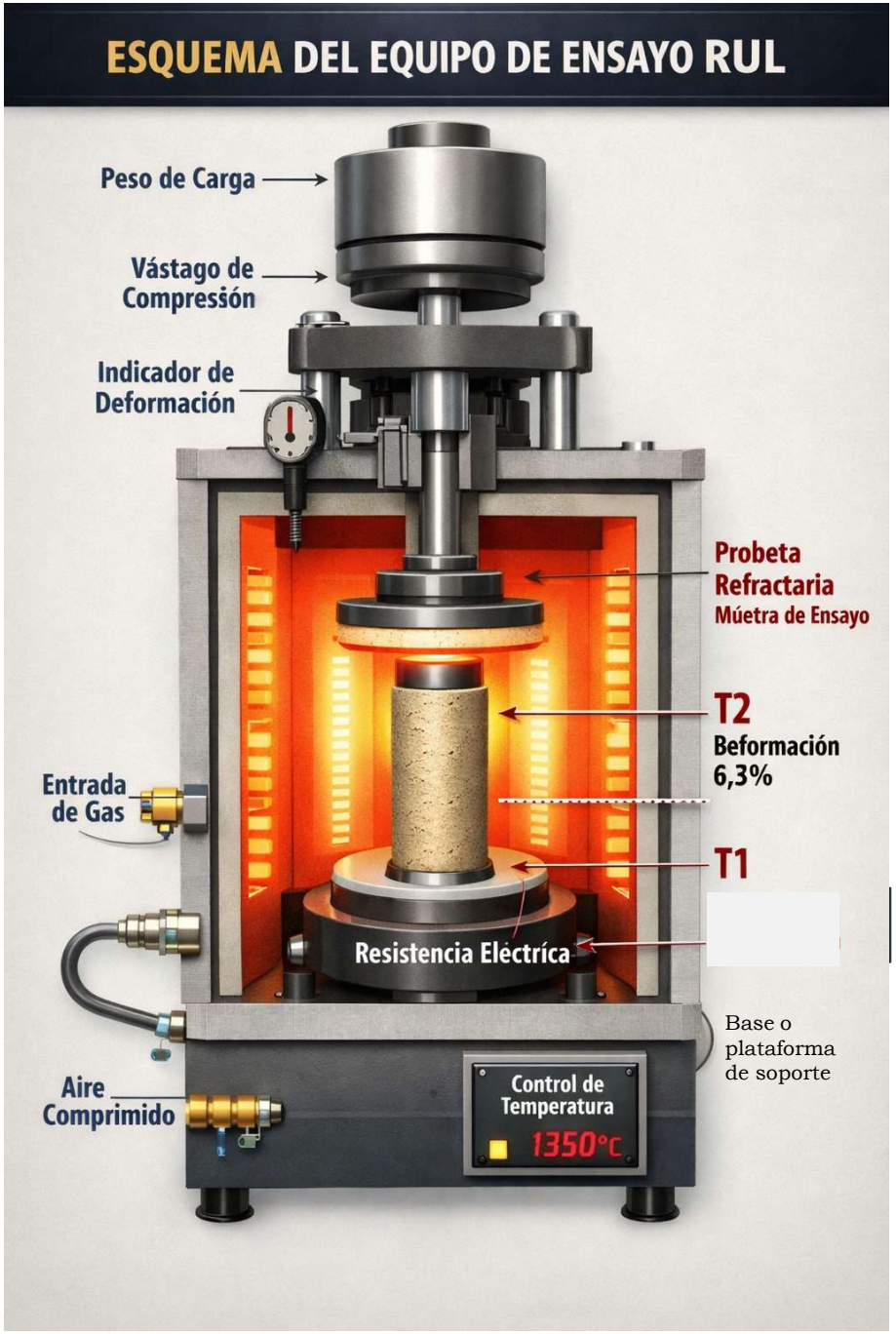
$\sigma 0$: resistencia teórica del material sin porosidad
n: constante que mide la sensibilidad de la resistencia a la porosidad
P: fracción de porosidad (0–1).

Resistencia a la deformación bajo carga

La acción combinada de cargas y temperaturas elevadas da lugar a fenómenos de fluencia lenta o creep, similares a los encontrados en los materiales metálicos: deformaciones crecientes con el tiempo.

- En los ensayos estándar de resistencia bajo carga suele emplearse una carga constante de 2 Kg/cm², determinándose la temperatura a la cual el refractario sufre una deformación dada (normalmente del 0.5%), en un tiempo de 100 o 1000 horas.





El equipo típico consta de:

- **Horno eléctrico vertical** capaz de alcanzar hasta 1700 °C.
- **Sistema de carga constante** (generalmente 0,2 MPa) aplicado sobre la probeta cilíndrica.
- 0,2 MPa≈2,04 Kg/cm^2
- **Dispositivo de medición de deformación** (comparador óptico o electrónico) que registra el cambio de altura de la probeta en función de la temperatura.
- **Controlador de temperatura** que permite calentar a una velocidad definida (≈ 4–5 °C/min).

Resistencia al ataque químico. Resistencia a las escorias

- **La resistencia al ataque por fundidos, especialmente las escorias siderúrgicas, resulta imprescindible tanto como criterio de aceptación y rechazo de productos refractarios, como herramienta en la investigación de mecanismos de ataque previa a la formulación de nuevos materiales o a la reformulación de los existentes de acuerdo con las nuevas exigencias de los procesos industriales**



Ensayo para la determinación de la resistencia al ataque químico







Finger test

Materiales para Ingeniería - Ingeniería Química
Cátedra de Materiales – Tercera Parte

