



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

EVALUACIÓN DE LA DIATOMITA DEL DESIERTO DE SECHURA PARA SU USO EN LA FABRICACIÓN DE AISLANTES TÉRMICOS Y REFRACTARIOS AISLANTES

Jorge Viera-Sernaqué

Piura, 1987

FACULTAD DE INGENIERÍA

Programa Académico de Ingeniería Industrial

Viera, J. (1987). *Evaluación de la diatomita del desierto de Sechura para su uso en la fabricación de aislantes térmicos y refractarios aislantes*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Industrial. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial. Piura, Perú.



Esta obra está bajo [una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA

Facultad de Ingeniería

Programa Académico de Ingeniería Industrial

**“Evaluación de la Diatomita del Desierto de
Sechura para su Uso en la Fabricación de
Aislantes Térmicos y Refractorios Aislantes”**

TESIS

**Que presenta el Bachiller en
Ciencias de la Ingeniería**

Jorge Benancio Viera Sernaqué

Para optar el título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

PIURA - PERU

1987

**UNIVERSIDAD DE PIURA
BIBLIOTECA**

A MIS PADRES Y HERMANOS

P R O L O G O

El actual proceso de industrialización del Perú prevé un fuerte aumento en la demanda de materias primas minerales, a las que se exigirá una mejor calidad y precios realmente competitivos.

Para hacer frente a esta demanda, es necesario la puesta en marcha de la explotación de los recursos naturales con un aprovechamiento integral de los yacimientos y una extracción planificada racionalmente; para esto es necesario conocer y valorar las disponibilidades existentes de dichos recursos naturales a escala nacional.

Como consecuencia de estas necesidades nace el presente proyecto, el cual pretende ser una acción concreta en el campo del conocimiento de las bondades de nuestros recursos naturales, específicamente de la tierra de diatomeas que se encuentran en grandes cantidades en los depósitos del desierto de Sechura, ubicados al Nor-oeste del Perú, en la costa del Departamento de Piura; así como proporcionar una alternativa de industrialización bastante prometedora, en el campo de los aislantes térmicos y refractarios aislantes.

El objetivo principal del presente trabajo es la determinación de algunas propiedades físico-químicas de las diatomeas de Sechura, que nos permita tener un conocimiento claro de la calidad de las mismas, así como

del comportamiento del material consolidado natural y de las variaciones que experimentan sus propiedades al ser sometido a temperaturas relativamente altas.

Complementariamente, se ha querido dar al presente trabajo un enfoque académico, ya que es el primero en la materia que se desarrolla en la Universidad de Piura. Por lo que el autor considera que, si el presente trabajo colabora con la formación y/o despierta el interés en el tema, de otras personas, habrá cumplido uno de sus mejores propósitos.

Deseo destacar la participación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) en el desarrollo del presente estudio por haberlo apoyado económicamente, considerándolo dentro del Programa de Subvenciones de tesis de pre-grado y hacer votos para que se mantenga su política de apoyo a la ciencia y la tecnología que es indispensable en la realización de trabajos de investigación.

Finalmente, deseo expresar el más sincero agradecimiento a la Universidad de Piura por haberme brindado una formación integral, no sólo en el aspecto técnico, sino también por la formación humanística; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC); al Ing. José L. Barranzuela Q. asesor; al Dr. Luis F. Verdeja G., profesor principal de la Universidad de Oviedo - España, quien colaboró con su experiencia y todo tipo de información; al Ing. Químico Vicente Palacios P., Superintendente General de la Unidad Bayóvar - Minero Perú; al Ing. Geólogo Absalón Aguilar L., Jefe Regional de Operaciones - Piura de la Empresa Promotora Bayóvar S.A.; y a todas las personas que, de una u otra forma, han hecho posible la realización de este trabajo.

INTRODUCCION

CAPITULO IESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA

	1
1.1. Datos Generales de la Diatomita	1
1.1.1. Diatomita	1
1.1.2. Propiedades Físicas y Químicas	1
1.1.3. Morfología	4
1.1.4. Origen de los Yacimientos	8
1.2. Usos	10
1.2.1. Usos Generales	10
1.2.2. Usos últimos en el Perú	10
1.2.3. Productos competitivos y sustitutorios	11
1.3. Geología General de los Depósitos	12
1.3.1. Diatomita en el Perú	12
1.3.2. Diatomita en el Desierto de Sechura (Piura)	13
1.4. Reservas	16

CAPITULO IIMATERIALES REFRACTARIOS, REFRACTARIOS AISLANTES YAISLANTES TERMICOS

	20
2.1. Materiales Refractarios	20
2.1.1. Definición	20
2.1.2. Características Estructurales	21
2.1.3. Clasificación	24
2.1.4. Formas Polimórficas y sus transformaciones	28

	INDICE
	Pág.
2.1.5. Mecanismos de Aglomeración	31
2.2. Materiales Refractarios Aislantes	35
2.2.1. Definición	35
2.2.2. Clasificación	35
2.2.3. Propiedades	36
2.3. Aislamiento Térmico	38
2.3.1. Fines	38
2.3.2. Propiedades Físicas	38
2.3.3. Propiedades Químicas	39
2.3.4. Materiales Aislantes	39
<u>CAPITULO III</u>	
<u>ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS,</u>	
<u>REFRACTARIOS AISLANTES Y AISLANTES TERMICOS</u>	
	41
3.1. Introducción	41
3.2. Propiedades Fundamentales Estructurales	42
3.2.1. Composición Química	42
3.2.2. Composición Mineralógica	43
3.2.3. Densidad	44
3.2.4. Porosidad	46
3.2.5. Permeabilidad al Aire	47
3.3. Propiedades Fundamentales Térmicas	49
3.3.1. Dilatación lineal reversible y permanente	49
3.3.1.1. Dependencia direccional del Coeficiente de Dilatación	50

3.3.1.2. Dependencia del Coeficiente de Dilatación con la valencia del compuesto	51
3.3.1.3. Dependencia del Coeficiente de Dilatación con el número de Coordinación	51
3.3.1.4. Dilatación Térmica lineal de los materia- les refractarios	51
3.3.2. Calor Específico	54
3.3.3. Conductividad Térmica	55
3.4. Propiedades que simulan las condiciones de operación del refractario	60
3.4.1. Refractariedad	60
3.4.2. Refractariedad bajo carga	64
3.4.3. Resistencia a la Compresión en frío	66
3.4.4. Resistencia a la Flexión	67
3.4.5. Resistencia al Choque Térmico	69
3.4.6. Resistencia al Ataque por Escorias	71
3.4.7. Resistencia a la Abrasión	79

CAPITULO IV

<u>REFRACTARIOS DE SILICE EN LA INDUSTRIA</u>	80
4.1. Refractarios de Sílice: Definición	80
4.2. Materias Primas	80
4.3. Propiedades Estructurales de las Materias Primas	82
4.3.1. Formas alotrópicas de la Sílice	82
4.3.2. Mecanismos de Aglomeración Cerámica de ladrillos de Sílice	84

INDICE

	Pág.
4.4. Propiedades de los ladrillos refractarios de Sílice	87
4.5. Propiedades relacionadas con los Ensayos Fundamentales	87
4.5.1. Densidad Real	87
4.5.2. Densidad Global	88
4.5.3. Porosidad abierta	88
4.5.4. Dilatación Lineal Reversible	89
4.5.5. Calor Específico	90
4.5.6. Conductividad Térmica	91
4.5.7. Dilatación Permanente	91
4.6. Propiedades con los Ensayos Simulados	92
4.6.1. Refractariedad	92
4.6.2. Refractariedad bajo carga	92
4.6.3. Resistencia al choque térmico	92
4.6.4. Resistencia al ataque por escorias	92

CAPITULO V

<u>EVALUACION TECNICA DE LA DIATOMITA DE BAYOVAR</u>	97
5.1. Zonas de Muestreo	98
5.2. Determinación Experimental de Propiedades Fundamentales	
Estructurales	101
5.2.1. Análisis Químico	101
5.2.2. Análisis Mineralógico	103
5.2.3. Pérdida porcentual de peso en función de la temperatura de tratamiento	110
5.2.4. Determinación de la Superficie Específica	115

INDICE

Pág.

5.2.5. Determinación de la densidad real o cristalográfica y su variación con la temperatura	115
5.2.6. Determinación de la densidad global o geométrica y su variación con la temperatura de tratamiento	123
5.2.7. Porosidad Total	129
5.3. Propiedades Fundamentales Térmicas	130
5.3.1. Medida de la Conductividad Térmica (k)	130
5.4. Evaluación de Propiedades Simuladas: Determinación de la Resistencia a la Compresión en Frío	134
5.5. Ensayos de Prensado-Sinterizado de Diatomita Pulverulenta	146
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFIA	159
ANEXO I	
ANEXO II	

I N T R O D U C C I O N

Teniendo en cuenta la gran importancia de la diatomita en el desarrollo industrial, ya que es un mineral no metálico de múltiples usos en ingeniería, y considerando la existencia de grandes reservas en el Desierto de Sechura (que hasta el momento no han sido estudiadas ni analizadas para su utilización a escala industrial dentro de un campo específico), se hace el presente estudio con el objeto de evaluar la calidad y el comportamiento del material consolidado natural con la temperatura de tratamiento.

En vista a satisfacer los objetivos propuestos, entre ellos el dar al presente trabajo un enfoque académico, se dividió éste en los siguientes capítulos:

Capítulo I, que aborda, básicamente, datos generales de las tierras de diatomeas, así como de la geología general y de las reservas de los depósitos del Desierto de Sechura.

Capítulo II, trata lo referente a los materiales refractarios, refractarios aislantes y el aislamiento térmico. Se da definiciones, características estructurales, formas polimórficas y sus transformaciones, y los mecanismos de aglomeración de estos materiales.

Capítulo III, es el más importante, ya que en él se estudia, resumidamente, las características de los materiales refractarios, refractarios aislantes y aislantes térmicos; a saber, propiedades fundamentales estructurales y térmicas, y propiedades simuladas.

Capítulo IV, teniendo en cuenta que presumiblemente, la diatomita sufre cambios de forma de la misma manera que la sílice cristalina, se ha creído conveniente tratar aquí, muy resumidamente, el comportamiento de los refractarios de sílice en la Industria.

Capítulo V, trata acerca de la evaluación técnica de la diatomita, de todo el trabajo experimental realizado; se expone, asimismo, los resultados obtenidos y un análisis crítico y comparativo de los mismos.

Finalmente, se incluyen las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó luego del desarrollo del trabajo.

CAPITULO I

ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA

1.1. Datos Generales de la Diatomita

1.1.1. Diatomita

La diatomita (tierra de diatomeas, tierra de diatomáceas, Kieselguhr) es una roca sedimentaria silícea, compuesta principalmente de restos esqueléticos fosilizados de las diatomeas, llamadas también Bacilariofíceas, un grupo de algas unicelulares que pertenecen al fílum Crisófitos. Cuando la planta muere se va al fondo del agua, donde se descompone la materia orgánica que lleva dentro y deja las valvas silíceas duras. Los yacimientos de diatomita son depósitos de estas valvas, razón por la cual la sílice diatomácea se califica como un mineral de origen orgánico.

1.1.2. Propiedades Físicas y Químicas

La Sílice del fosilizado esqueleto de la diatomea, se asemeja bastante al ópalo o sílice hidratada en su composición ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$). Su contenido de agua varía entre 3.5 y 8%. Sus impurezas son otros fósiles acuáticos (residuos de esponjas, radiolarios, sílico flagelados), arena, arcilla, ceniza volcánica, carbonatos cálcicos y magnésicos, sales solubles y materia orgánica. La cantidad de impurezas es sumamente variable y depende de las condiciones de sedimentación en el momento en que se depositan las diatomeas.

En una diatomita comercial el contenido de sílice varía entre 86 y 94%, aluminio 1.5% y hierro 0.2%. Otros elementos en menores cantidades, completan la totalidad de la composición química. Actualmente se desconoce la forma en la cual muchos de estos elementos están asociados. La Tabla 1.1., muestra la composición química de la diatomita de diversos yacimientos comerciales.

Aunque las diatomeas parecen amorfas bajo la luz del microscopio, los estudios de rayos - X muestran que la diatomita no tratada, natural, tiene una amplia aureola en la región del pico principal de la Cristobalita; razón por la cual se le considera como un microamorfo. La línea principal de rayos - X es una aproximación y no es idéntica con la α -Cristobalita, algunos investigadores han reportado que la β -Cristobalita es predominante (1). Todo esto nos indica que la diatomita es isotrópica. Las impurezas cristalinas producen sus propias líneas de rayos - X; por lo tanto, proporcionan información sobre su naturaleza, en mayor o menor grado, dependiendo de la cantidad presente.

En el terreno la diatomita es blanda, esponjosa, de apariencia yesosa. El color puede variar desde blanco nieve de un depósito seco y en estado relativamente puro, hasta el verde olivo o verde oscuro en depósitos donde todavía están presentes restos orgánicos y donde el contenido de humedad es elevado.

(1) SCHROEDER, H.J. "DIATOMITE". Minerals facts and problems, Bulletin N° 650. U.S. Bureau of Mines, 1970, pp. 967-975.

Tabla 1.1.

Composición Química de Diatomita natural de varias localidades (1)

% en peso	P R O C E D E N C I A									
	Lompoc California	Mary- land	Nevada	Idaho	Kenya	Japón	Rusia	España	Jalisco México	Algeria
SiO ₂	89.70	79.55	86.00	89.82	84.50	86.00	79.92	88.60	91.20	58.40
Al ₂ O ₃	3.72	8.18	5.27	1.82	3.06	5.80	6.58	0.62	3.20	1.66
Fe ₂ O ₃	1.09	2.62	2.12	0.44	1.86	1.60	3.56	0.20	0.70	1.55
TiO ₂	0.10	0.70	0.21	0.07	0.17	0.22	0.48	0.05	0.16	0.10
P ₂ O ₅	0.10	-	0.06	0.13	0.04	0.03	-	-	0.05	0.20
CaO	0.30	0.25	0.34	1.26	1.80	0.70	1.43	3.00	0.19	13.80
MgO	0.55	1.30	0.39	0.54	0.39	0.29	0.98	0.81	0.42	4.57
Na ₂ O	0.31	1.31	0.24	1.03	1.19	0.48	0.65	0.50	0.13	0.96
K ₂ O	0.41		0.29	0.22	0.91	0.53	0.72	0.39	0.24	0.50
Merma en la incineración	3.70	5.80	4.90	4.02	6.08	4.40	4.91	5.20	3.60	17.48*
T O T A L :	99.98	99.71	99.82	99.35	100.00	100.05	99.23	99.37	99.89	99.22

(1) ANON. "Celite: The Story of Diatomite". Johns Manville Corp. Bull. FA-41A, 26 pp., 1960.

* Incluye 13.9% CO₂

Sus propiedades son las siguientes:

. Punto de fusión, °C	1400 - 1650
. Gravedad específica	1.9 - 2.35
. Índice de refracción, tierra natural	1.4 - 1.46
. Índice de refracción, tierra calcinada	1.49
. Densidad global del terrón seco, g/cm ³	0.32 - 0.55
. Densidad global del polvo seco, g/cm ³	0.08
. Dureza MOHS, tierra natural	4.5 - 5
. Dureza MOHS, tierra calcinada	5.5 - 6
. Absorción de agua, % Peso	100 - 400

Es atacada por álcalis fuertes y por el ácido fluorhídrico, pero no por otros ácidos.

1.1.3. Morfología

Las diatomeas son las mejor conocidas y los miembros más numerosos del fílum Crisófitos con cerca de 200 géneros y de 12,000 a 16,000 especies (ver Fig. 1.1).

Basándose en la simetría que se muestra claramente por medio de las señales que aparecen en la superficie de las valvas, las diatomeas se dividen en dos amplias categorías. Las diatomeas pennadas, que muestran una simetría bilateral y están ampliamente representadas en las aguas dulces (Fig. 1.2 a,b,c), y las diatomeas concéntricas, que tienen una simetría radial y son generalmente marinas (Fig. 1.2 d). Cada forma consiste

de dos valvas, ambas limitadas por una banda conectante o cinturón, que en la diatomea viviente encierra el contenido celular.

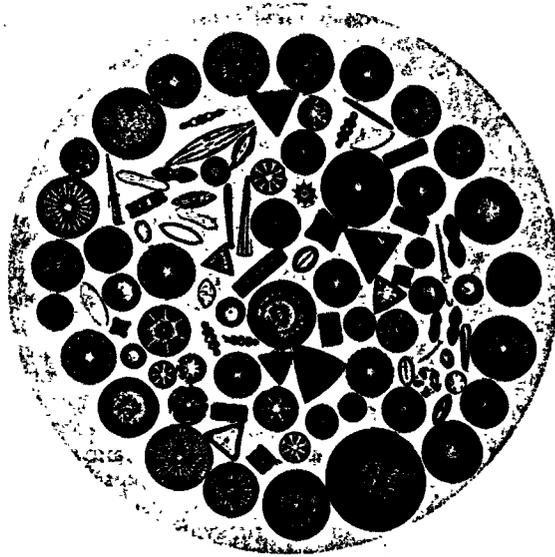


Fig. 1.1. Diatomeas de formas y tamaños variados.

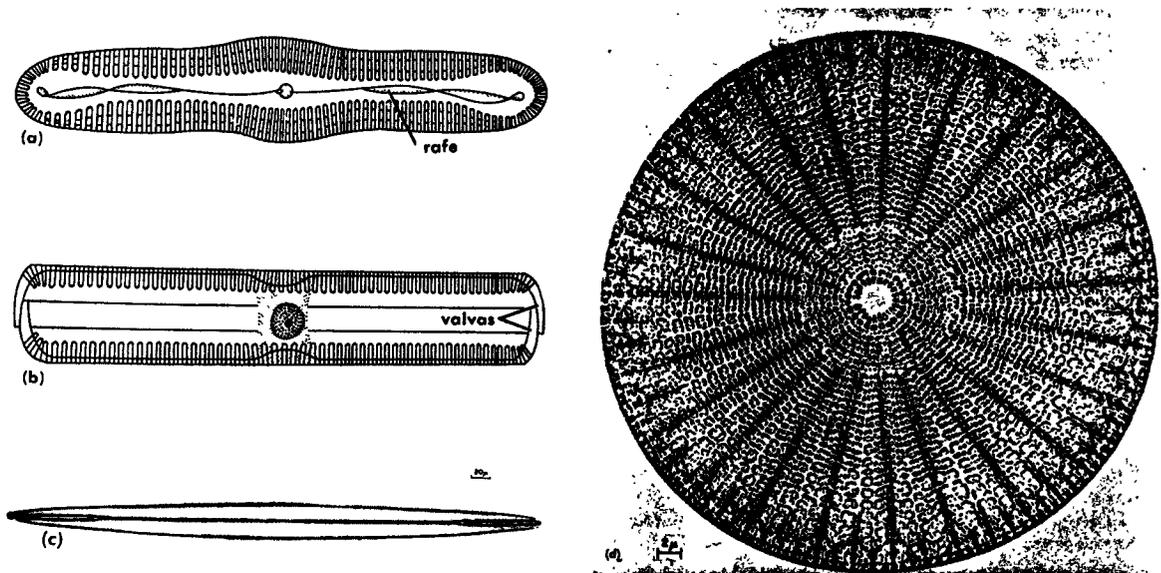
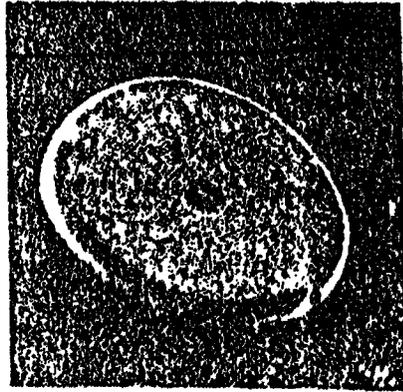


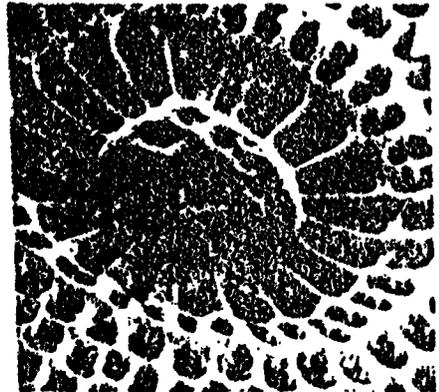
Fig. 1.2. (a) Pinnularia, diatomea. Parte superior de la valva que muestra la hendidura longitudinal o rafe. (b) Célula observada por su parte lateral que muestra cómo encajan las dos valvas. (c) Amphipleura pellucida, diatomea pennada. (d) Arachnoidiscus ehrenbergii, diatomea concéntrica.

Cada valva silíceica presenta un conjunto o sistema de aberturas (microporos) que están dispuestos en un consistente y ordenado diseño (Fig. 1.3). Además, cada valva parece consistir de una superficie interior y otra exterior en forma de plato, separadas por nervaduras, lo que da como resultado un interior ahuecado. La estructura de cada superficie es diferente, porque la naturaleza de las aberturas de cada superficie dentro de la cámara no es la misma.

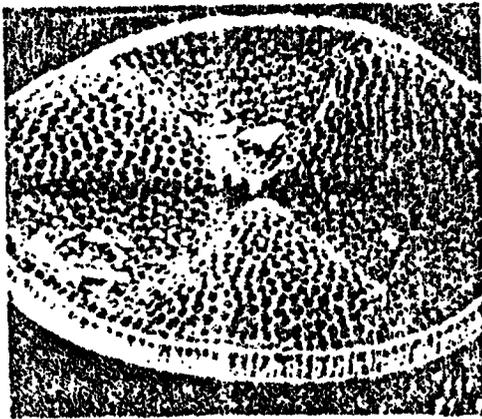
Ciertas propiedades de la diatomita (físicas y químicas) pueden visualizarse como primarias o fundamentales en naturaleza: la naturaleza y configuración de la estructura esquelética, gravedad específica, índice de refracción, dureza, friabilidad y composición química son unas cuantas. Son éstas las que determinan las propiedades secundarias o derivadas, que también dotan a la diatomita de atributos que la ubican en sitio diferente de las otras fuentes de sílice. Es una segura generalización, decir que la estructura esquelética es la principal propiedad primaria que controla muchas de las propiedades secundarias, pueden considerarse como algunos ejemplos la baja densidad global, baja densidad húmeda o aglutinada y elevada área superficial.



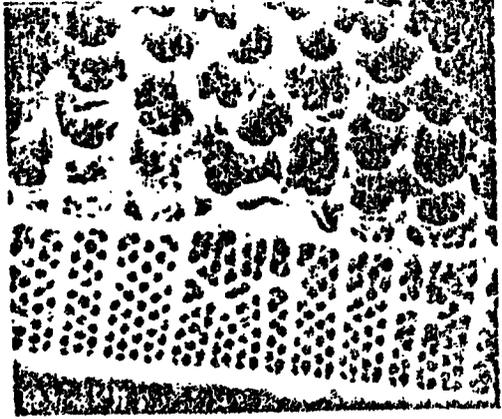
(a) 10μ



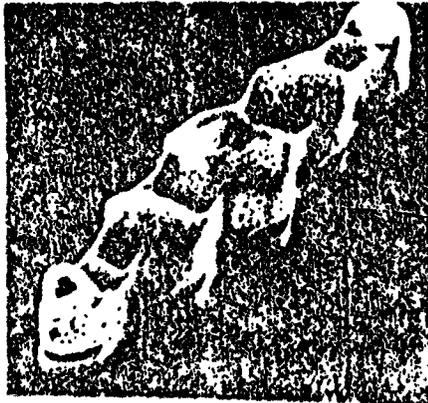
10μ



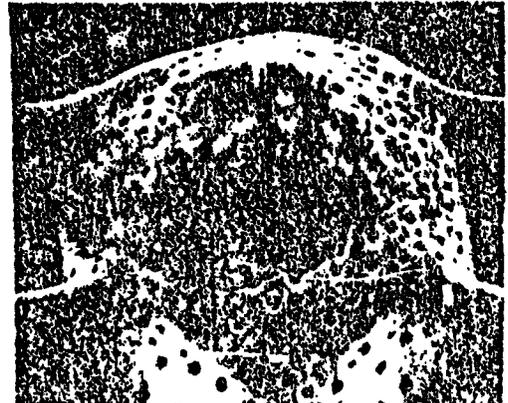
(b) 10μ



10μ



(c) 10μ



10μ

Fig. 1.3. Micrografías de: (a) *Arachnoidiscus ornatus*. (b) *Actinoptychus undulatus*. (c) *Biddulphia Tuomeyi*. Lompoc. California.

1.1.4. Origen de los Yacimientos

Las diatomeas abundan mucho en el mundo, pues crecen dondequiera que son favorables la luz, humedad y el alimento. Las que forman los yacimientos comerciales crecieron en aguas salada, salobre o dulce; las recientes se presentan en lagos, pantanos y contienen gran proporción de materia orgánica.

Estos criterios son muy importantes, debido a que los conglomerados de diatomeas de ambientes marinos, son poco diferentes de los que viven solamente en habitats de agua dulce. La observación microscópica de la asociación de formas o el conglomerado de diatomeas no solamente sirve para diferenciar el origen, sino también para identificar, en muchos casos, la localización de los depósitos de donde proceden las muestras (Figura 1.4).

Los grandes yacimientos datan de la era terciera, período mioceno superior. Los yacimientos pequeños, pero que a menudo tienen importancia comercial, son de origen reciente. Algunos se hallan en proceso de formación. La era terciera fue ideal para el desarrollo rápido de las diatomáceas, probablemente a causa de la intensa actividad volcánica en el período mioceno, que suministró gran cantidad de ceniza volcánica y sílice.

Los yacimientos marinos suelen ser depósitos bien estratificados de diversos grados de pureza. Los de agua dulce se hallan en lagos antiguos, sobre todo en el oeste de los Estados Unidos. Los yacimientos de agua salobre son irregulares y de aspecto intermedio entre los marinos y los de agua dulce.

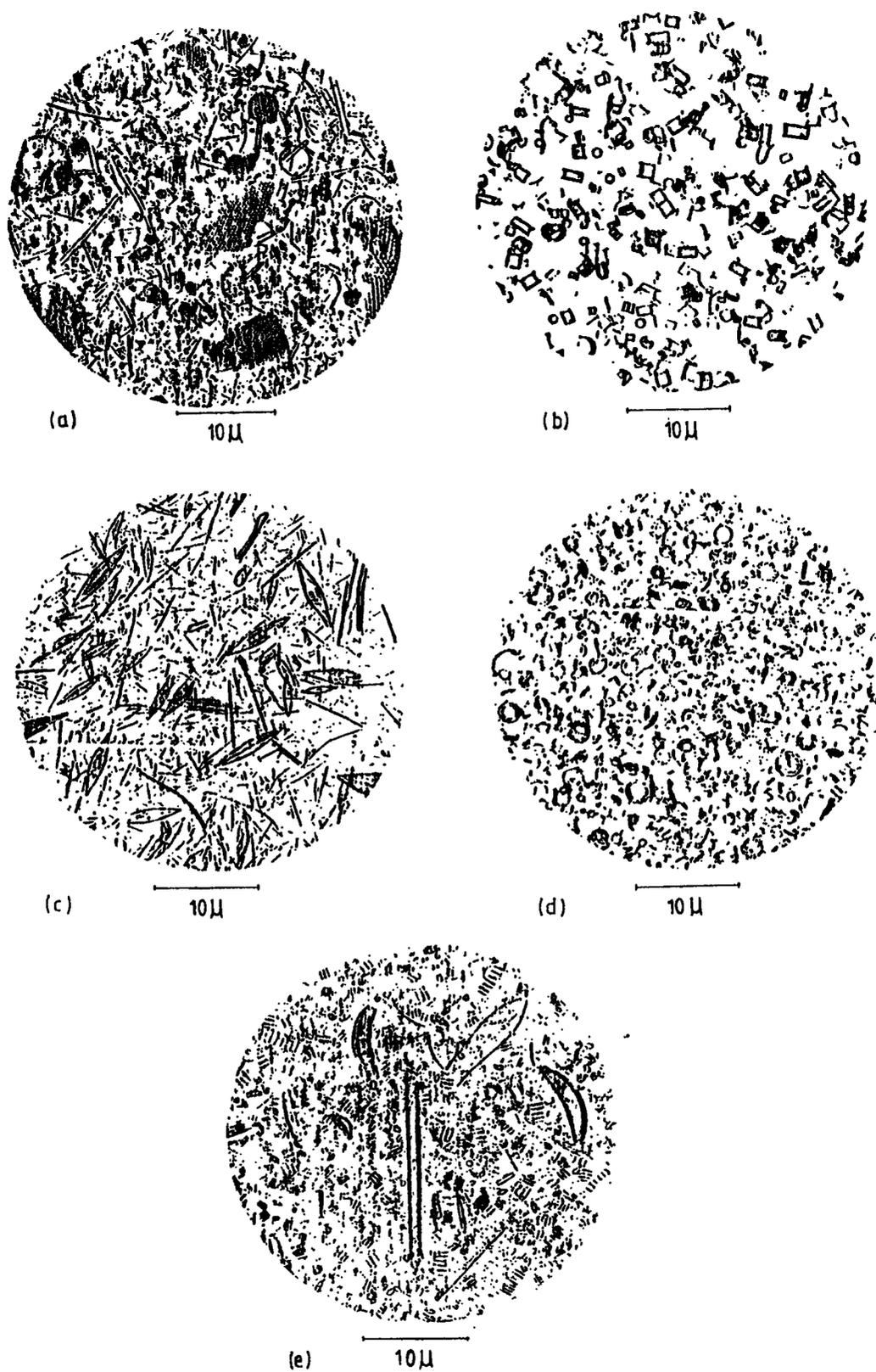


Fig. 1.4. Micrografías de conglomerados de diatomeas.
 (a) Origen marino proveniente de Lompoc, California.
 (b) Origen lacustre proveniente de Carlín, Nevada.
 (c) Origen lacustre proveniente de Pernambuco, Brasil.
 (d) Origen lacustre proveniente de Elche, Sierra Española.
 (e) Lago moderno proveniente de la Isla Myvarn.

1.2. Usos

1.2.1. Usos Generales

La diatomita procesada posee una inusual estructura y estabilidad química que hace que se preste, por sí misma, a aplicaciones que no pueden cubrir otras formas de sílice, razón por la cual se usa en casi todas las ramas de la industria; principalmente en filtración, 50%; aislamiento térmico, 25%; material de relleno, aditivo, etc., 25%.

Su singular estructura diatomácea, baja densidad global, alta capacidad de absorción, elevada área superficial y relativamente baja abrasión, son los atributos responsables de su utilidad como un funcional elemento de relleno y como un extensor en pinturas, papel, caucho y plásticos. Se le usa además como un agente antiaglomerante, clarificador, material absorbente, portador catalítico, soporte cromatográfico, pulidor, abrasivo y extensor de pesticidas, para nombrar algunas aplicaciones representativas.

1.2.2. Usos últimos en el Perú

La diatomita tiene una variada utilización en las diferentes industrias del país, siendo usada principalmente como:

a) Agente aislante del calor, por su bajo coeficiente de transmisión de calor.

b) Agente de carga industrial en la fabricación de papel, tinta, jabones, secantes, fósforos, plásticos diversos, etc.

c) Agente filtrante de clasificación y clarificación del azúcar y toda clase de líquidos (bebidas, aceites), ácidos y otros.

d) Agente absorbente (en virtud a su alto índice de porosidad) en insecticidas, fungicidas, pilas eléctricas, dinamitas, líquidos explosivos, catalizadores, etc.

e) Agente abrasivo en líquidos y pastas para limpiar y pulir.

f) En la fabricación de silicatos de calcio y otros.

En nuestro país, las aplicaciones arriba mencionadas son satisfechas en su mayor parte por la importación, puesto que la producción nacional no satisface la demanda y exigencias en calidad requeridas por las industrias del país.

1.2.3. Productos competitivos y sustitutorios

La diatomita es un no-metal de amplia aplicación en procesos y usos industriales, debido a que posee propiedades y características que no alcanzan otras formas de sílice (o algún otro tipo de polvo mineral); por lo que se le considera prácticamente insustituible en muchas aplicaciones.

La Perlita, asbestos y arena silícea compiten con la diatomita en algunas aplicaciones de filtración, pero en la mayoría de los casos la diatomita es un material de calidad superior. Materiales alternativos para ser utilizados como materia de relleno, dependiendo de la aplicación espe

cífica, pueden ser: talco, arcilla calcinada, perlita, vermiculita, greda o tiza y piedra caliza.

Una variedad de materiales aislantes tales como el ladrillo de alta alúmina, arcilla refractaria, asbestos, lanas minerales, vermiculita y perlita, compiten con la diatomita en propósitos de aislamiento. De manera similar muchos de los otros usos de la diatomita tienen materiales alternativos, pero sus propiedades particulares aseguran una continua aceptación de ésta para muchas aplicaciones.

1.3. Geología General de los Depósitos

1.3.1. Diatomita en el Perú

Los informes geológicos sobre la ocurrencia de los depósitos de diatomita en el territorio nacional son muy escasos. Sin embargo, las formaciones más conocidas que contienen diatomita, de origen marino, son Zapallal y Pisco, que afloran en los Departamentos de Piura e Ica, respectivamente.

La primera de edad MIOCENO Medio, está constituida por varios mantos de diatomita alternada con otros de fosforita, areniscas y tufos; mientras que la formación Pisco del Mioceno Superior, consiste de diatomita blanca finamente estratificada con algunas intercalaciones de capas calcáreas.

Asimismo, la formación Maure de origen continental y edad Pliocena, es otra de las formaciones que contienen capas de diatomita, las que al-

ternan con sedimentos lacustres y cenizas volcánicas; aflora en los Departamentos de Arequipa, Puno y Tacna. Algunas formaciones lacustres cuaternarias contienen capas de diatomita como por ejemplo: los depósitos de Uzuña y Chihuata en Arequipa.

La mayoría de los depósitos del Sur del Perú (C° Huamali, Nazca, Tukurani, Uzuña, etc.) no cuentan con datos acerca de su calidad y reservas.

En muchos lugares dentro de los afloramientos de estas formaciones, se ha comprobado la presencia de diatomita y en algunos de ellos se ha llegado a efectuar una exploración preliminar, como es el caso del área de Bayóvar.

En general, en el país, dadas las características geológicas de las formaciones y su distribución superficial, se puede hacer una estimación del potencial que sería del orden de varias centenas de millones de toneladas de material diatomítico.

1.3.2. Diatomita en el Desierto de Sechura (Piura)

En la Cuenca de Sechura se ha constatado la existencia de significativos volúmenes de diatomita (ver Plano 01), las cuales conforman las diferentes unidades estratigráficas de diatomita y fosforita del miembro superior de la formación Zapallal, siendo visibles en los bordes de la depresión del área de los fosfatos (Area II), donde también ocurren como capas intercaladas con los de fosforita. Asimismo, existen en el área I, donde al igual que en el área anterior alcanzan espesores de hasta 7 m.

Otros afloramientos ocurren al sureste del Estuario de Virrilá y en otros pequeños desniveles de la Cuenca, bordeando el tablazo Talara, como angostos afloramientos blanquecinos.

A los miembros de la formación Zapallal se les asignó la nomenclatura dada por el geólogo Tom Cheney de la Minera Bayóvar S.A. (1), por considerarse la más completa y estar apoyada por numerosas perforaciones (Figura 1.5).

Según Cheney, la litología de la parte inferior del miembro consiste de los siguientes niveles litológicos de orden ascendente: tobas grises, zona mineralizada diana y diatomita tobácea.

La diatomita tobácea es la secuencia inferior conocida con mejor detalle, habiendo sido atravesada con cerco de 50 m de perforaciones, pudiendo tener un mayor grosor. Mayormente consiste en capas de diatomita con contenido de foraminíferos y oolitos fosfáticos marrones brillantes o acaramelados y en una porción menor de 2% de P_2O_5 , pero en tres diferentes niveles característicos el porcentaje es de mucho mayor grosor, razón por lo que es objeto de minado.

En el miembro superior se pueden reconocer cinco paquetes litológicos en orden ascendente: arenisca (Clambore), zona mineralizada ce-ro, diatomita Inca, zona mineralizada minerva y diatomita Quechua.

(1) MINERA BAYOVAR S.A.: Empresa que en el período 1963-1971 tuvo las concesiones Mineras de Bayóvar.

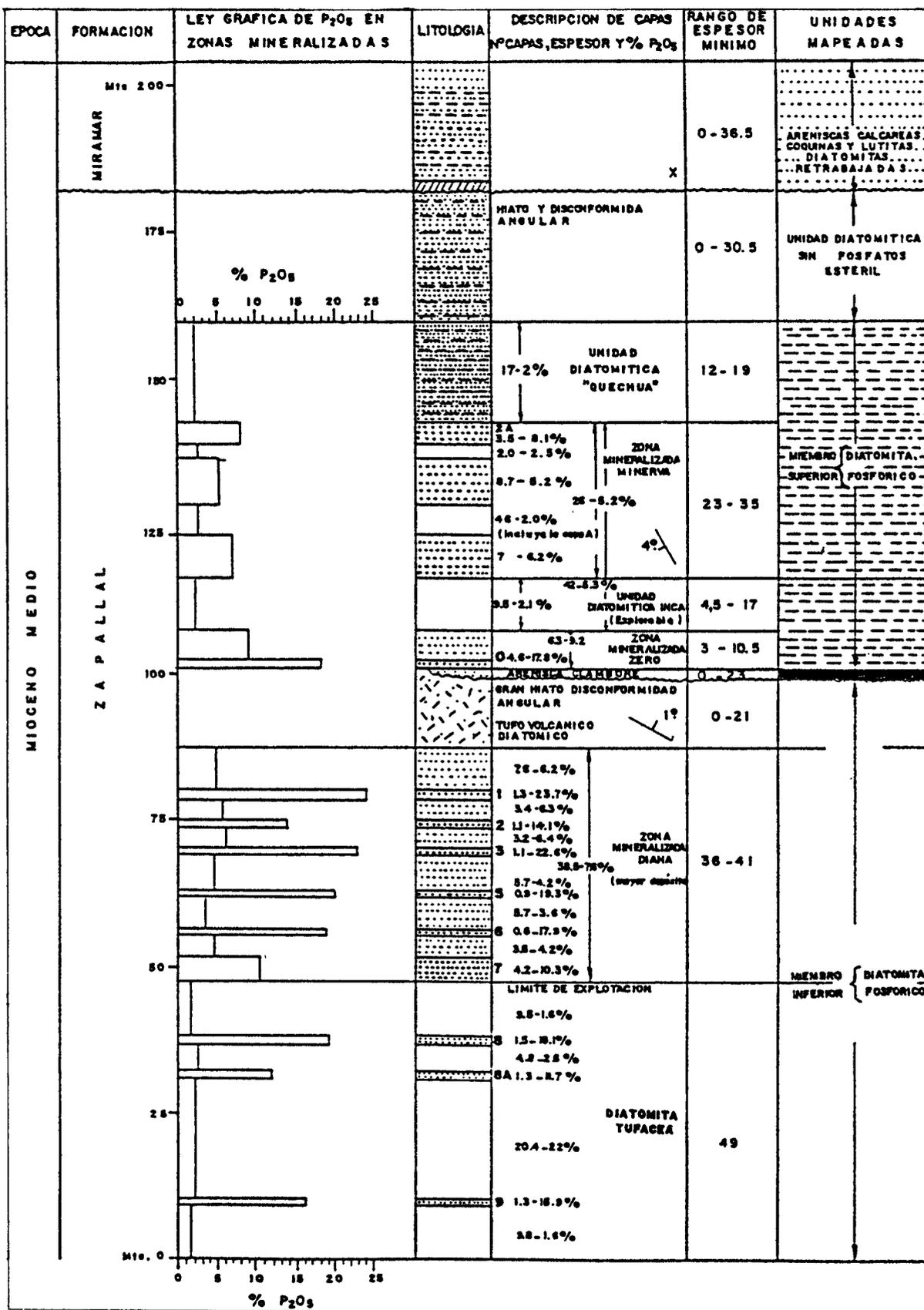


Fig. 1.5. Sección Estratigráfica - Composito de los Yacimientos de Diatomita y Fosfatos - Desierto de Sechura.

La diatomita Inca se compone esencialmente de diatomita sin ningún contenido de impurezas, salvo escamas de peces, espícula de esponjas y hojas de algas, todas fosfatadas, de color marrón brillante y de lustre resinoso. Esta unidad exhibe un grosor que varía entre 4.5 y 17 m., siendo más gruesa en el sector occidental del área y adelgaza hacia el noreste, probablemente por el contenido fosfático en toda la sección.

La diatomita Quechua se compone mayormente de diatomeas bastantes puras con una o dos capas de fosforita. Su máximo grosor es de 19 m y se encuentra en el lado noreste de la depresión salina grande, siendo irregular según los lugares, probablemente debida a la interdigitación con el nivel estéril. Contiene además muchos huesos y dientes de peces y grandes granos de cuarzo.

En la parte más alta que presenta la unidad Miocena en el desierto de Sechura, se encuentra la unidad diatomítica estéril.

La diatomita estéril es bastante pura, de color blanca en capas delgadas y muy livianas, con manchas amarillas o anaranjadas, hasta rojizas, pero en el área I, próxima a la quebrada San Andrés, muestra fajas verde olivo que se considera producidas por la oxidación de la materia orgánica.

1.4. Reservas

Los recursos de diatomita son difíciles de descubrir porque las rocas diatomáceas se extienden debajo de grandes áreas e incluyen estratos de varias calidades, ni siquiera los recursos de California, la principal

área productora de los Estados Unidos de América del Norte, han sido calculados y clasificados según su grado de pureza.

En todos los continentes existen recursos de diatomita; sin embargo, muy poca información acerca de éstos, ha sido publicada.

La Tabla 1.2., muestra las reservas y reserva base a nivel mundial por continentes (1). La reserva base incluye recursos que son corrientemente económicos (reservas), las marginalmente económicas (reservas marginales) y algunas que son corrientemente sub-económicas.

Tabla 1.2.

Reservas y Reservas Base a nivel Mundial (Millones de toneladas)

	<u>Reservas</u>	<u>Reserva Base</u>
América del Norte	300	600
Africa	10	20
Asia	20	50
Europa	400	1,200
Oceanía	10	20
América del Sur	<u>40</u>	<u>100</u>
TOTAL MUNDIAL :	800	2,000

(1) SCHROEDER, H.J. "DIATOMITE", Minerals Facts and Problems, Bull. N° 650. U.S. Bureau of Mines, pp. 967-975 (1970).

En el Departamento de Piura, en el desierto de Sechura, grandes reservas de diatomita relativamente pura de origen marino (1) son asequibles desde las unidades Inca y Quechua. Se ha cubicado una reserva probable para la diatomita Inca, en la sub-división E de la depresión Nor-oes-te y la sub-división A del Tablazo, de 100 millones de toneladas. El total de reservas de diatomita Inca y Quechua en el tablazo (área IV) han sido estimadas en un billón de toneladas (2). En la figura 1.6., se muestran algunos afloramientos diatomíticos.

(1) Estudio realizado por la Academia de Ciencias de San Francisco, California, para Minera Bayóvar S.A. Marzo, 1964.

(2) Estudio realizado por el Geólogo Tom Cheney de la Minera Bayóvar S.A. Marzo, 1964.

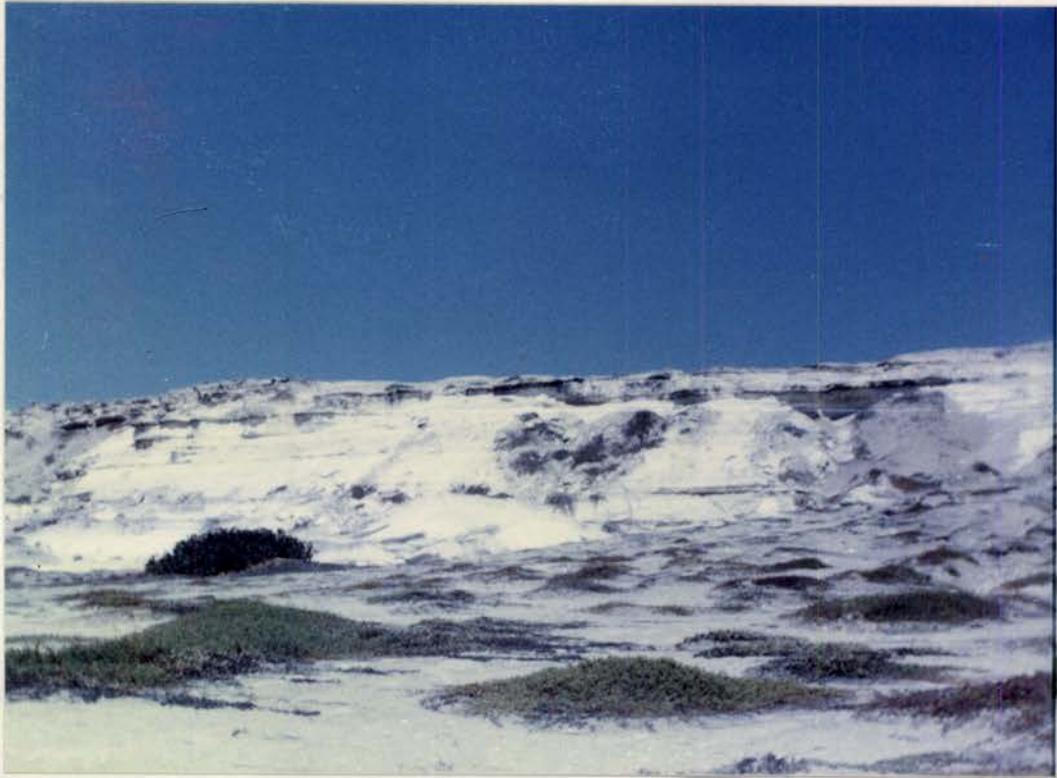


Fig. 1.6. Afloramientos de diatomita de los depósitos del desierto de Sechura.

CAPITULO II

MATERIALES REFRACTARIOS, REFRACTARIOS AISLANTES Y AISLANTES TÉRMICOS

En un horno industrial la superficie interior de la mampostería de la zona de trabajo soporta la acción de temperaturas elevadas y la acción física y química de gases, metales, escorias y óxidos. Evidentemente, en los trabajos con hornos, se debe conservar el calor. La función primordial de un buen refractario es soportar la carga del horno sin que se produzcan colapsos ni distorsiones. Sólo en segunda instancia es un aislante del calor y esta aislación debe estar dada por piezas especiales: refractarios aislantes y aislantes térmicos.

2.1. Materiales Refractarios

2.1.1. Definición

Pueden existir numerosas formas de definir lo que es un material refractario, no obstante y debido a que es sumamente difícil condensar en pocas palabras las diferentes características de las distintas familias, consideraremos como material refractario a todo aquel compuesto no metálico que es capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevadas temperaturas.

La norma peruana ITINTEC (331.001-84) define a los materiales refractarios como aquellos materiales no metálicos convenientes para usarse en la construcción de hornos, que poseen la propiedad de no deformarse ni

fundir cuando se someten a la acción de temperaturas elevadas. También deben resistir otras influencias destructivas como abrasión, presión, ataque químico y cambios bruscos de temperaturas.

La norma española (UNE-61.001-75) define a los materiales refractarios como aquellos materiales naturales o artificiales, cuya refractariedad es igual o superior a 1500°C. En su mayor parte están constituidos por silicatos de óxidos térreos, a los que también se suman otros elementos o compuestos tales como carbono, grafito, carburos, nitruros, boruros, siliciuros, etc.

Campos Lóriz D., dice que un material refractario es aquel material policristalino, no metálico, inorgánico, de alto punto de fusión, y que se fabrican, en general, a partir de un polvo que se conforma mediante prensado u otro procedimiento y que se somete a continuación a una cocción a alta temperatura (1). El autor reconoce que la definición es superflua, mal ordenada, incompleta e inexacta, si bien argumenta que probablemente no exista otra mejor.

2.1.2. Características Estructurales

Estructuralmente los materiales refractarios conformados presentan tres fases perfectamente definidas:

- a) Constituyente disperso (generalmente compuesto por óxidos simples).

(1) CAMPOS LORIZ, D. "Los Materiales Refractarios: Generalidades y Clasificación". Revista Metalúrgica CENIM, Vd. 16, N° 2, 113 (1980).

- b) Constituyente matriz (materiales complejos de naturaleza cris
ta
li
na o vítrea).
- c) Porosidad.

Las especies químicas que dan lugar al denominado constituyente dis-
perso son particularmente las siguientes:

Especie Química	Punto de Fusión (°C)
Alúmina, Al_2O_3	2050
Sílice, SiO_2	1713
Mullita, $3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$	1845
Periclasa, MgO	2800
Oxido de Zirconio, ZrO_2	2720
Zircón (Silicato de Zirconio), $ZrSiO_4$	2500
Cromita, $Cr_2O_3 \cdot FeO$ ($FeCr_2O_4$)	2180
Grafito, C	3525
Carburo de Silicio, SiC	2700
Cal, CaO	2570

El constituyente matriz puede ser una fase vítrea o cristalina de composición más compleja que el constituyente disperso. No obstante, la refractariedad (o la temperatura del punto de ablandamiento) es menor para el componente matriz (que reblandece a temperaturas inferiores) que para el componente disperso.

Si bien en un producto electrofundido la porosidad es mínima, en la mayoría de los artículos refractarios la porosidad va a desempeñar una im

portante misión por su estrecha vinculación con ciertas propiedades fundamentales y tecnológicas del material.

La naturaleza del constituyente matriz es normalmente compleja debido a la presencia de los óxidos alcalinos (litio, sodio y potasio) y de los óxidos de hierro que disminuyen la refractariedad de la mezcla. No obstante, las fases cristalinas o vítreas en las cuales pueden disolverse los constituyentes dispersos anteriormente citados, suelen ser principalmente las siguientes:

<u>Especie Química</u>	<u>Punto de Fusión (°C)</u>
SiO ₂ (Vítrea)	1713
CaO . SiO ₂ (Wollastonita)	1544
2 CaO . SiO ₂ (Silicato bicálcico)	2130
2 MgO . SiO ₂ (Forsterita)	1900
12 CaO . 7 Al ₂ O ₃	1410
MgO . SiO ₂ (Silicato de Magnesio)	1720

En la figura 2.1., se muestra un refractario de cromita constituido por una fase dispersa de cromita aglomerada o rodeada por un constituyente matriz de serpentina (3 MgO . 2 SiO₂).

El constituyente matriz, al reblandecerse a las temperaturas de cocción del material, nos garantiza la consistencia mecánica del material disperso. No obstante, paralelamente a los procesos de fusión parcial (o de reblandecimiento) de la matriz, suelen acontecer reacciones sólido-lí-

quido, procesos de crecimiento de grano, segregaciones y transformaciones cristalinas en estado sólido.



Fig. 2.1. Detalle de un Refractorio de Cromita (40x).
Constituyente negro: Cromita.
Constituyente blanco: Silicato de Magnesio.
Serpentina ($3 \text{ MgO} \cdot \text{SiO}_2$).

2.1.3. Clasificación

No existe un criterio único de clasificación para los materiales refractarios. A medida que la demanda reclamaba su interés por ciertas propiedades, la industria refractaria investigaba y desarrollaba los aspectos tecnológicos que se precisaban al fin de conseguir las calidades requeridas. De esta forma podemos agrupar y clasificar al conjunto de materiales refractarios de acuerdo con diferentes criterios, tales como:

- . Según la composición química
- . De acuerdo a sus propiedades ácido-base

- . Atendiendo a las características físicas del producto acabado
- . Según la porosidad de los productos conformados
- . Atendiendo al proceso de fabricación utilizado

A) Clasificación de los materiales refractarios según su composición química

- . Refractarios de sílice (% SiO_2 entre 94 y 97%).
- . Refractarios de semi-sílice (% $\text{Al}_2\text{O}_3 < 10\%$, resto SiO_2 hasta un máximo de 94%).
- . Refractarios Silico-Aluminosos (si presentan contenidos de sílice, SiO_2 , comprendidos entre el 50 y el 78%, y de Al_2O_3 entre el 15 y el 45%).
- . Refractarios Aluminosos (si presentan contenidos en Al_2O_3 comprendidos entre el 45 y 98%, siendo el resto fundamentalmente SiO_2).
- . Refractarios de magnesita (si presentan contenidos en MgO comprendidos entre 90 y 97%).
- . Refractarios de forsterita (si presentan un contenido en MgO próximo al 40%, siendo el resto SiO_2).
- . Refractarios de dolomía (si el % $\text{CaO} + \% \text{Mg} > 80\%$).
- . Refractarios de magnesita - Cromo (si contienen entre 5 y 18% de Cr_2O_3).
- . Refractarios de Cromo - magnesita (si presentan un % Cr_2O_3 comprendidos entre 18 y 32%).

. Refractarios especiales:

- Refractarios base coque o antracita
- Refractarios base grafito (30% de grafito + arcilla)
- Refractarios carburo de silicio (% CSi > 50%)
- Refractarios base óxido de Zirconio, ZrO_2
- Refractarios base Silicato de Zirconio, $ZrSiO_4$
- Refractarios base carburos (de zirconio, ZrC ; tántalo, TaC ; boro, BC ; titanio, TiC ; etc.)
- Refractarios base nitruros (de Zirconio, ZrN ; boro, BN ; aluminio AlN ; etc.)
- Refractarios base boruros (boruro de Cromo, CrB)
- Refractarios base siliciuros (de Molibdeno, $MoSi_2$; Wolframio, $WSiO_2$, etc.)
- Cermets (compuestos metalocerámicos).

B) Clasificación de los materiales refractarios de acuerdo a sus propiedades ácido-base

- . Refractarios ácidos (refractarios de sílice, semisílice y silicoaluminosos)
- . Refractarios básicos (refractarios de magnesita, dolomía, forsterita)
- . Refractarios anfóteros (refractarios de alta alúmina)
- . Refractarios inertes (refractarios de magnesita y de cromo-magnesita)

Recordemos que según Lewis, un ácido es toda aquella sustancia aceptora de pares de electrones y una base aquel compuesto donador de pares de electrones. La reacción de neutralización sería la compartición de un par electrónico entre un ácido y una base.

C) Clasificación de los materiales refractarios atendiendo a las características físicas del producto acabado

- . Materiales moldeados: Ladrillos refractarios obtenidos a través de prensado, extrusión, vibración, aglomeración, cocción o fusión en horno eléctrico.
- . Materiales no moldeados: Son mezclas preparadas refractarias que pueden ser colocadas directamente en el estado en que son suministradas o bien después de la adición de un líquido apropiado. Dentro de este grupo nos encontraremos con: las masas para apisonar, masas plásticas, cementos refractarios, enlucidos refractarios, masas proyectables neumáticamente y granulados.

D) Clasificación de los materiales refractarios según la porosidad de los productos conformados

- . Refractarios densos: Aquellos cuya refractariedad sea igual o superior a los 1500°C y el valor de la porosidad total sea inferior al 30% en volumen.
- . Refractarios aislantes: Aquellos cuya refractariedad es igual o superior a 1500°C y su porosidad total es igual o superior al 45% en

volumen. En el apartado 2.2., del presente capítulo, se ahondará en el tema.

E) Clasificación de los materiales refractarios atendiendo al proceso de fabricación utilizado

- . Refractarios convencionales (conformado por prensado, extrusión o moldeado).
- . Refractarios especiales (materiales electrofundidos y productos obtenidos por sinterización- compactación a elevadas temperaturas).

2.1.4. Formas Polimórficas y sus transformaciones

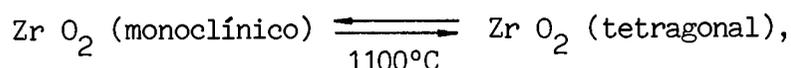
La estabilidad de una estructura cristalina para un material de composición determinada dependerá de las siguientes variables:

- a) Balance de cargas eléctricas.
- b) Densidad de empaquetamiento atómico con respecto a un determinado átomo de dimensiones conocidas, número de enlaces por átomo y de la dirección espacial de las mismas.
- c) De la optimización a valor mínimo de las fuerzas electrostáticas de carácter repulsivo.

Así como la temperatura y la presión sobre un material puede sufrir modificaciones, las distancias interatómicas y las amplitudes de las vibraciones atómicas pueden alcanzar tal magnitud que bajo estas nuevas con

diciones es posible que no sea estable la estructura que presentaba el material a temperatura ambiente. Aquellos materiales que poseen una misma composición química pero diferente estructura cristalina, son llamados polimorfos y el cambio de una estructura a otra se denomina transformación polimórfica.

Existen dentro de los materiales cerámicos numerosas formas polimórficas que en muchos casos producen una decisiva influencia acerca de los límites de aplicación del material. Por ejemplo, para el óxido de zirconio (ZrO_2) a temperatura ambiente la estructura cristalina del mismo es monoclinica, lo cual puede transformarse en tetragonal alrededor de los $1100^\circ C$. La transformación:



va acompañada por una importante variación volumétrica, originada por las tensiones internas almacenadas en el interior de la estructura del ZrO_2 -monoclínico; lo cual puede causar la rotura o un sustancial debilitamiento del material. Al objeto de solucionar este problema fue descubierto que, pequeñas adiciones de MgO , CaO ó V_2O_3 al ZrO_2 , dan lugar a una estructura cúbica que no experimenta ninguna transformación alotrópica dentro de un amplio intervalo de temperatura.

Antes de proceder a seleccionar un material para una determinada aplicación, es necesario verificar si tiene lugar alguna transformación polimórfica que pueda desaconsejar su utilización, lo cual puede ser verificado mediante la cuidadosa observación de la curva de expansión térmica del material.

Muchos de los componentes habituales de los materiales cerámicos tienen diferentes formas polimórficas. Un ejemplo de ello se materializa en los siguientes compuestos: SiO_2 , SiC , C , Si_3N_4 , BN , TiO_2 , ZnS , CaTiO_3 , Al_2SiO_5 , FeS_2 y As_3O_5 .

Podemos distinguir dos tipos de transformaciones polimórficas:

- a) Transformaciones por desplazamiento o militares,
- b) Transformaciones por reordenación o difusionales.

En el caso de las transformaciones militares, en las cuales todos los átomos del cristal se desplazan al mismo tiempo una magnitud no superior a la distancia interatómica, lo que se traduce en una alteración de toda la estructura cristalina. Puede existir como consecuencia de las mismas una variación de los ángulos de enlace, pero nunca tiene lugar la rotura de los mismos. Las transformaciones por desplazamiento tienen lugar a una temperatura definida y son de naturaleza reversible. Este tipo de transformaciones son frecuentes en los silicatos metálicos. De forma general se puede afirmar que a elevadas temperaturas la estructura de los silicatos presenta mejor simetría molecular, mayor capacidad calorífica y un volumen específico mayor, lo que implica una estructura cristalina más abierta. A bajas temperaturas son típicas las estructuras colapsadas provocadas por la rotación de la unidad tetraédrica SiO_4 .

Por el contrario, en las transformaciones por reordenación o difusionales, tiene lugar la rotura de enlaces atómicos que dan paso a la formación de nuevas estructuras. En este caso, la energía requerida para realizar este tipo de transformaciones, es mucho mayor que la precisada en las transformaciones por desplazamiento. La velocidad de restauración o

reordenación de las nuevas estructuras es lenta (mecanismo difusional de transporte de materia), lo que hace que puedan encontrarse, a temperatura ambiente de forma estable, estructuras que termodinámicamente sólo pueden presentarse a elevadas temperaturas.

La energía de activación para las transformaciones por reordenación puede ser tan elevada que el proceso difusional de reordenación sea cinéticamente imposible de verificarse en la práctica, a no ser que existan factores externos que disminuyan su valor. Por ejemplo, la presencia de una fase líquida puede permitir a la fase metaestable disolverse y precipitar seguidamente la estructura estable a la temperatura de trabajo. Igualmente la energía mecánica puede constituir otra de las alternativas para minimizar el valor de la energía de activación.

2.1.5. Mecanismos de Aglomeración

Insistiendo en los aspectos estructurales estudiados en el apartado 2.1.2., del presente capítulo, para los materiales refractarios conformados, hay que tener presente que son posibles diferentes opciones al fin de lograr la estabilidad mecánica del constituyente disperso (mayoritario) del ladrillo refractario. No obstante y dependiendo de la naturaleza físico-química de la matriz, se puede garantizar el mantenimiento de las propiedades mecánicas del producto conformado en tanto que se trabaje dentro de un intervalo adecuado de temperaturas.

Teniendo presente los tipos de aglomerantes (o de la naturaleza físico-química del constituyente matriz) utilizados al fin de lograr cohesio-

nar los granos del constituyente disperso, podemos distinguir:

A) La aglomeración hidráulica: producida por la adición de cemento (Portland, por ejemplo) a la mezcla de materias primas refractarias de diferente granulometría (granos, menudos y finos; ver Fig. 2.2.).

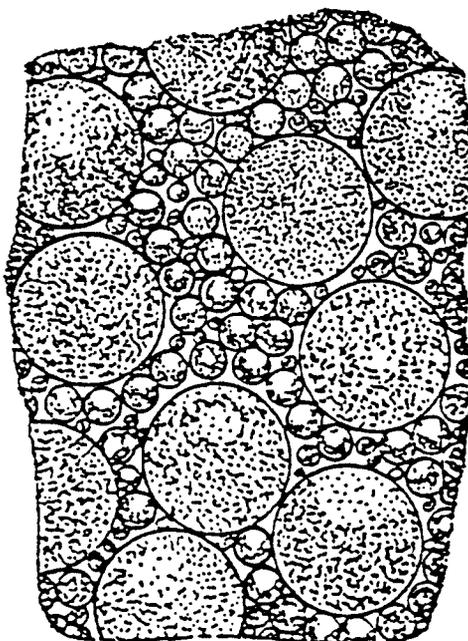


Fig. 2.2. Esquema de empaquetamiento de una mezcla de partículas.

El endurecimiento de la masa conformada comienza a temperatura ambiente debido a la precipitación de diferentes hidratos (o especies anhidras unidas por moléculas de agua H-O-H, puentes de hidrógeno). Por encima de los 500° ó 600°C, las propiedades mecánicas del ladrillo aglomerado hidráulicamente, irán decreciendo en tanto en cuanto progresa la deshidratación del aglomerante hidráulico.

B) Aglomeración Orgánica: ocasionada por la adición de determinados productos orgánicos (resinas o derivados de la celulosa) que proporcionan

un endurecimiento de la mezcla por mecanismos de polimerización a temperaturas superiores a los 50°C. Normalmente, en atmósferas oxidantes y por encima de los 300°C los aglomerantes orgánicos se pirolizan o se oxidan, no pudiendo comunicar una adecuada resistencia mecánica al material a temperaturas superiores a los 300°C.

No obstante, se puede garantizar una cierta coexistencia entre los granos de componente disperso, si procuramos adicionar ciertas cantidades de un aglomerante que sea estable dentro del intervalo de temperaturas comprendido entre 300 y 1000°C, ya que por encima de esta última comenzarán a ser notorios los mecanismos de aglomeración cerámica.

Si la velocidad de calentamiento del artículo refractario es lo suficientemente rápida, podemos lograr el solapamiento de los mecanismos de aglomeración orgánica con la cerámica, habida cuenta de que el tiempo necesario para la descomposición del componente orgánico fuera superior al tiempo que tarda el artículo refractario en alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C.

C) Aglomeración Química: la adición de ciertos productos inorgánicos tales como: Silicato de Sodio, Fosfato de mono-aluminio, ácido fosfórico, sulfato de magnesio, cloruro de magnesio y ácido sulfúrico, procuran la resistencia mecánica del material para las temperaturas comprendidas entre los 250 y 1250°C. Es decir, que la aglomeración química proporciona un puente de unión entre los mecanismos de aglomeración orgánica y cerámica.

D) Aglomeración Cerámica: la presencia en las materias primas de ciertos óxidos metálicos (CaO , SiO_2 , MgO , FeO , Al_2O_3) puede procurar la formación de silicatos y óxidos complejos (constituyente matriz) con un punto de ablandamiento tal, que a la temperatura máxima de cocción del la drillo refractario, pueda efectuarse la aglomeración del constituyente disperso (aglomeración o sinterización cerámica en fase líquida).

No obstante, la aglomeración cerámica de un material refractario pue de acontecer mediante un mecanismo diferente al de la formación de una fa se líquida, es decir, que podemos encontrarnos con los diferentes tipos de sinterización:

- a) Sinterización en fase vapor (poco importante en materiales con al to punto de fusión).
- b) Sinterización en estado sólido.
- c) Sinterización a través de una fase líquida estacionaria que actúa de medio de transporte.
- d) Sinterización a través de una fase líquida reactiva.

El endurecimiento del material suele iniciarse a temperaturas superiores a los 1000°C , si bien ésta es función del mecanismo operante duran te la aglomeración o sinterización cerámica.

Actualmente se están fabricando ladrillos refractarios en los cuales se intenta unir mediante reacción química en estado sólido (sinterización en estado sólido), el constituyente disperso y el matriz (direct bond).

2.2. Materiales Refractarios Aislantes

2.2.1. Definición

La norma ITINTEC 331.001-84, los define como un material refractario liviano, caracterizado por su baja conductividad térmica, baja capacidad calorífica y alta porosidad.

La norma Española UNE 61-007-75, los define como un material refractario cuya porosidad total es igual o superior al 45% en volumen.

2.2.2. Clasificación

Su clasificación puede hacerse de acuerdo a diferentes criterios dados para los materiales refractarios en el apartado 2.1.3., tales como:

- . Según su composición química.
- . De acuerdo a sus propiedades ácido-base.
- . De acuerdo a las características físicas del producto acabado.

Puesto que existe una estrecha relación entre la conductividad térmica, la porosidad total y la densidad aparente y siendo esta última la más sencilla de determinar, se le considera como uno de los criterios de división.

La Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM), los clasifica en cinco grupos, según la densidad global y el comportamiento probable en servicio. La Tabla 2.1., se ha tomado de la designación C 155-47

de la ASTM, "Clasificación normal de ladrillos refractarios aislantes".

Las temperaturas indicadas como límites de grupo, no son las temperaturas límites de empleo puesto que el comportamiento de los productos en servicio, dependen no solamente de la temperatura, sino también de las condiciones de utilización, ya que el material puede utilizarse como cara de trabajo o como aislamiento posterior. Así por ejemplo, el límite de temperatura de un ladrillo del grupo 16 es de unos 870°C; del grupo 20, 1093°C, etc.

Tabla 2.1.

Clasificación de ladrillos refractarios aislantes

<u>Identificación Grupo</u>	<u>Variación, por recalenta miento, no mayor de 2% cuando se prueba a :</u>	<u>Densidad global (g /cm³) No mayor de :</u>
16	1550°F (843°C)	0.545
20	1950°F (1066°C)	0.641
23	2250°F (1232°C)	0.769
26	2550°F (1399°C)	0.833
28	2750°F (1510°C)	0.961

2.2.3. Propiedades

Genéricamente, se puede decir que un ladrillo refractario aislante debe tener una resistencia mecánica considerable y además tiene que resistir la temperatura a la que estará expuesto. La baja conductividad y densidad global tienen que sacrificarse en cierto grado para conseguir las

propiedades necesarias de resistencia mecánica y de resistencia a la temperatura.

Los ladrillos refractarios comunes tienen una porosidad que varía desde 15 a 25%, lo que determina en buena medida la conductividad térmica. Al aumentar la porosidad total hasta el 50 - 60%, resulta posible reducir la a un décimo del valor original, lo cual se puede apreciar en la figura 2.3. Desgraciadamente este cambio está acompañado por una marcada caída del poder refractario.

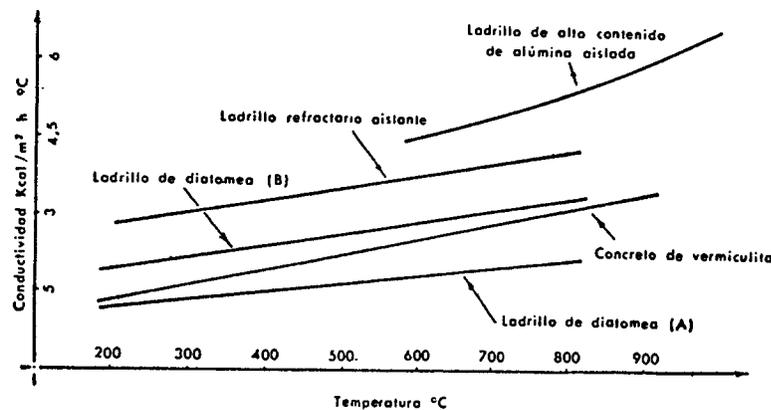


Fig. 2.3. Conductividad de los materiales aislantes (Altas temperaturas).

Estos ladrillos son apropiados para su exposición directa a la llama cuando las condiciones no favorecen la abrasión o la formación de escorias.

2.3. Aislamiento Térmico

2.3.1. Fines

El aislamiento térmico sirve cinco fines principales: aumentar la comodidad en las viviendas; conservar el calor o alguna otra forma de energía; facilitar el control de la temperatura en un proceso químico; reducir la temperatura del casco de un recipiente sometido a presión, y controlar la temperatura exterior del espacio aislado, con el fin de evitar peligros al personal, proteger los miembros estructurales próximos contra las temperatura elevadas, reducir la temperatura en los lugares de trabajo y, en el caso de maquinaria que funciona por debajo de la temperatura ambiente, impedir que sude la superficie más caliente o que se cubra de escarcha. Según la aplicación de que se trate, uno u otro de esos fines pueden decidir la elección del aislamiento; de ordinario, dos o más tienen importancia concurrente.

2.3.2. Propiedades Físicas

La baja conductividad térmica es la propiedad que distingue a los aislamientos térmicos. Otras propiedades de importancia, según el uso a que se destinen, son la resistencia mecánica, la dureza, densidad, compresibilidad, el calor específico, la resistencia a temperaturas altas o bajas, el coeficiente de dilatación térmica, etc. La elección final de un material aislante para una aplicación dada, implica por lo general, una transacción entre propiedades deseadas.

2.3.3. Propiedades Químicas

Las propiedades químicas de los aislamientos térmicos dependen mucho de su aplicación especial y es poco lo que puede decirse de ellos con carácter general. En las fábricas de productos químicos, los aislantes deben ser inertes a los vapores y líquidos con los cuales pueden ponerse en contacto. En algunos procesos químicos es necesario poner el aislamiento en el interior de recipientes a presión para mantener la temperatura de las paredes del recipiente por debajo del punto peligroso. En esas aplicaciones, de las cuales es un ejemplo la hidrogenación catalítica, es necesario que el aislamiento térmico no contamine el producto y no ejerza ninguna acción catalítica que pueda producir reacciones indeseables.

Es necesario protegerse contra el posible efecto corrosivo de un aislante sobre los materiales estructurales, en especial en los casos en que hay humedad. El análisis químico de los aislantes tiene importancia para el que los fabrica; pero para el que los usa, el resultado en una aplicación particular con los materiales con los que puede ponerse en contacto el aislante, tiene más importancia que el análisis químico.

2.3.4. Materiales Aislantes

Es imposible separar los materiales aislantes térmicos en clases bien definidas porque éstos se usan a temperaturas comprendidas entre -185°C , o más bajas, y 1625°C , por lo que aquí se dará una relación genérica de estos materiales.

Entre los muchos materiales usados como aislantes, están el corcho y los productos derivados de él, la lana mineral en sus diversas formas, la vermiculita dilatada o convertida en planchas, los plásticos esponjosos, diversos tipos de papeles orgánicos (ordinario, rizado o corrugado), el papel de aluminio, la magnesia de 85%, la perlita dilatada, el vidrio celular, los productos de diatomita y los productos porosos de arcilla para altas temperaturas. Los materiales orgánicos se usan menos que los inorgánicos por su inflamabilidad y su susceptibilidad al deterioro por el agua y los mohos.

La figura 2.4., nos muestra la variación de la conductividad térmica de algunos materiales aislantes, a bajas temperaturas.

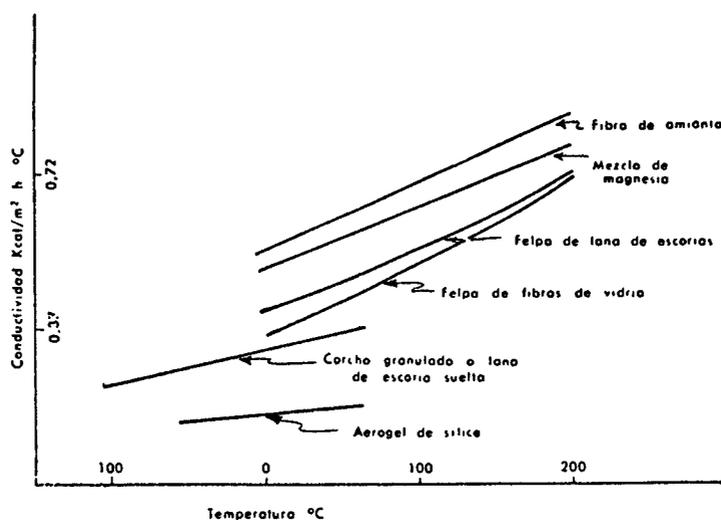


Fig. 2.4. Conductividad térmica de materiales aislantes (Bajas temperaturas).

CAPITULO III

ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS,

REFRACTARIOS AISLANTES Y AISLANTES TERMICOS

En el presente capítulo se estudian las características de los materiales que se encuentran dentro del grupo de los refractarios, refractarios aislantes y aislantes térmicos no metálicos, referido en forma genérica a los materiales refractarios; que son los que requieren una caracterización más rigurosa debido a que soportan las condiciones más exigentes durante el servicio.

3.1. Introducción

Dentro de las características de los materiales refractarios encontramos las propiedades fundamentales y propiedades simuladas.

Decimos que verificamos una propiedad fundamental dentro de un artículo refractario, cuando determinamos alguna propiedad físico-química del mismo (composición química y mineralógica, densidad, calor específico, etc.).

Cuando paralelamente hablamos de propiedades simuladas, decimos que estamos estudiando alguna propiedad que tiende a reflejar parcialmente alguna o varias de las variables que van a actuar sobre el material refractario en servicio.

Dentro de las propiedades fundamentales estudiaremos:

- . Propiedades estructurales: composición química, composición mineralógica, densidad, porosidad y permeabilidad al aire.
- . Propiedades térmicas: dilatación lineal reversible y permanente, calor específico y conductividad térmica.

Dentro de las propiedades simuladas estudiaremos:

- . La refractoriedad y refractariedad bajo carga.
- . La resistencia: a la compresión en frío, flexión, al choque térmico, al ataque por escorias y a la abrasión.

3.2. Propiedades Fundamentales Estructurales

3.2.1. Composición Química

Aunque los métodos y las técnicas de este ensayo entran de lleno en el campo de la química analítica, queremos hacer notar a la vista de un resultado analítico habitual para un material refractario sílico-aluminoso:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 33\%$$

$$\text{SiO}_2 = 62\%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2.5\%$$

$$\text{CaO} + \text{MgO} = 1.0\%$$

$$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.5\%$$

que el análisis químico elemental no proporciona ningún tipo de informa-

ción acerca de las especies mineralógicas presentes en el material analizado. Desconocemos, por ejemplo, qué parte de este 62% de sílice se encuentra libre, ni cuál estará combinada con la alúmina en forma de silicatos.

No obstante, el análisis elemental de la muestra nos proporciona las cantidades máximas tolerables (en nuestro caso de óxidos de hierro, alcalinos y alcalino térreos) admitidos por el constituyentes matriz en orden a no alterar seriamente la refractariedad del material.

3.2.2. Composición Mineralógica

Mediante técnicas instrumentales de la difracción de rayos - X (DR-X) y modernamente a través de análisis cuantificativo por microsonda (SEM-EDAX), podemos responder a las interrogantes planteadas a la vista de los resultados del análisis químico elemental del artículo refractario:

- . ¿Qué proporción de SiO_2 se encuentra libre?
- . ¿Bajo qué forma cristalina (cuarzo, cristobalita, tridimita) se encuentra el SiO_2 libre?
- . ¿Qué parte del SiO_2 se encuentra en la materia amorfa intergranular? (constituyente matriz).

3.2.3. Densidad

El volumen total o global (V_T) de un material refractario consta de los siguientes sumandos:

$$V_T = V_m + V_{pc} + V_{pa} \quad (3.1)$$

donde, V_m es el volumen asociado a la masa del refractario (o volumen másico), V_{pc} es el volumen asociado a los poros cerrados (no comunicados con el exterior) y V_{pa} es el volumen asociado a los poros abiertos (accesibles desde el exterior).

Por lo tanto y habida cuenta de la propia definición de densidad (masa por unidad de volumen), podemos definir:

1.- La densidad real : $D_r = \frac{M}{V_m}$ (3.2)

2.- La densidad aparente : $D_a = \frac{M}{V_m + V_{pc}}$ (3.3)

3.- La densidad global (*)

(Bulk density) : $D_g = \frac{M}{V_T}$ (3.4)

La densidad real de la muestra refractaria se puede determinar según la norma ITINTEC 331.026-79 o bien utilizando un procedimiento más rápido, generalmente aceptado para análisis de rutina, tal como es el del matraz volumétrico de REES-HUGILL. Según este último procedimiento, una muestra de material refractario finamente dividida ($\bar{D}_p < 100 \mu\text{m}$) es introducida

(*) Según la norma ITINTEC 331.020-78 (UNE 61-034-75), la densidad aparente allí definida se identifica en el presente trabajo con la densidad global, D_g .

dentro del matraz midiéndose el volumen de líquido desplazado por la adición de la muestra.

El valor de la densidad real, D_r , es un parámetro de gran importancia para muchos materiales refractarios al indicar su grado de transformación (sílice, silimanita, andalucita, etc.) o bien por dar una idea sobre el contenido de alúmina e indirectamente con el objeto de calcular la porosidad total del ladrillo refractario.

La densidad aparente, D_a , y la densidad global, D_g , de un producto refractario conformado, se pueden determinar a partir del peso de la probeta refractaria (Norma ITINTEC 331.020-77).

El dato de la densidad global, D_g , de un material refractario conformado, es un valor sistemáticamente determinado en cualquier tipo de material, ya que de él depende gran parte de las propiedades mecánicas del material, su resistencia al choque térmico y su resistencia al ataque por escorias.

Igualmente, el valor de D_g , intervendrá en las expresiones analíticas utilizadas para el cálculo de la porosidad abierta, P_a , y la porosidad total, P_T , de los materiales refractarios (Ecs. 3.5 y 3.7). En la Tabla 3.1., se muestran los valores de la densidad global de diversos materiales refractarios.

Tabla 3.1.

Densidad Global de ladrillos refractarios

<u>Material Refractario</u>	<u>D_g (g/cm³)</u>
Sílice	1.75 - 1.95
Silico-Aluminoso (32% Al ₂ O ₃)	1.80 - 2.00
Aluminosos (58% Al ₂ O ₃)	2.4
Corindón (85% Al ₂ O ₃)	2.8
Magnesita	2.60 - 3.00
Dolomita	2.70 - 2.90
Grafito	1.90 - 2.30
Carburo de silicio	2.10 - 2.70
Refractarios aislantes	0.70 - 1.30
Carbón	1.30 - 1.60
Arcilla refractaria	1.90 - 2.36
Cromita	2.90 - 3.20
Circón	2.36 - 2.68

3.2.4. Porosidad

Dentro de los materiales refractarios conformados se define la porosidad abierta, P_a , como la relación existente entre el volumen de poros comunicados al exterior y su volumen total, V_T , expresado en tanto por ciento de este último (Norma ITINTEC 331.020-77). Igualmente se define la porosidad total, P_T , como la relación existente entre la suma de volúmenes de poros abiertos y cerrados a su volumen total, V_T , así como la po

rosidad cerrada, P_c , como la relación entre:

$$\frac{V_{pc}}{V_T} 100, \text{ es decir:}$$

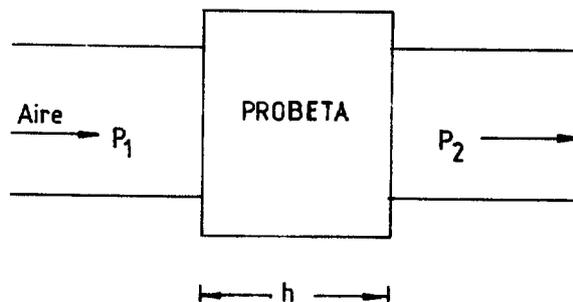
$$\% P_a = \frac{V_{pa}}{V_T} \times 100 = \left(1 - \frac{D_g}{D_a}\right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\% P_c = \frac{V_{pc}}{V_T} \times 100 = D_g \left(\frac{1}{D_a} - \frac{1}{D_r}\right) \times 100 = P_T - P_a \quad (3.6)$$

$$\% P_T = \frac{(V_{pc} + V_{pa})}{V_T} \times 100 = \left(1 - \frac{D_g}{D_r}\right) 100 \quad (3.7)$$

3.2.5. Permeabilidad al Aire

El objeto del ensayo de permeabilidad (propiedad relacionada con la porosidad abierta), es el medir la cantidad de flujo de gas que puede atravesar un material refractario conformado bajo el efecto de una diferencia de presión (Norma Española UNE 61.036-75) utilizando como unidad de medida el Perm (L^2T^{-2} , L = Longitud y T = tiempo).



Un cuerpo poroso se dice que tiene una permeabilidad de un Perm (P_m) cuando un centímetro cúbico de gas, con la viscosidad dinámica de un Poise ($g/cm \cdot sg$), a una diferencia de presión de una dina por centímetro cua

drado, pasa en un segundo por una sección de un centímetro cuadrado una longitud en dirección perpendicular de un centímetro. La permeabilidad, P, de un material refractario puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$P = \frac{V h \mu}{981 \cdot P \cdot t \cdot S} \quad (3.8)$$

donde:

V, es el volumen de aire en centímetros cúbicos

h, es la longitud de la probeta en centímetros

μ , es la viscosidad del aire en poises

P, es la diferencia de presión en centímetros de columna de agua

$$P = (P_1 - P_2)$$

t, es el tiempo en segundos

S, es la posición de la probeta en centímetros cuadrados

P, es la permeabilidad del material en Perms.

La permeabilidad de un producto refractario es una propiedad relacionada con el tamaño y la cantidad de poros del material. Podemos encontrar materiales refractarios con elevada porosidad pero con escasa permeabilidad y productos de alta permeabilidad y baja porosidad. La permeabilidad de un material refractario no es una propiedad isótropa, ya que depende de la dirección para la cual realizamos la medida (se tendrá que hacer constar en el correspondiente ensayo qué dirección, con respecto a la de prensado del material, ha sido escogida).

3.3. Propiedades Fundamentales Térmicas

3.3.1. Dilatación lineal reversible y permanente

Los cambios lineales reversibles producidos durante el calentamiento de los materiales refractarios se deben fundamentalmente a dos causas:

- 1.- A la agitación térmica de los átomos situados en los nudos de la red cristalina.
- 2.- A las transformaciones que, producto de la agitación térmica, se producen de forma reversible dentro de las estructuras cristalinas dando lugar a diferentes variedades alotrópicas dentro de una misma fase cristalina.

El coeficiente de dilatación lineal, α , es la variación que experimenta la longitud de una probeta refractaria (l) con respecto a sus condiciones iniciales (l_0) en cuanto se aumenta un grado centígrado la temperatura de su entorno:

$$\Delta l = l_0 \alpha (T - T_0)$$

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{1}{(T - T_0)} \quad (^\circ\text{C}^{-1}) \quad (3.9)$$

T_0 = temperatura ambiente.

o también el coeficiente de dilatación, α , puede expresarse en función del % dilatación = $\frac{\Delta l}{l_0} \times 100$, por lo cual $\alpha = \frac{\% \text{ dilatación}}{100 \Delta T}$

Para los componentes puros (óxidos refractarios puros) el coeficiente de dilatación lineal es una función de la dirección ensayada, valencia,

número de coordinación y temperatura de la muestra, es decir:

$$\alpha = f(\text{dirección, valencia, N}^\circ \text{ de coordinación, temperatura}).$$

3.3.1.1. Dependencia direccional del Coeficiente de Dilatación

El carácter direccional de ciertas propiedades físicas (dentro de los compuestos puros) son debidas a una irregular distribución espacial de sus átomos (anisotropía). No obstante, existen ordenamientos atómicos regulares en el espacio dando lugar a sustancias de naturaleza isótropa tales como son aquellos que cristalizan en el sistema cúbico.

Dentro de los materiales refractarios anisótropos podemos citar el cuarzo (ver Fig. 3.1.) y el grafito. Igualmente como materiales refractarios isótropos podemos citar el óxido de magnesio y el óxido de calcio.

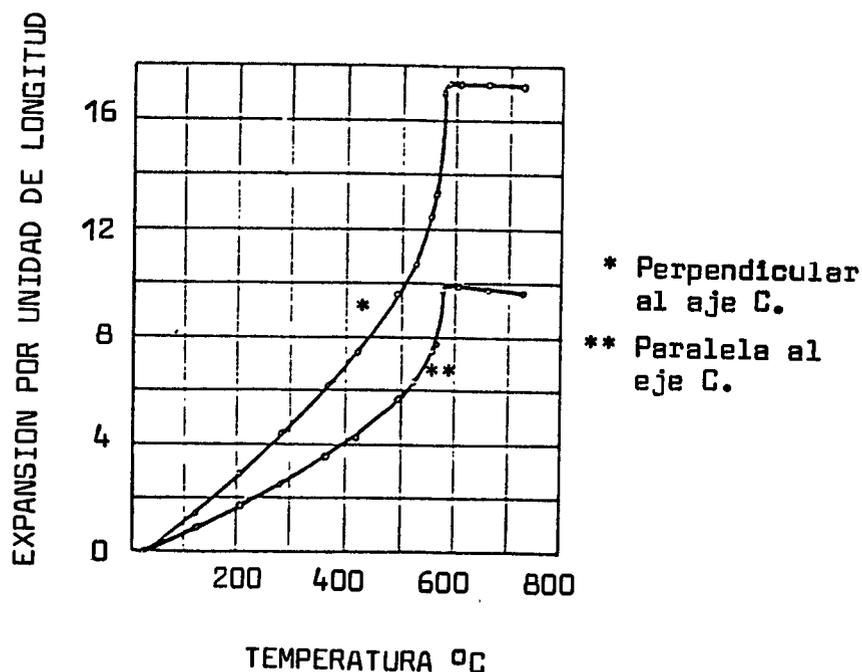


Fig. 3.1. Expansión térmica del cuarzo en dirección paralela y perpendicular a su eje cristalográfico C.

$$\left(\frac{l - l_0}{l_0} \times 10^3 = \alpha \Delta T \times 10^3 \right).$$

3.3.1.2. Dependencia del Coeficiente de Dilatación con la valencia del compuesto

El coeficiente de dilatación para componentes puros a igualdad de número de coordinación (número de vecinos próximos), es inversamente proporcional al cuadrado de la valencia del componente determinado.

<u>Compuesto</u>	<u>(°C⁻¹)</u>	<u>N° de Coordinación</u>	<u>Valencia</u>
NaCl	40×10^{-6}	6	1
MgO	10×10^{-6}	6	2

3.3.1.3. Dependencia del Coeficiente de Dilatación con el número de Coordinación

Para compuestos puros el coeficiente de dilatación lineal, tratándose de componentes de igual valencia, es directamente proporcional al número de coordinación.

<u>Compuesto</u>	<u>(°C⁻¹)</u>	<u>N° de Coordinación</u>	<u>Valencia</u>
CsCl	53×10^{-6}	8	1
NaCl	40×10^{-6}	6	1

3.3.1.4. Dilatación Térmica lineal de los materiales refractarios

El valor del coeficiente de dilatación térmica lineal, α , para los materiales refractarios (dilatación lineal reversible) es una función de

las características del proceso de fabricación, f , de la dirección ensaya da dentro del material moldeado, d , de la valencia, v , y del número de coordinación, n , de las materias primas que participan en su elaboración y de la temperatura, T . Es decir:

$$(\text{lineal-reversible}) = \psi (f, d, v, n, T) \quad (3.10)$$

En la figura 3.2., se representa la dilatación térmica lineal expresada en tanto por ciento de las familias refractarias más importantes, es decir el valor $\frac{\Delta l}{l_0} \times 100 = \alpha (T - T_0) 100$ (α = coeficiente de dilatación lineal).

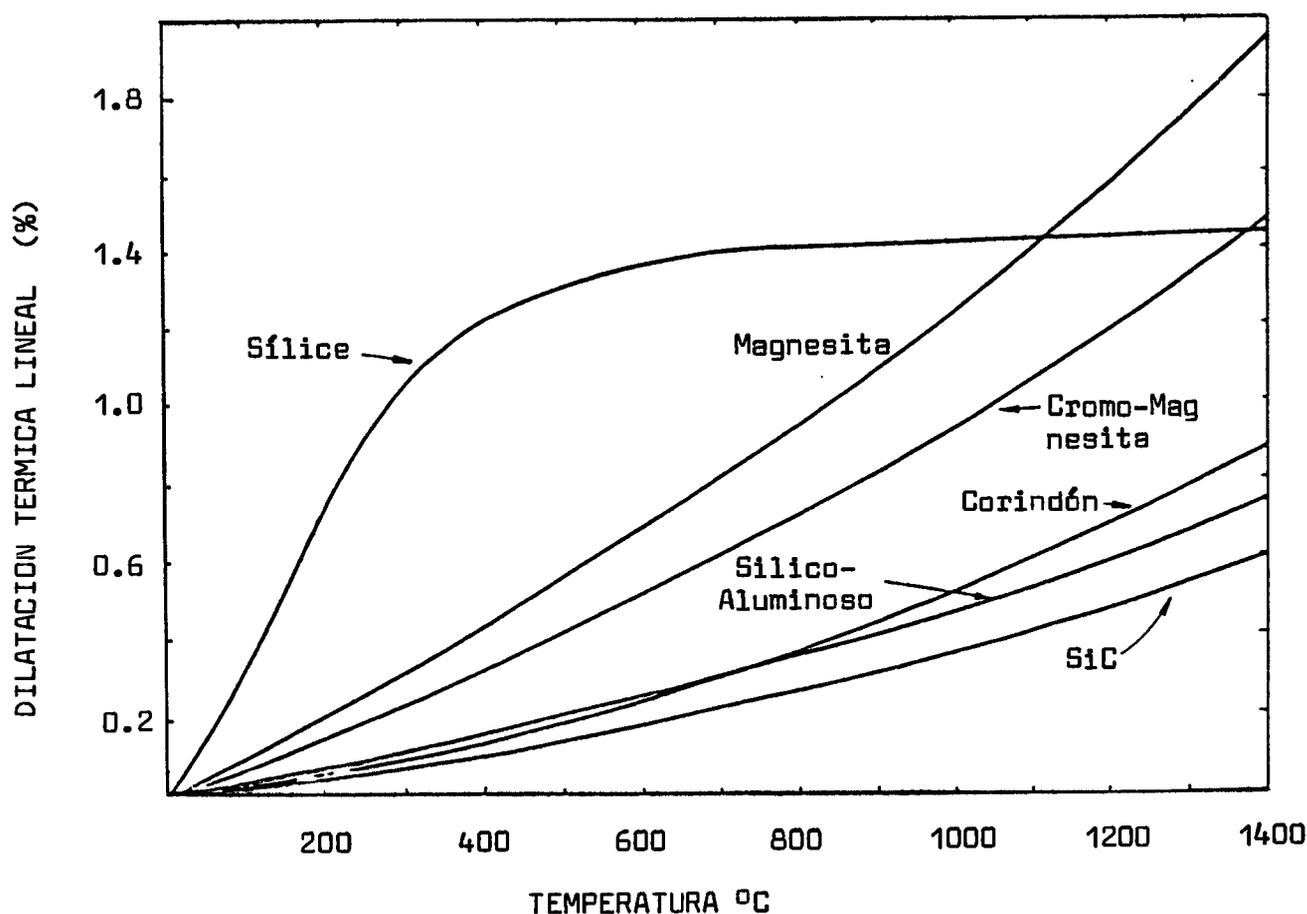


Fig. 3.2. Expansión térmica lineal para algunos materiales refractarios en función de la temperatura.

Según la figura 3.2., la sílice y la magnesita son los materiales refractarios que mayor expansión térmica presentan. La curva típica en S de los materiales de sílice, refleja las transformaciones existentes entre las variedades de las formas alotrópicas de la sílice (cuarzo, cristobalita y tridemita) a temperaturas inferiores a los 700°C.

El conocimiento de los valores de la expansión térmica de un material refractario es importante:

- 1.- En el diseño de hornos al fin de prever las juntas de dilatación adecuadas.
- 2.- Por su influencia en la resistencia al choque térmico del material (a mayor valor de la expansión térmica, $\frac{\Delta l}{l_0} \times 100$, menor resistencia al choque térmico dentro del intervalo de temperatura deseado).

La dilatación o expansión lineal irreversible (o permanente) tiene su origen en que algunas de las reacciones que se produjeron durante la sinterización cerámica del material, no se pudieron concluir definitivamente. Resulta evidente que, un ladrillo que no ha cocido adecuadamente, podrá presentar un grado de expansión lineal irreversible más elevado que otro de la misma calidad que ha experimentado un proceso de aglomeración cerámico completo. La expansión lineal irreversible es detectada sobre una probeta de material refractario (generalmente cilíndrica) como la diferencia entre las longitudes inicial y final expresada en porcentaje de la longitud inicial $\left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\right)$ después de que fuera sometida a una temperatura de 1400°C durante un tiempo que dependerá de la calidad dispuesta en cada caso (Norma ITINTEC 331.024-80).

En general, todos los productos refractarios experimentan una variación de dimensiones al recocerlos durante un tiempo determinado a temperaturas iguales o superiores a las que estuvieron sometidos en su fabricación. Su causa es muy diversa: transformaciones irreversibles, procesos de difusión, formación de nuevos compuestos, estados diferentes de oxidación, etc.

3.3.2. Calor Específico

El calor específico, C_e , de un compuesto puro se define como la cantidad de calor que hay que comunicar a la unidad de masa al fin de elevar un grado centígrado su temperatura.

$$C_e = \text{calorías}/(\text{unidad de masa}) \cdot ^\circ\text{C}$$

De manera semejante a "la regla de DULONG y PETIT" para los metales:

$$P_A C_e = 6.1 \pm 0.3 \frac{\text{Cal}}{\text{atm. g. } ^\circ\text{C}}$$

donde P_A es el peso atómico del metal.

Para un óxido refractario de estequiometría $\text{Me}_y \text{O}_x$:

$$\frac{P_M}{x + y} C_e = 6.1 \pm 0.3 \frac{\text{Cal}}{\text{mol. g. } ^\circ\text{C}} \quad (3.11)$$

Siendo, P_M , el peso molecular del óxido considerado. Tratándose de los óxidos refractarios: MgO , SiO_2 y Al_2O_3 , tenemos:

<u>Compuesto</u>	<u>P_M</u>	<u>P_M/(x + y)</u>
Al ₂ O ₃	102	20
MgO	40	20
SiO ₂	60	20

Por lo cual, los calores específicos, C_e , de estos tres óxidos deberán ser muy semejantes e iguales, según la expresión (3.11), a 0.31 Cal/g. °C. Los valores del calor específico medio, \bar{C}_e^T , para los refractarios de sílice, alta alúmina y magnesita son:

Sílice	(25 - 1100°C)	$\bar{C}_e \approx 0.28$ Cal/g. °C
Alta Alúmina	(25 - 1100°C)	$\bar{C}_e \approx 0.26$ Cal/g. °C
Magnesita	(25 - 1100°C)	$\bar{C}_e \approx 0.33$ Cal/g. °C

Si bien son ligeramente diferentes, coinciden básicamente con los calculados según la Ec. (3.11).

3.3.3. Conductividad Térmica

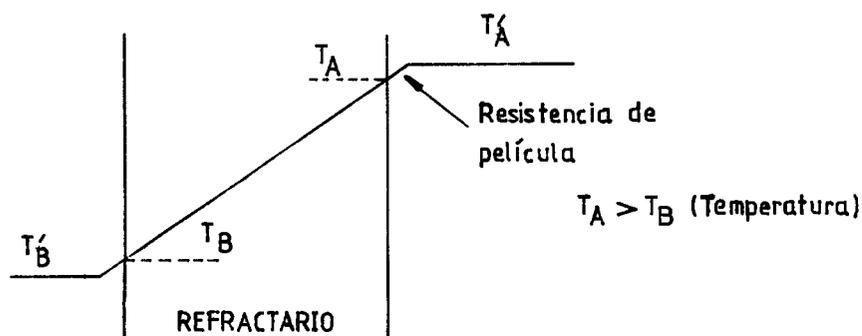
La transmisión de calor, flujo de calor, \dot{q} (cantidad de calor que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo) a lo largo de un material refractario, puede realizarse atendiendo a los siguientes mecanismos:

. Conducción : $\dot{q} = K \frac{d_t}{d_x}$ (1a. ley de FOURIER)

. Convección : (Porosidad del medio) $\dot{q} = h (T_A - T_B)$

$$\text{Radiación : } \dot{q} = \epsilon \sigma T_A^4 - \epsilon \sigma T_B^4 = \epsilon \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

(Ley de Stefan - Boltzmann)



donde:

K , es el coeficiente de conductividad térmica por conducción (mecanismo de conducción del calor que precisa de un soporte material para su propagación) y que en el SI tiene unidades de $\text{KCal/m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$.

h , es el coeficiente de conductividad térmica por convección (mecanismo de transmisión de calor que lleva asociado un transporte de materia), en $\text{KCal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$.

σ , es la constante de la ley de Stefan - Boltzmann ($4.878 \times 10^{-8} \text{KCal/hr}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{K}^4$).

ϵ , es el coeficiente de emisión del refractario ($\epsilon = 1$ para el cuerpo negro).

Dentro de los materiales refractarios el mecanismo habitual para el transporte del calor es la conducción, por lo cual se suele efectuar la medición experimental de la constante, K , de la 1a. ley de Fourier a través de los siguientes métodos generales de valoración:

- a) Métodos estáticos: (en estado estacionario) basado en la 1a. ley de Fourier (tiempos largos de medición para valores bajos de K).

b) Métodos dinámicos: (en estado no estacionario) teniendo presente la 2a. ley de Fourier:

$$\frac{d_T}{d_t} = \alpha \cdot \frac{d^2T}{dx^2}$$

donde:

$$\alpha = \text{difusividad térmica} = \frac{K}{C_e D_r} \cdot \left(\frac{m^2}{hr}\right)$$

Por otra parte, el valor de, K, es una función de la naturaleza del material y de la temperatura, $K = f(\text{refractario}, T)$. De esta manera en la figura 3.3., se presentan los valores de la conductividad térmica, K, para diferentes calidades de refractarios en función de la temperatura.

Para un mismo material refractario, la conductividad térmica del mismo es una función de la temperatura y de la porosidad total del ladrillo refractario, $K = f(P_T, T)$. En la figura 3.4., se representa la conductividad térmica de los ladrillos base diásporo, base sílice en función de la porosidad total del producto y de la temperatura media del mismo.

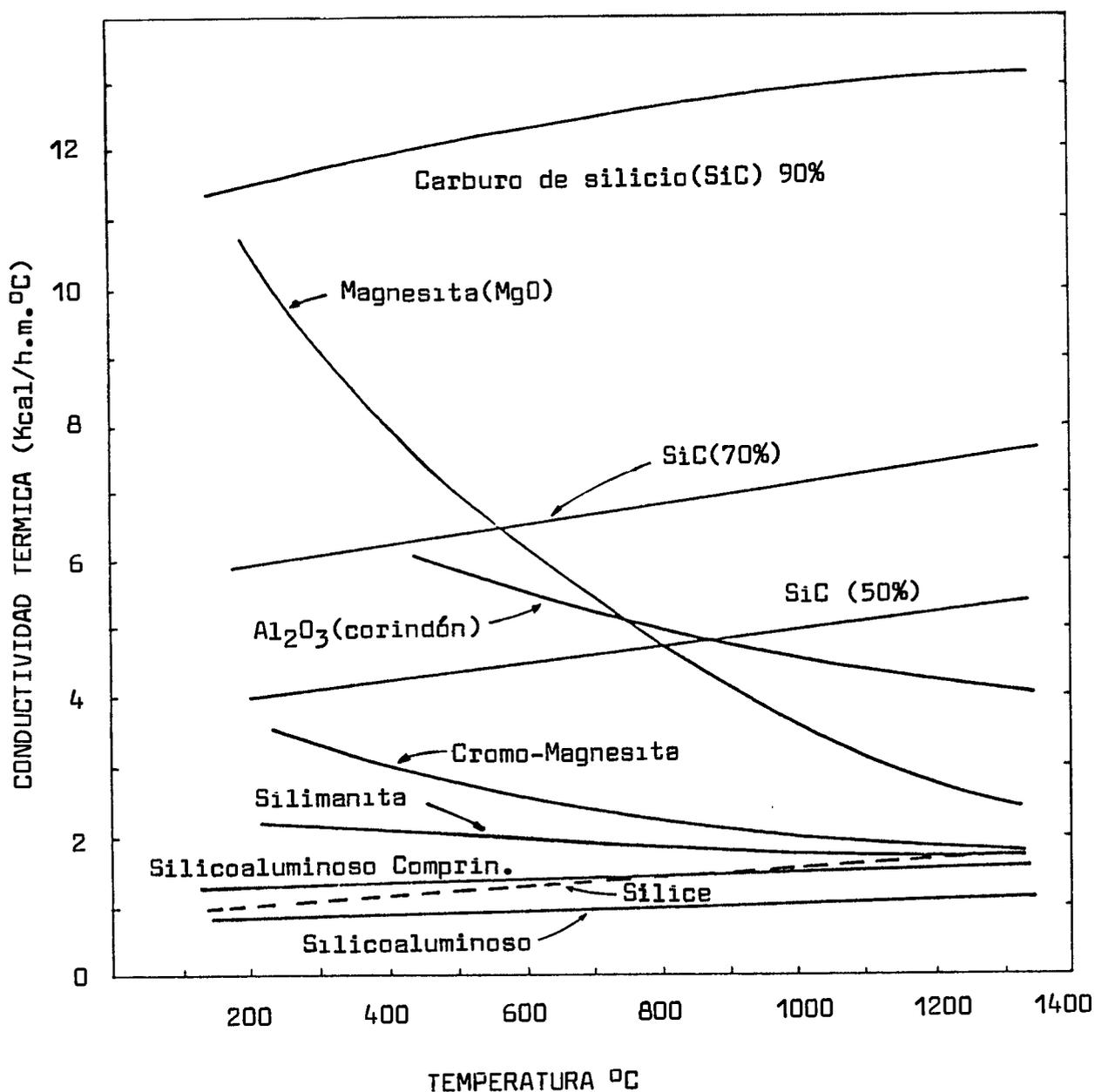
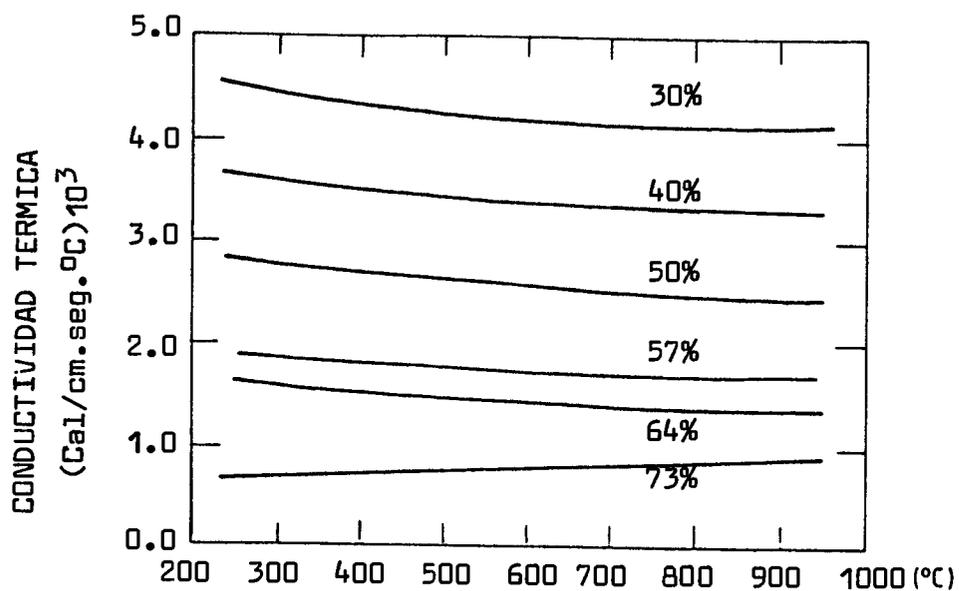
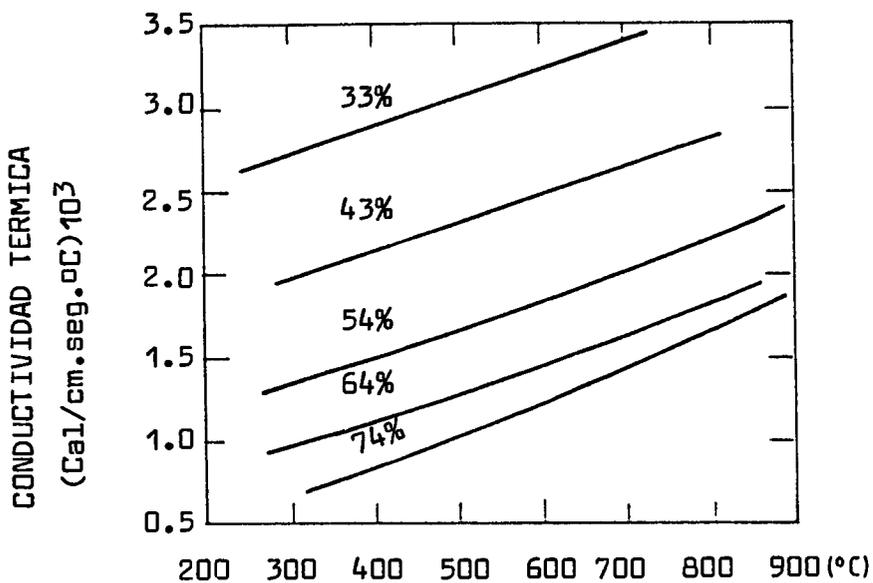


Fig. 3.3. Conductividad térmica de diferentes materiales refractarios en función de la temperatura.



Temperatura media de la muestra
(ladrillos de diásporo)



Temperatura media de la muestra
(ladrillos de sílice)

Fig. 3.4. Conductividad térmica de los ladrillos refractarios en función de la temperatura y de la porosidad total.

3.4. Propiedades que simulan las condiciones de operación del refractario

3.4.1. Refractariedad

Para un compuesto puro el punto de fusión es la temperatura a la cual se verifica el cambio de fase o la transformación del estado sólido al líquido de un determinado constituyente (sólido \rightleftharpoons líquido). La temperatura durante el cambio de estado no varía ($F + L = C + 2$, $L = C$ en tanto en cuanto $F = 2$, sólido + líquido).

Para un material refractario no cabe hablar de punto de fusión, sino más bien del intervalo de fusión o ablandamiento. En este caso el punto de reblandecimiento es la temperatura para la cual una muestra particular, bajo una tensión definida adquiere tal proporción de líquido que puede fluir a una determinada velocidad. La definición del punto de reblandecimiento puede precisarse a través de la figura 3.5. El punto de la curva para el cual la pendiente alcance el valor de: 0.01 mm/seg, será el correspondiente a la temperatura de reblandecimiento del material.

Calentamiento uniforme, a velocidad constante

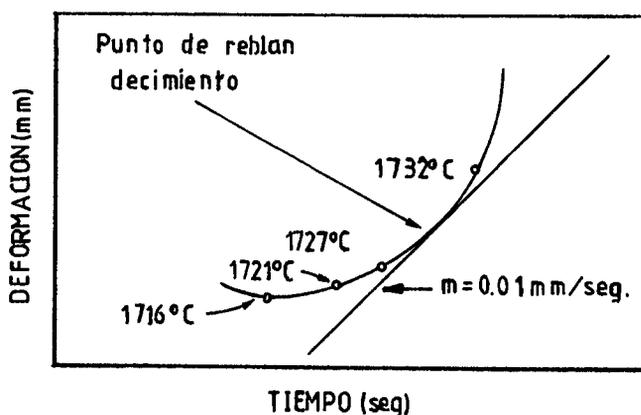


Fig. 3.5. Método gráfico para la determinación del punto de reblandecimiento (temperatura de reblandecimiento).

Un método común para determinar la temperatura de reblandecimiento de un material, es el de comparar las características de pandeo de la muestra con una serie de conos pirométricos estándar (Norma ITINTEC 331.009-78).

Mientras que en América utilizan la serie estándar de conos Orton, en Europa se utiliza los conos Seger. El material a ensayar (cortado o moldeado en forma de cono o de pirámide rectangular, Norma ITINTEC 331.009-78), se dispone sobre un ladrillo refractario de alta alúmina y se fija al mismo mediante un cemento aluminoso. Conjuntamente se disponen sobre la base refractaria de alta alúmina, una serie de conos entre los cuales se sospecha que pudiera encontrarse el material ensayado.

Al ser sometido a un calentamiento con velocidad controlada, se observa que conforme aumenta la temperatura alguno de los conos comienza a reblandecer, doblando su vértice hasta llegar a tocar la base aluminosa; transformándose posteriormente en una masa viscosa informe (aumento de la proporción de la fase líquida, ver figura 3.6-a).

En el momento que el cono a ensayar se ha doblado hasta hacer tocar su vértice con la base, puede decirse que la experiencia ha finalizado y la temperatura a la cual tiene lugar, sería una medida de la refractariedad del material. No obstante, la temperatura de reblandecimiento puede deducirse a partir del diferente comportamiento de los conos pirométricos de referencia, introducidos conjuntamente con las muestras dentro del horno.

La temperatura de reblandecimiento, determinada a partir de los conos pirométricos, es una función de la forma y tamaño del cono, de la velocidad de calentamiento y de la atmósfera del horno. Los conos de ensayo que se encuentren sometidos a una atmósfera reductora, raras veces se doblan de un modo suave (el punto de reblandecimiento de alúminas de alta calidad está poco influenciado por las características de la atmósfera del horno; sin embargo, la presencia de óxido de hierro provoca un marcado efecto sobre el ablandamiento del cono). Debe tomarse, únicamente, como temperatura de reblandecimiento el momento en que el cono cae gradualmente hasta que la punta toque su base, tal y como ocurre en la situación de la figura 3.6-a.

Cuando un cono inclina su base (Fig. 3.6-b), es probable que exista una interacción entre el cono y la placa que lo sustenta. Algunos materiales no adoptarán posiciones definidas durante el ensayo, sino que se derrumbarán o hincharán (Fig. 3.6-c y d).

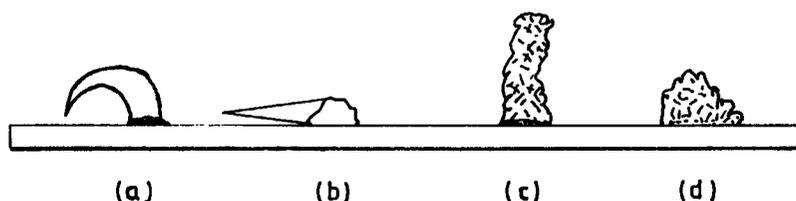


Fig. 3.6. Diferente comportamiento de los conos refractarios durante el calentamiento.

En la Tabla 3.2., se presentan las temperaturas de reblandecimiento de los conos pirométricos de las series Orton y Seger.

Tabla 3.2.

Temperaturas de Rebladecimiento de los Conos Pirométricos, °C

(Velocidad de calentamiento: 150°C/hora)

<u>N° Cono</u>	<u>Serie Seger Conos pequeños de Laboratorio</u>	<u>Serie Orton Conos de gran tamaño Industriales</u>
14	1410	1399
15	1440	1430
16	1470	1491
17	1500	1512
18	1520	1522
19	1540	1541
20	1560	1564
26	1580	1605
28	1640	1638
30	1680	1654
34	1760	1759
38	1860	1850 (*)
42	1980	2015 (*)

(*) Datos obtenidos con velocidades de calentamiento de 600°C/hora (10°C/minuto).

3.4.2. Refractariedad bajo carga

El ensayo de refractariedad bajo carga, surgió como una modificación del ensayo de variación dimensional lineal permanente, de tal forma que no sólo se tuviera presente el efecto de la temperatura, sino también el efecto del esfuerzo mecánico (Norma ITINTEC 331.023-78). Por refractariedad bajo carga, se entiende la temperatura a la cual la probeta de un material refractario sometido a una carga constante y a un determinado régimen de calentamiento, sufre cierto porcentaje de deformación (ver figura 3.7).

Al elevar paulatinamente la temperatura de una probeta sometida a una carga constante ($2 \pm 0.05 \text{ kg-f/cm}^2$, según Norma ITINTEC 331.023-79), se produce, a pesar de la aplicación de la carga, la dilatación de la muestra que alcanza un máximo para una determinada temperatura que es función del tipo de refractario ensayado.

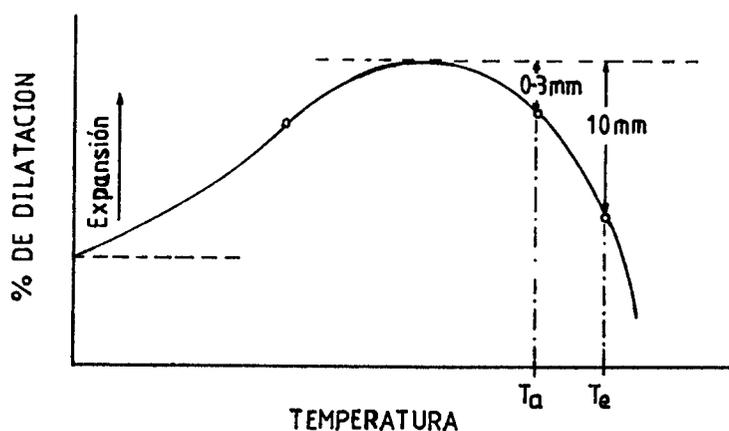


Fig. 3.7. Ensayo de refractariedad bajo carga (deformación en función de la temperatura a velocidad de calentamiento constante).

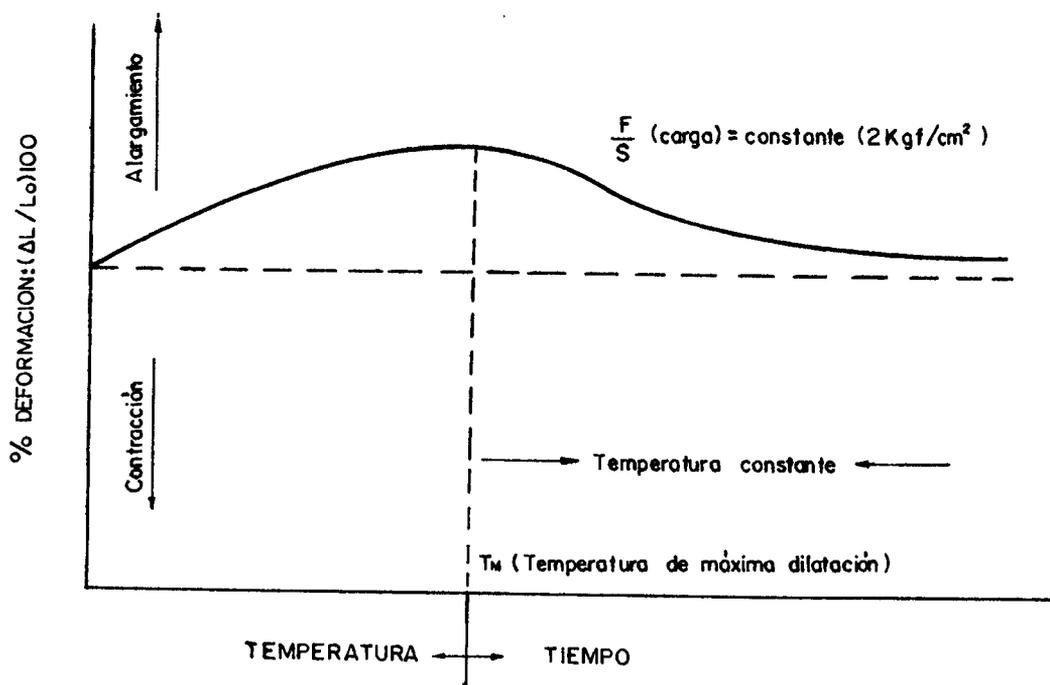
Se define arbitrariamente como T_a , la temperatura para la cual la probeta experimenta una contracción de 0.3 mm, medida desde el punto de máxima dilatación. Análogamente, T_e , es la temperatura para la cual el valor de la contracción es 10 mm.

El ensayo de refractariedad bajo carga presenta los siguientes inconvenientes:

- 1.- No tiene presente el gradiente térmico que puede existir dentro del material refractario en servicio.
- 2.- La carga utilizada (2 Kg-f/cm²) es notablemente superior a lo que con frecuencia se encuentra en la práctica industrial.

Actualmente, va adquiriendo más importancia el hacer intervenir la variable tiempo dentro de los ensayos de refractariedad bajo carga constante. Se pretende observar la contracción experimentada por el artículo refractario cuando es sometido a la acción de una carga y temperatura constantes, lo que constituye, dentro de los materiales refractarios, un equivalente a los ensayos de "Creep" o de fluencia tan familiares en el campo de los metales (ver explicación gráfica, página 66).

Otros ensayos, como el desarrollado por Clavaud, aplican una carga creciente manteniendo constante la temperatura, al objeto de predecir la carga máxima que podrá soportar el refractario durante el servicio a una temperatura dada.



Tendencia actual del ensayo de Refractariedad bajo carga (deformación en función del tiempo bajo carga y a temperatura constantes).

3.4.3. Resistencia a la Compresión en frío

La resistencia a la compresión en frío es el cociente entre la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo y la sección inicial de la probeta (Kg-f/cm^2) (Norma ITINTEC 331.021-78).

La resistencia a la compresión en frío es una característica que presenta el material refractario, la cual está en estrecha relación con la porosidad, grado de vitrificación del constituyente matriz y la resistencia al choque térmico.

Diferentes ladrillos pertenecientes a una misma familia refractaria, pueden presentar resistencias al choque térmico elevadas si observamos

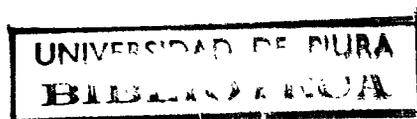
que las cargas de rotura a la compresión en frío son superiores a la media del conjunto.

Ladrillos de una misma familia refractaria que presentan una porosidad cerrada (volumen de poros cerrados/volumen total) elevada, se caracterizarán por tener una resistencia a la compresión en frío inferior al valor medio de la población.

La resistencia a la compresión en frío determina la resistencia a la fragmentación (Cold Crushing Strength) de un material. Es particularmente utilizado para definir la resistencia mecánica en frío de los materiales refractarios. Resulta importante constatar que la resistencia a la compresión de los materiales refractarios es muy superior a la resistencia a la tracción: la razón se encuentra en que la propagación de las grietas, conducentes a la rotura de un material, exige la presencia de es fuerzos de tracción. Esta constatación experimental deberá tenerse muy en cuenta a la hora de utilizar un material refractario con una finalidad estructural.

3.4.4. Resistencia a la Flexión

Si bien los ensayos de flexión no son habituales en los controles de fabricación y recepción de materiales, nunca han perdido interés dentro del campo de la investigación y desarrollo de nuevos productos refractarios.



La resistencia a la flexión de un material refractario es la resistencia que ofrece a un esfuerzo de plegado (en el ensayo de flexión existen fibras que trabajan a tracción y fibras que lo hacen a compresión, Norma ITINTEC 331.021-78).

En la práctica industrial, los refractarios raras veces se rompen por esfuerzos de compresión, sino por una combinación de cargas de compresión-tracción a altas temperaturas.

El módulo de elasticidad (módulo de Young, E) y la carga de rotura, puede medirse de diferentes maneras: cargando el extremo libre de una probeta empotrada (Fig. 3.8-a), cargando en el centro de una probeta apoyada por sus dos extremos (Fig. 3.8-b), o bien, cargando en los extremos de una probeta adecuadamente apoyada (Fig. 3.8-c).

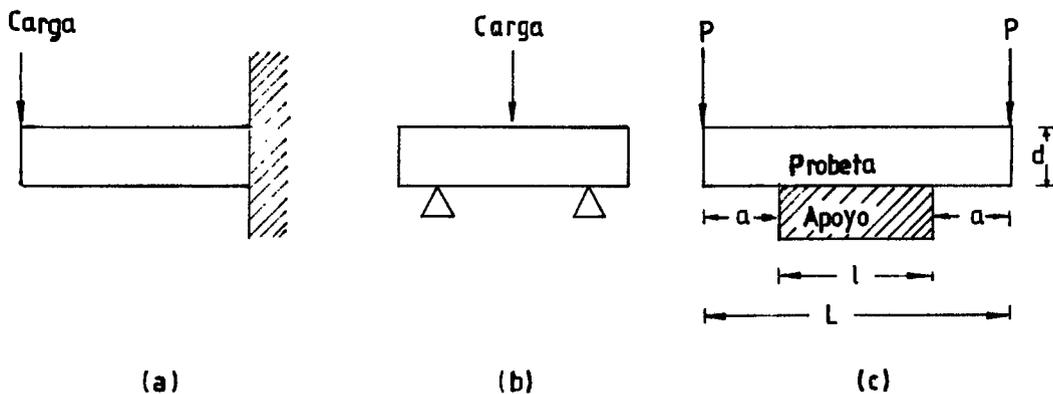


Fig. 3.8. Diferentes formas de medir el Módulo de elasticidad y la carga de rotura.

La flecha en el punto medio de la probeta (Fig. 3.8-c) es una función de las características geométricas del material y sus apoyos, del mó

dulo de Young, E, y la carga aplicada, P :

$$Z = - \frac{3}{2} \frac{P a l^2}{b d^3 E} \quad (3.12)$$

donde:

Z, es la magnitud de la flecha producida durante la aplicación de la carga.

b, es la anchura de la probeta

d, es el espesor de la probeta

l, es la longitud del apoyo utilizado

$l + 2a$, es igual a la longitud de la probeta

L, es la longitud de la probeta

a, es $(L - l)/2$.

3.4.5. Resistencia al Choque Térmico

Los materiales refractarios presentan una escasa resistencia a los cambios bruscos de temperatura debido, sobre todo, a su baja resiliencia (elevada fragilidad), pequeña conductividad, K, y en algunas aplicaciones a su elevado coeficiente de dilatación, α .

Si bien en algunas aplicaciones el material se encuentra trabajando a una temperatura que, aún sujeta a fluctuaciones, puede considerarse constante al final de la campaña, en otras circunstancias hay que prever oscilaciones bruscas de temperatura (la temperatura de la bóveda de un horno eléctrico o en la puerta de un horno de "tratamiento térmico" desciende cada vez que se retira la carga y aumenta al iniciar nuevamente el ciclo de tratamiento).

Cualquier material refractario sometido a cambios bruscos de temperatura (choque térmico), está sujeto a tensiones de tipo mecánico que pueden ocasionar su rotura:

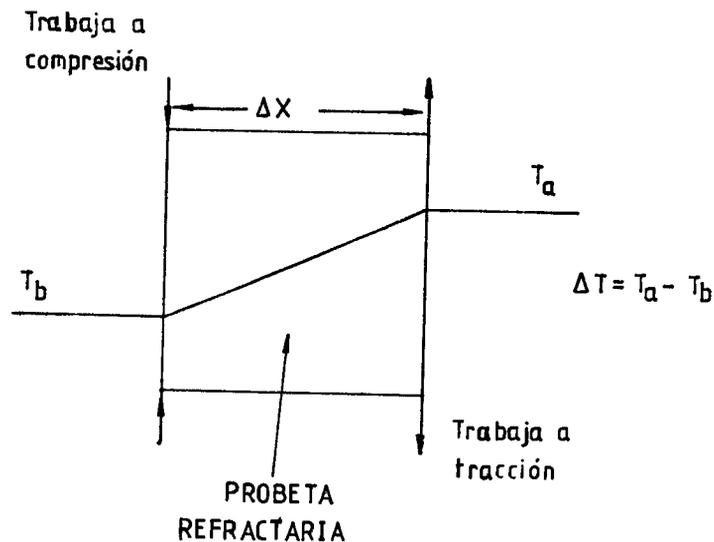
Ley de Hooke, σ = carga o esfuerzo mecánico

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l_0} E$$

Según la Ec. (3.9) y la ley de Fourier, para el transporte de calor por conducción, tenemos que:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T \quad \text{y} \quad \dot{q} = -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\therefore \sigma = -E \cdot \frac{\dot{q}}{K} \cdot \Delta x \cdot \alpha \quad (3.13)$$



Según la Ec. (3.13) la resistencia al choque térmico será tanto más elevada cuando:

- Cuanto menor sea el valor del módulo de Young, E .
- Cuanto menor sea el coeficiente de dilatación lineal reversible del material.

- c) Cuanto mayor sea el coeficiente de conductividad calorífica, K.
- d) Cuanto más pequeño sea el tamaño del ladrillo refractario.

Un ensayo frecuente al fin de calcular la resistencia al choque térmico de los artículos refractarios, suele utilizar probetas cilíndricas que se calientan a la temperatura de 950°C durante 15 minutos y que posteriormente se enfrían en agua (15 - 20°C) durante 3 minutos. El ciclo se repetirá el número de veces que sea preciso, hasta que la muestra se rompa en dos o más grandes trozos (Proyecto de Norma Española PNE 61041).

3.4.6. Resistencia al Ataque por Escorias

Según Clements, la búsqueda de un ensayo estándar de resistencia al ataque químico ha sido abandonada y hoy se acepta, generalmente, que sólo se puede predecir el efecto de una escoria dada sobre un refractario dado, a una temperatura dada, ensayando este material con esta escoria, a esta temperatura y, si es posible, en la atmósfera correcta. Para que la simulación sea perfecta, se deben también retirar los productos de la reacción a la velocidad adecuada. Cualquier desviación de estas condiciones, conducirá a resultados falseados.

Normalmente, se suele efectuar un ensayo comparativo consistente en taladrar un ladrillo de dimensiones especificadas, un agujero dentro del cual se introduce la escoria. Después de un tratamiento térmico a una temperatura normalizada, se observa mediante corte transversal de la probeta refractaria, la profundidad y la progresión del ataque. El ensayo sería indicativo, si existiera una franca reacción química metal-escoria,

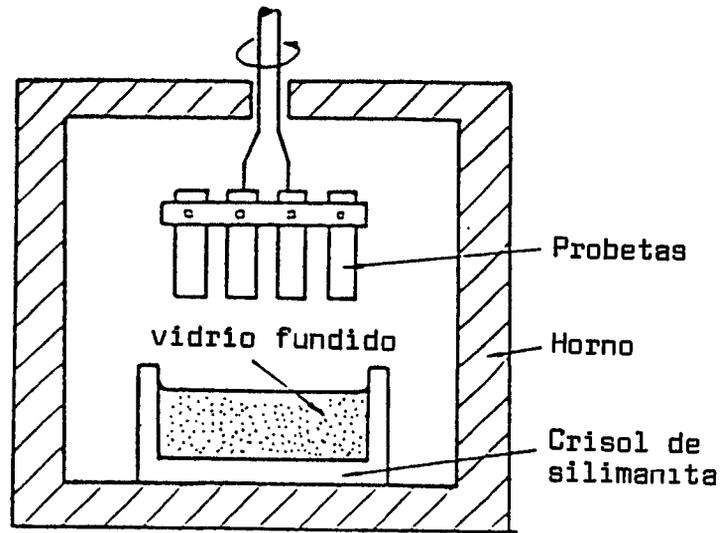
ya que si lo que realmente se realiza es la penetración de la escoria, la interpretación de la progresión de la interfase refractario-escoria resultaría más problemática. En tal situación, quedaría por determinar si la infiltración constituye o no un serio problema durante el servicio: El arrabio se infiltra en el refractario de la solera del horno alto y al solidificar, por alcanzar cierta profundidad, impide la progresión del ataque del metal a otras zonas del material (el propio agente agresor constituye un impedimento contra lo que podría ser un ataque generalizado del metal).

En la figura 3.9., se presentan diversos esquemas de algunos de los ensayos simulados más importantes:

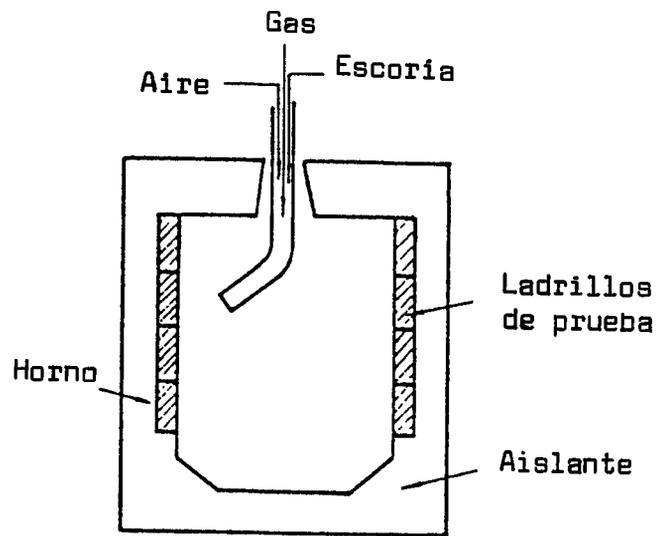
- . Ensayos de inmersión (en los cuales el refractario está siempre en contacto con la escoria).
- . Ensayos giratorios (en los cuales el refractario no siempre está en contacto con la escoria).

Los constituyentes (matriz y disperso) de un material refractario pueden dar lugar a compuestos químicos diferentes, según se operen los siguientes mecanismos:

- 1.- Disolución: Reacción con formación de un compuesto de bajo punto de fusión al contactar el material refractario con los diversos componentes de la escoria metalúrgica (reacción refractario-escoria).



(a)



(b)

Fig. 3.9. Resistencia al ataque por escorias
 a) Ensayo de inmersión.
 b) Ensayo giratorio.

- 2.- Reducción metalotérmica del material refractario por los metales activos presentes en la aleación fundida (reacción refractario-metal activo).
- 3.- Ataque por monóxido de carbono, CO, a baja temperatura.

Dentro de las típicas reacciones refractario-escoria, señalaremos aquella que puede tener lugar entre la familia refractaria sílico-aluminosa y la escoria de horno alto (ver Fig. 3.10).

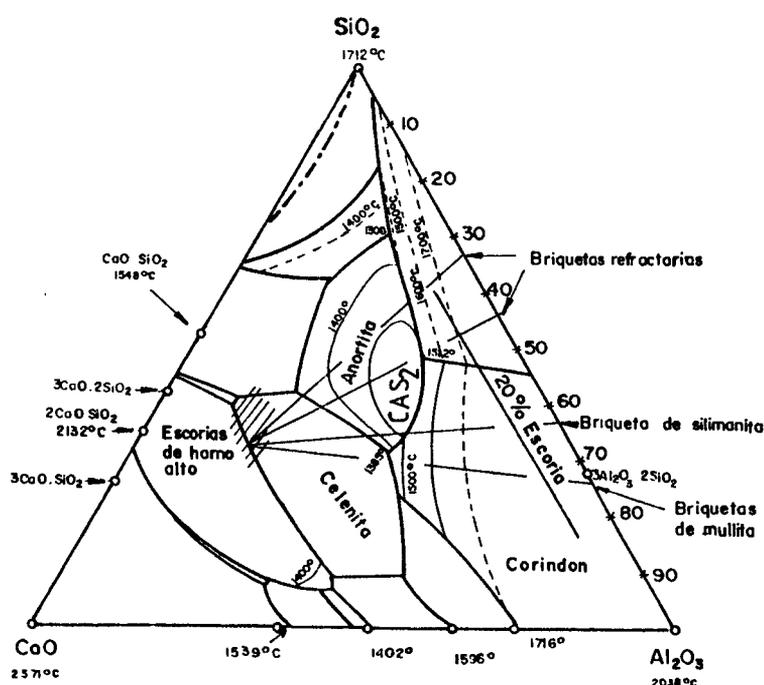


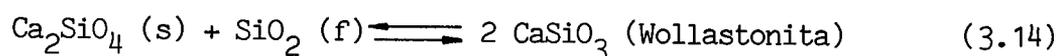
Fig. 3.10. Diagrama ternario SiO_2 - CaO - Al_2O_3 con las isotermas de líquidos modificadas de tal manera que tenga presente el efecto del FeO .

De acuerdo con la figura 3.10., los puntos de fusión (no confundirlo con el punto de ablandamiento o con la refractariedad de un determinado material) de las diferentes calidades de ladrillos sílico-aluminosos que admiten en disolución un 20% de escoria de horno alto ($\% \text{SiO}_2 = 37$,

% CaO = 44, % FeO = 4, % Al₂O₃ = 15) aumentan conforme lo hace el contendo de alúmina del refractario.

La reacción refractario-escoria puede progresar en tanto en cuanto la viscosidad del producto de reacción sea lo suficientemente baja como para que se pueda eliminar fácilmente de la interfase de reacción.

Termodinámicamente, la reacción de ataque del silicato bicálcico, 2 CaO · SiO₂ (Ca₂SiO₄) por la sílice de la escoria, es factible siempre y cuando: $\Delta G^\circ(T) < 0$, para la siguiente reacción:



En las figuras 3.11 y 3.12., se muestran los valores de $G^\circ(T)$, energía libre estándar de formación, para diferentes silicatos, aluminatos y fosfatos metálicos en función de la temperatura.

No obstante, a pesar de que la reacción (3.14) sea termodinámicamente favorable, pueden existir impedimentos cinéticos que dificulten su progresión. Si la temperatura en la interfase de contacto refractario-escoria es sensiblemente inferior al punto de ablandamiento del producto formado, la eliminación del mismo y la consiguiente formación de una nueva interfase refractario-escoria, sería poco probable bajo condiciones normales de operación del sistema. Contrariamente, si el producto formado tiene una pequeña viscosidad, éste puede desprenderse con facilidad dando lugar a la reapertura de un nuevo frente de reacción.

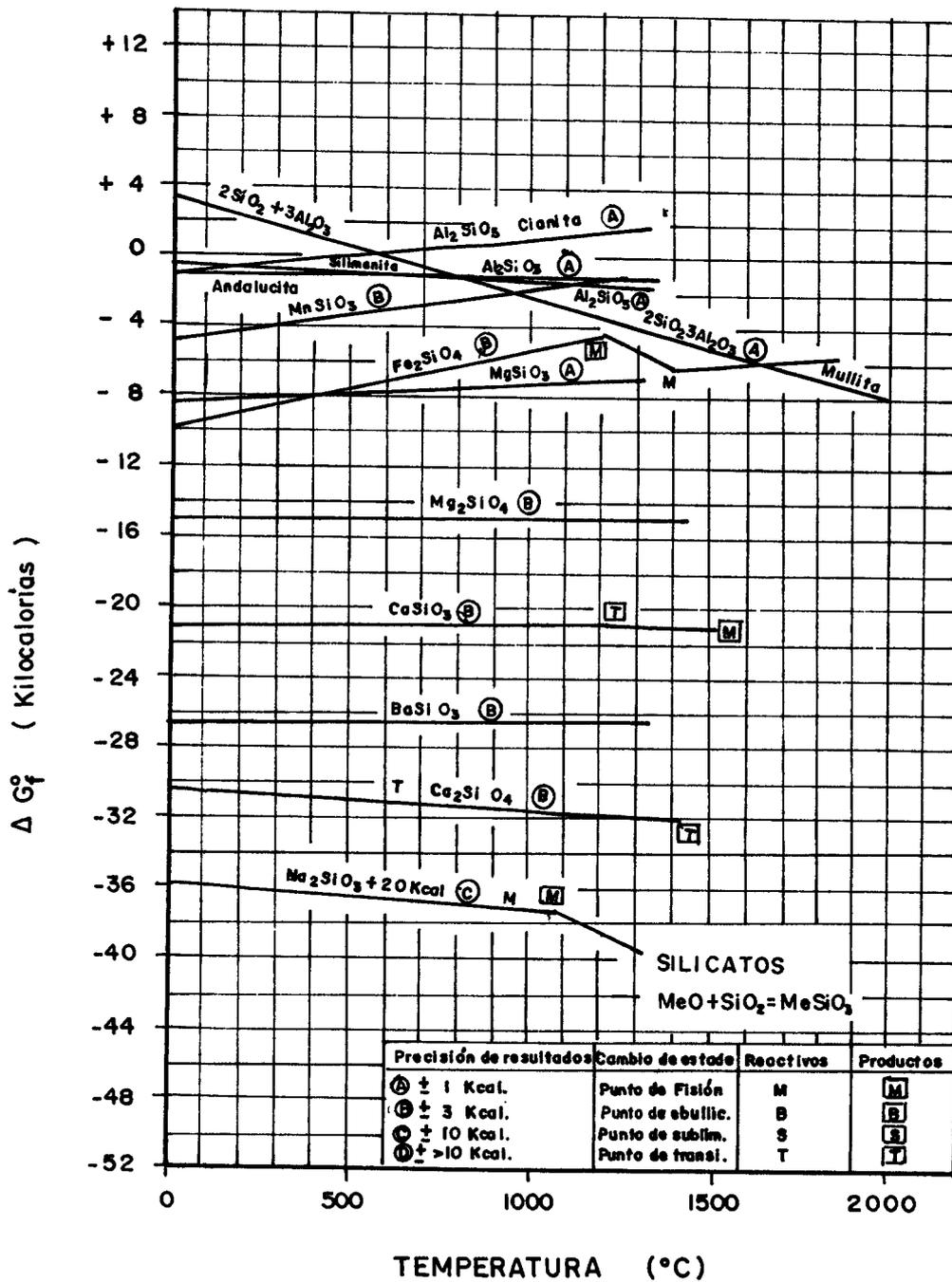


Fig. 3.11. Energías libres de formación para diferentes silicatos metálicos en función de la temperatura.

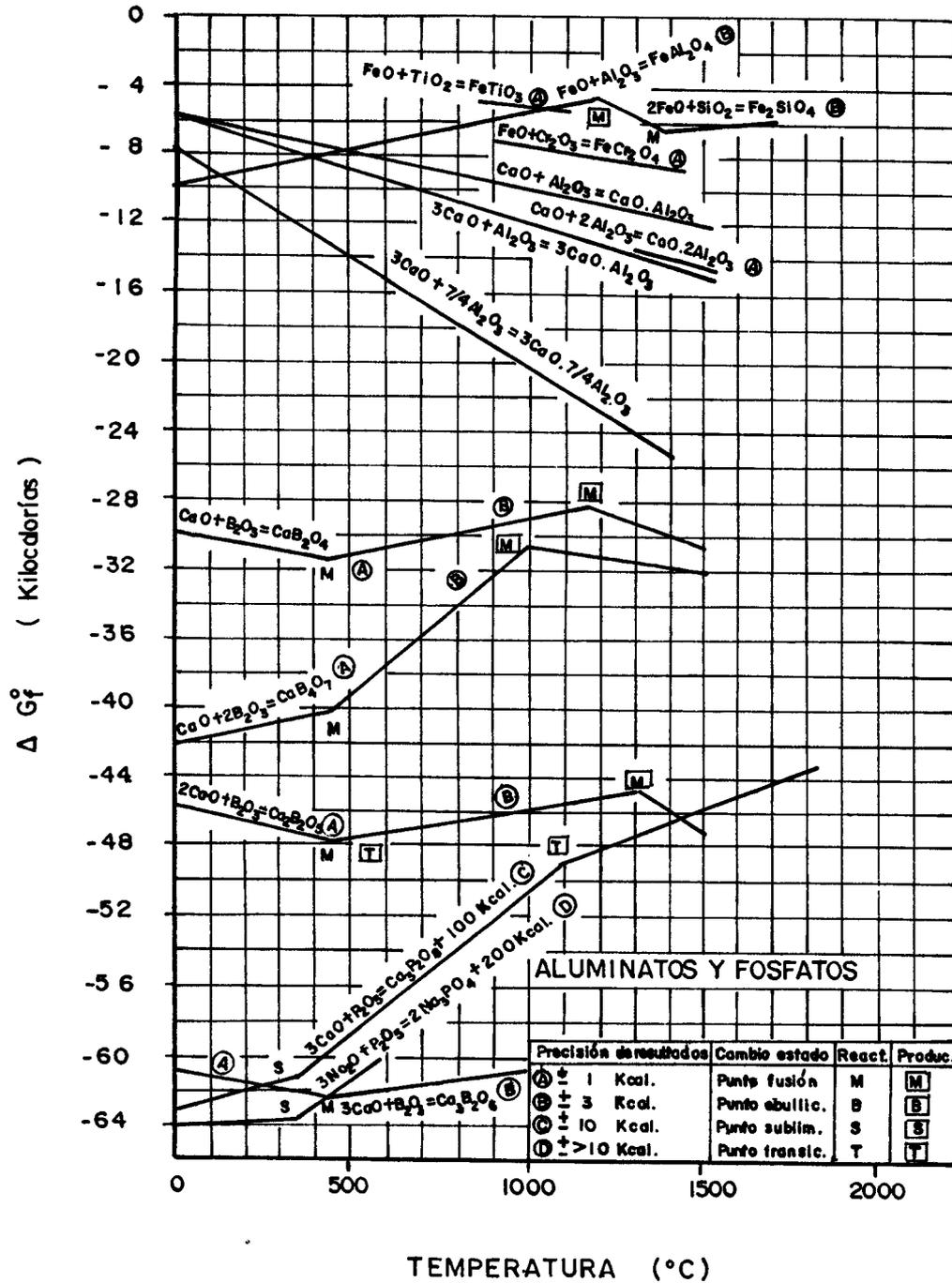
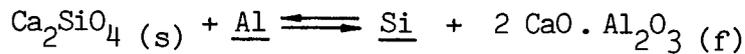


Fig. 3.12. Energías libres de formación de los aluminatos y fosfatos metálicos en función de la temperatura.

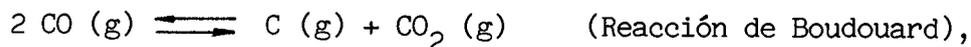
Los diagramas de equilibrio (binarios y ternarios) aportan valiosa información acerca de la pérdida o la ganancia en refractariedad (formación de lobos o costras de geometría irregular adosadas a las paredes del horno) de los constituyentes refractarios.

Durante las últimas etapas de la vida de un acero (desoxidación y de sulfuración) se efectúa la adición de metales activos tales como: el aluminio (Al), Calcio (Ca) y metales de las tierras raras, REM (Ce, Pr, Nd). Se puede obtener, dependiendo del contacto y de la naturaleza del metal activo utilizado, la alteración total o parcial de los constituyentes refractarios a través de reacciones de reducción metalotérmicas:



Al y Si representan el aluminio y el silicio disueltos en el acero.

Un caso especial de agresividad química lo constituye el monóxido de carbono contenido en la atmósfera que se encuentra en contacto con el material refractario. La deposición de carbono en los poros abiertos del material refractario, según la reacción:



se encuentra catalizada (acelerada) por la presencia de carburo de hierro. El carburo de hierro se forma en atmósfera reductora a partir de partículas de Fe_2O_3 presentes como impurezas en las materias primas refractarias, a temperaturas comprendidas entre los 400 y 700°C.

El control del nivel del óxido férrico (Fe_2O_3) presente en el material refractario puede realizarse, bajo condiciones reductoras, favore-

ciendo la formación del compuesto fayalita ($2 \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, de punto de fusión congruente a 1210°C). No obstante, hay que tener presente que la refratariedad del ladrillo va a disminuir con relación al tanto por ciento de fayalita presente en el constituyente matriz.

3.4.7. Resistencia a la Abrasión

Los refractarios que han de ser utilizados en las soleras de los hornos o en lugares en donde el material desliza por encima de ellos, deben tener una buena resistencia a la abrasión. A modo de criterios generales, se puede decir que un material refractario tendrá más resistencia al desgaste por abrasión si se verifica:

- 1.- Que la cohesión entre el componente disperso y la matriz sea lo más elevada posible, lo que implica la obtención de materiales de elevada densidad.
- 2.- Que el tamaño del constituyente disperso sea fino de morfología granular.
- 3.- Que la temperatura de cocción, para un determinado componente matriz, sea lo más elevada posible.
- 4.- Que la resistencia a la compresión en frío sea lo más elevada.

Un ensayo frecuente para cuantificar la resistencia al desgaste, consiste en hacer incidir sobre una probeta refractaria durante un tiempo de terminado, una corriente de finas partículas abrasivas (corindón) a través de flujos de aire de alta velocidad.

CAPITULO IV

REFRACTARIOS DE SILICE EN LA INDUSTRIA

Dado que la diatomita natural es isotrópica y contiene en mayor proporción sílice amorfa, que presumiblemente sufre cambios de forma de la misma manera que los ladrillos de sílice, creemos conveniente hacer una exposición resumida del comportamiento de los refractarios de sílice en la industria; poniendo especial interés en aquellos aspectos que, sin lugar a dudas, son los más importantes para entender su funcionamiento a temperaturas elevadas; a saber, propiedades estructurales de las materias primas: formas alotrópicas, mecanismos de aglomeración cerámica y las propiedades de los refractarios de sílice.

4.1. Refractarios de Sílice: Definición

Se consideran como refractarios de sílice a aquellos refractarios ácidos en los cuales el porcentaje de sílice es mayor del 94%.

4.2. Materias Primas

No todas las materias primas son las adecuadas para la fabricación de los refractarios de sílice, aunque presenten las siguientes características generales:

- . Alto contenido de óxido de Silicio ($\text{SiO}_2 > 98\%$)
- . Bajos niveles en óxidos metálicos ($< 2\%$)

- . Bajos niveles de óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)
- . Escasa contaminación orgánica.

Las materias primas silíceas más importantes en la naturaleza son:

- . Las cuarzitas (de origen sedimentario, producto de la transformación metamórfica de las rocas).
- . El Silex (de origen volcánico, es sílice amorfa que se encuentra en la naturaleza bajo formas de tipo esferoidales).
- . Las calcedonias y los ganister (de origen hidrotermal).

Básicamente, una buena materia prima para la fabricación de refractarios de sílice, ha de tener las siguientes propiedades:

- . Alto contenido en SiO_2 (> 98%)
- . Bajos niveles de Al_2O_3 , TiO_2 , Na_2O y K_2O .
- . Presentar una óptima transformación durante el tratamiento térmico. (CHESTERS (1) ha encontrado que una mezcla mineralizadora del 1.5% de Na_2O y 1.5% Fe_2O_3 proporciona la transformación del cuarzo a las especies cristobalita - tridimita en dos horas a la temperatura de 1400°C . En ausencia de sustancias mineralizadoras, la transformación del cuarzo tiene lugar a temperaturas próximas a 1550°C).

(1) CHESTERS, J.H. "Refractories: Production and Properties". Ed. The Iron and Steel Institute. London, 1973.

4.3. Propiedades Estructurales de las Materias Primas

4.3.1. Formas alotrópicas de la Sílice

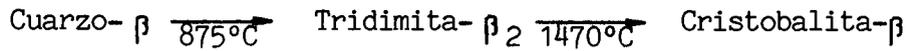
El óxido de silicio (SiO_2) es un típico compuesto en el que predomina el carácter covalente del enlace Si-O sobre el iónico. Cada átomo de silicio debe estar rodeado por cuatro átomos de oxígeno dispuesto en los vértices de un tetraedro, siendo cada átomo de oxígeno compartido por dos átomos de silicio, dando lugar a una red tridimensional (el carácter iónico según Pauling del SiO_2 sería del 50%).

Aunque se han llegado a detectar numerosas modificaciones de la sílice, las formas alotrópicas más importantes desde el punto de vista de la industria refractaria son:

- . Formas alotrópicas amorfas: sílice vítrea y sílice globular.
- . Formas alotrópicas cristalinas:
 - Cuarzo - α (Romboédrica o Trigonal)
 - Tridimita - α (Ortorrómica)
 - Cristobalita - α (Cúbica)

Termodinámicamente, dentro de las formas alotrópicas cristalinas, la variedad más estable es el cuarzo- α si bien en la naturaleza también se encuentran pequeños depósitos minerales de tridimita- α (asociados a rocas volcánicas) y de cristobalita- α (nombre relativo a la localidad mexicana de Cristo).

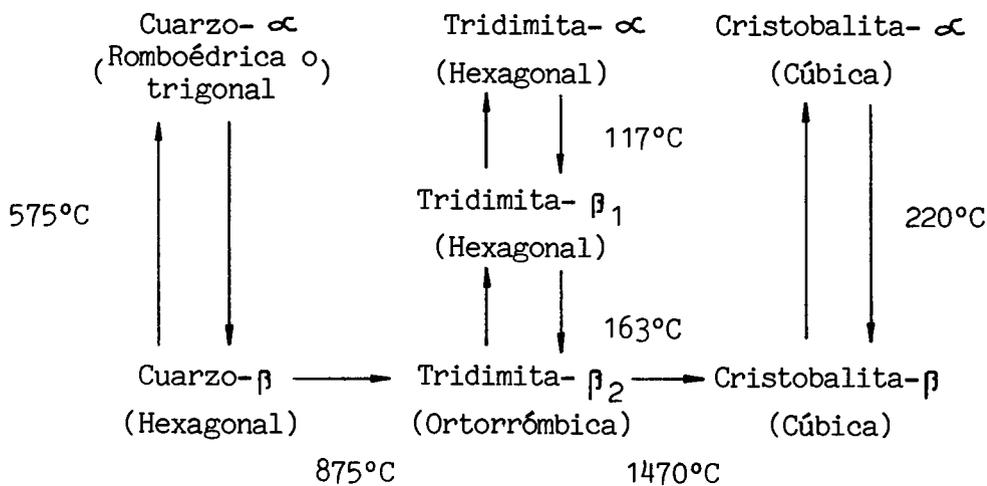
Las temperaturas de transformación determinadas a través de medidas de presión de vapor, son las siguientes:



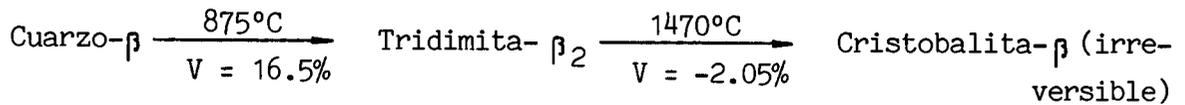
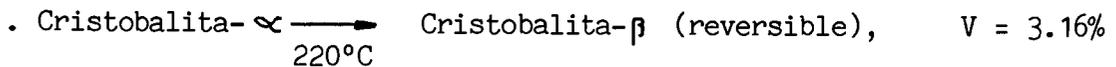
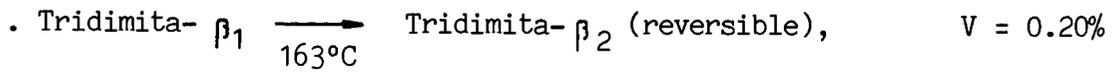
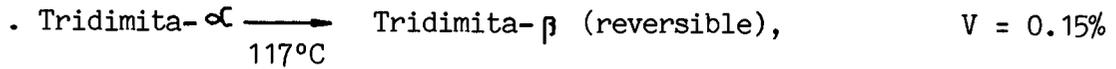
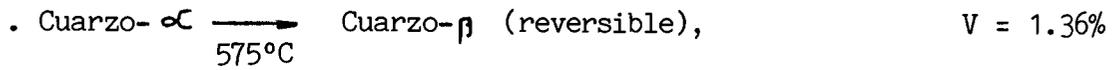
Cada una de las formas alotrópicas cristalinas de la sílice presentan distintas variedades:

- . Cuarzo: cuarzo- α y cuarzo- β
- . Tridimita: tridimita- α , tridimita- β_1 y tridimita- β_2
- . Cristobalita: cristobalita- α y cristobalita- β

Tanto las formas alotrópicas de la sílice como las denominadas variedades de cada una de las formas alotrópicas cristalizan en sistemas distintos. La diferencia existente entre ellas radica en que así como la transición de una forma alotrópica en otra es un producto lento e irreversible, los cambios experimentados por las distintas variedades son de naturaleza instantánea y reversibles. Seguidamente se presentan las temperaturas de transformación entre las diferentes variedades y formas alotrópicas de la sílice:



Los cambios de volumen asociados a cada una de las transformaciones enunciadas anteriormente, son los siguientes:



Las densidades de las formas más estables a la temperatura ambiente son:

Cuarzo- α	2.65 g/cm ³
Tridimita- α	2.27 g/cm ³
Cristobalita- α	2.33 g/cm ³
Sílice vítrea	2.21 g/cm ³

4.3.2. Mecanismos de Aglomeración Cerámica de ladrillos de Sílice

En base a la evolución de los resultados experimentales de la densidad real y del análisis mineralógico de los ladrillos de sílice durante el proceso de cocción (teniendo presente que durante el proceso de conformado del ladrillo se efectúa la adición de cal), se asume el siguiente mecanismo de aglomeración cerámica de los granos de SiO₂ (constituyente disperso) por el silicato de cal: Ca SiO₃ (constituyente matriz):

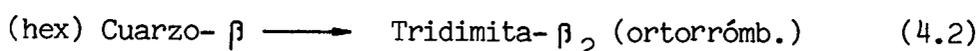
. A baja temperatura ($T < 750^{\circ}\text{C}$) el ladrillo está formado por granos de cuarzo compactados hidráulicamente en medio de una matriz que contiene óxido de cal hidratada.

. Conforme se eleva la temperatura ($T > 800^{\circ}\text{C}$) comienza, al eliminarse los últimos restos de agua constitucional, a ser importante la interacción CaO-SiO_2 (Fig. 4.1.).

. Al alcanzar temperaturas por encima de los 1436°C , se puede empezar a producir sobre los contornos de los granos de cuarzo la siguiente reacción de transformación:



ya que, aunque termodinámicamente la fase estable por debajo de los 1470°C sería la Tridimita- β_2 , cinéticamente las distorsiones producidas en los enlaces Si-O-Si son de mayor magnitud en el caso de la transformación:



que en la representada por la ecuación (4.1).

. La Cristobalita formada a altas temperaturas puede disolverse parcialmente dentro de una fase vítrea compuesta mayoritariamente por silica to de calcio (CaO.SiO_2 , Wollastonita) (ver diagrama de equilibrio CaO-SiO_2 , Fig. 4.1).

Al enfriar lentamente el ladrillo por debajo de los 1436°C la fase vítrea ($\text{CaO-SiO}_2 + \text{SiO}_2$) en equilibrio con la cristobalita, devitrifica y da lugar a la formación de una fase termodinámicamente estable de tridimita.

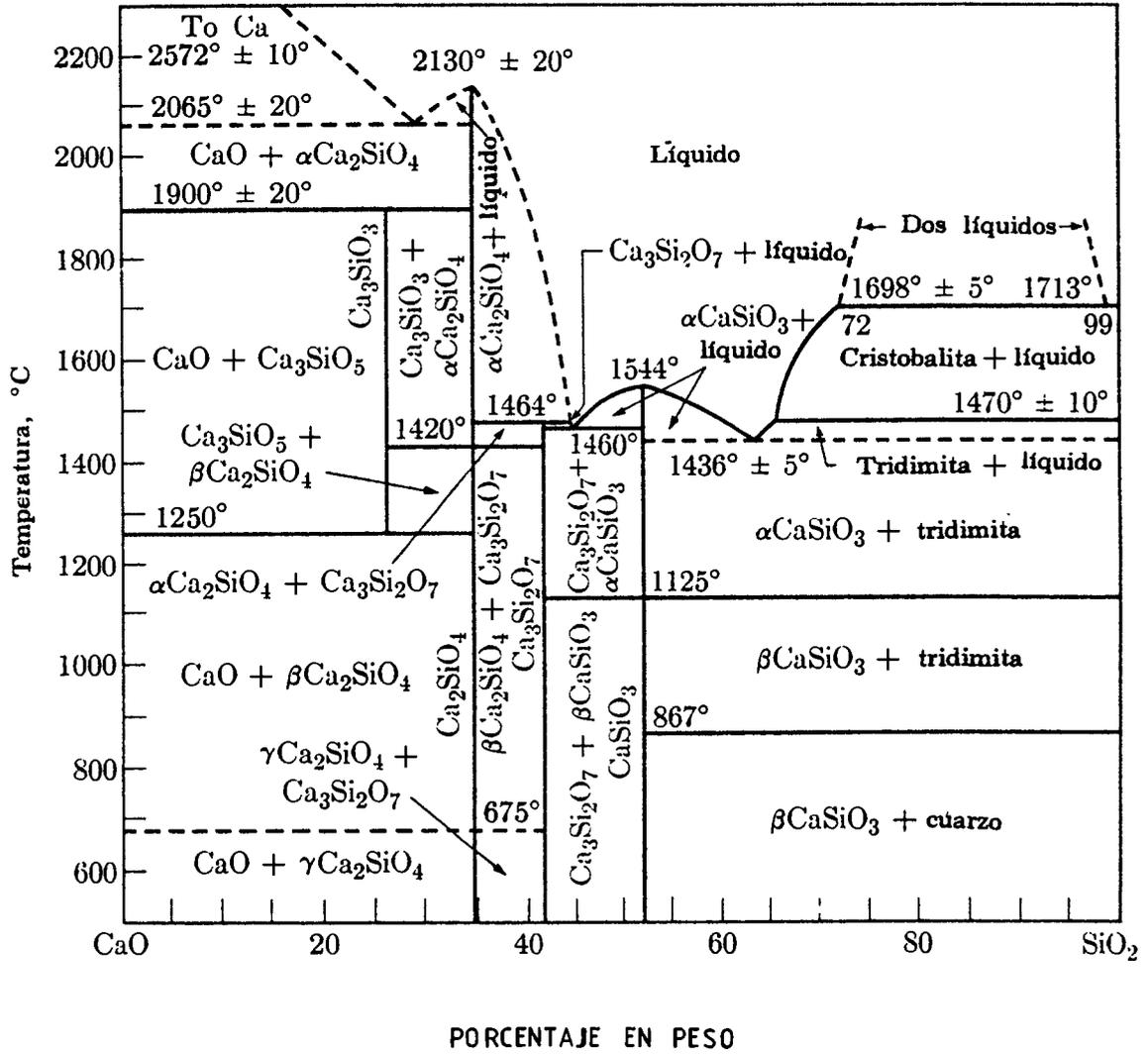
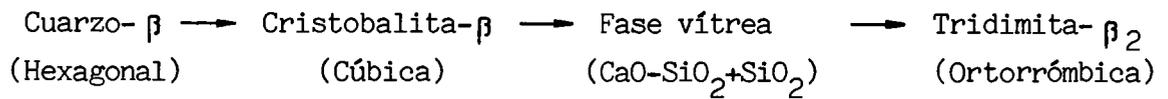


Fig. 4.1. Diagrama de fases binario SiO₂-CaO.

Puede decirse que la transformación de los ladrillos refractarios de sílice durante su proceso de cocción, tiene lugar a través del siguiente mecanismo:



4.4. Propiedades de los ladrillos refractarios de Sílice

Las propiedades de los ladrillos refractarios de sílice se determinan generalmente por dos características fundamentales:

- 1) El contenido en alúmina, Al_2O_3 , óxido de titanio, TiO_2 y álcalis de las materias primas.
- 2) El grado de transformación experimentado por el cuarzo durante la aglomeración cerámica del refractario.

Por lo cual, tanto las propiedades de los ladrillos de sílice derivadas de los ensayos simulados como de los ensayos fundamentales, tienen un fiel reflejo de las características anteriormente señaladas.

4.5. Propiedades relacionadas con los Ensayos Fundamentales

4.5.1. Densidad Real

La densidad real de un ladrillo refractario de sílice es una propiedad importante, ya que refleja el grado de transformación alcanzado por las materias primas utilizadas (generalmente cuarcitas).

$$D_r = f (\% \text{ de cuarzo sin transformar}) = 2.35 \text{ g/cm}^3.$$

En la figura 4.2., se representa la variación de la densidad real de varias materias primas silíceas en función de la temperatura.

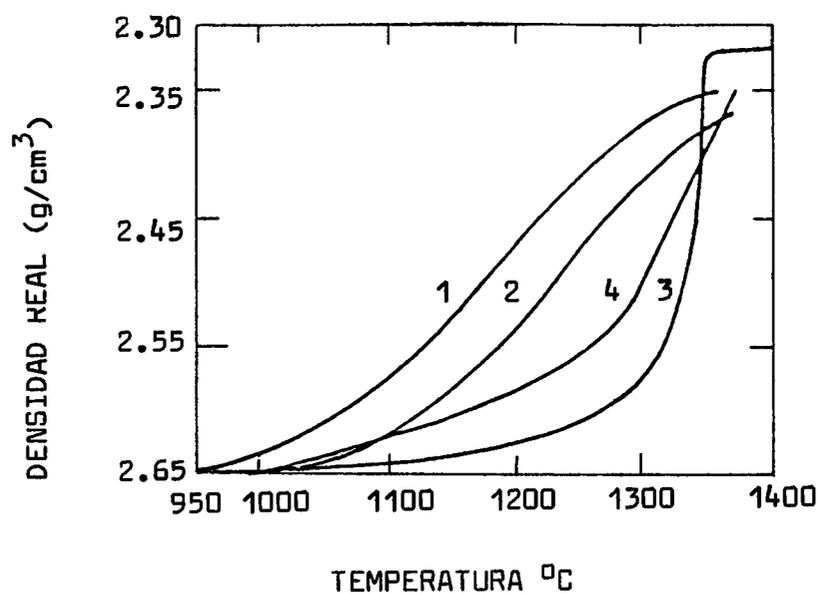


Fig. 4.2. Temperatura de transformación de diferentes rocas silíceas.

- 1) Cuarzitas de grano fino
- 2) Cuarzitas de Gales de grano grueso
- 3) Calcedonia
- 4) Cuarzita de elevada pureza de grano grueso

4.5.2. Densidad Global

Debido a los cambios estructurales presente durante el proceso de fabricación del refractario, es difícil conseguir la producción de ladrillos densos. Los valores de D_g oscilan entre 1.80 - 1.90 g/cm³.

4.5.3. Porosidad abierta

En los catálogos suele venir referenciada bajo el nombre de porosidad aparente. Su valor se sitúa entre el 20 y 25%.

4.5.4. Dilatación Lineal Reversible

El cambio lineal que experimentan los ladrillos de sílice durante el ciclo térmico calentamiento-enfriamiento, es una propiedad directamente relacionada con el grado de transformación del cuarzo y con la proporción de Wollastonita ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) en el constituyente matriz.

En la figura 4.3., se muestran los cambios dimensionales asociados a las transformaciones reversibles de los diferentes estados alotrópicos (variedades alotrópicas) del cuarzo.

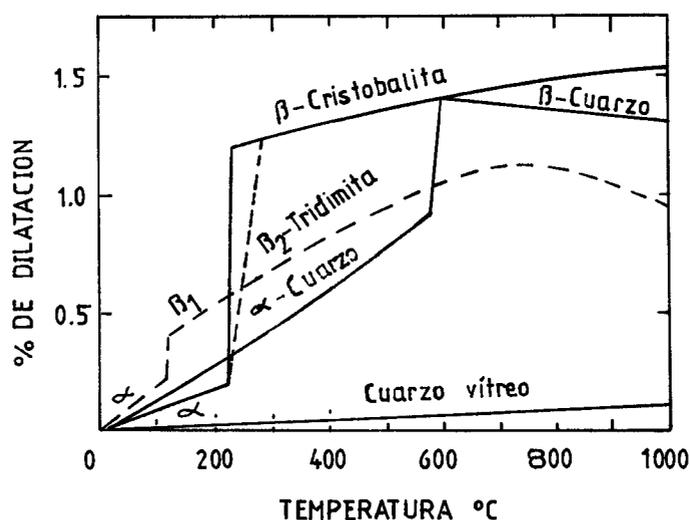
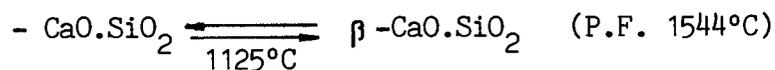


Fig. 4.3. Curvas de dilatación lineal reversible para las variedades alotrópicas de la sílice en función de la temperatura.

Igualmente, el constituyente matriz ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) experimenta a la temperatura de 1125°C, una variación de las posiciones atómicas dentro del cristal:



$$D_r = 2.50 \text{ g/cm}^3$$

$$D_r = 2.905 \text{ g/cm}^3$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} \times 100 = 13.94\%$$

En la figura 4.4., se representan las curvas de expansión térmica de diferentes ladrillos de sílice. Un ladrillo totalmente transformado tendría un valor de la densidad real igual a: $D_r = 2.27 \text{ g/cm}^3$. En la práctica nos encontraremos densidades reales mayores, habida cuenta de que existirán dentro del ladrillo pequeñas proporciones de cuarzo, cristobalita y sílice vítrea (cuarzo + cristobalita + sílice vítrea = 15 - 20%).

Un ladrillo poco transformado presenta a 1000°C una dilatación térmica expresada en tanto por ciento, menor que un ladrillo con alto contenido en tridimita. El peligro de un ladrillo poco transformado, es que a la temperatura de 575°C experimenta una contracción (al enfriar) muy brusca que puede causar la rotura del mismo.

4.5.5. Calor Específico

El calor específico medio entre 20 y 1100°C es:

$$0.21 \text{ KCal/kg.}^\circ\text{C.}$$

4.5.6. Conductividad Térmica

La conductividad térmica, K, de los ladrillos de sílice entre 25 y 1400°C es de: 1.5 KCal/h.m.°C.

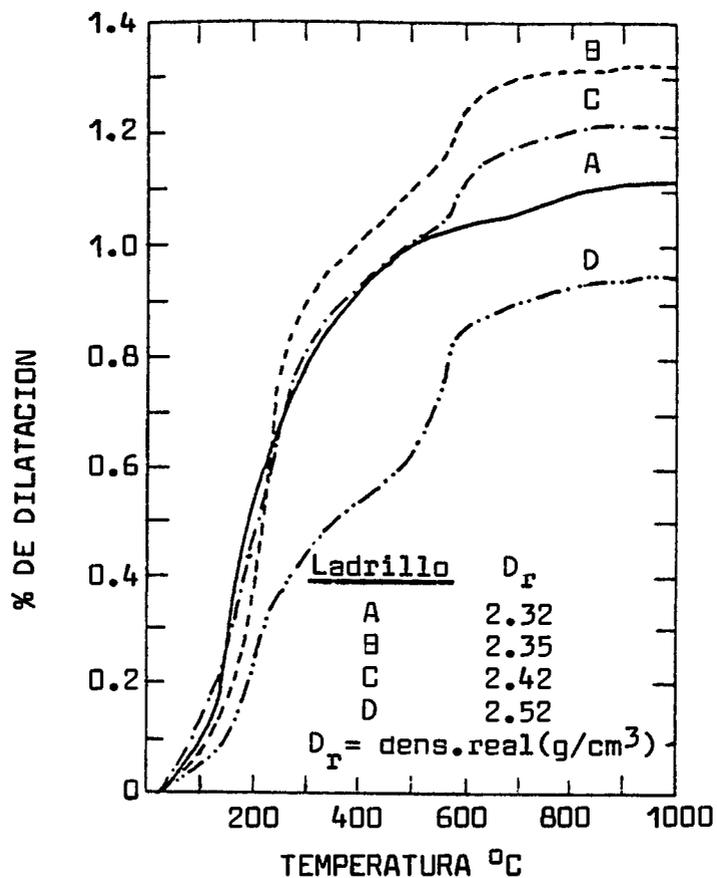


Fig. 4.4. Curvas de dilatación térmica de diferentes ladrillos de sílice según su grado de transformación.

4.5.7. Dilatación Permanente

El valor $\frac{\Delta l}{l_0} \times 100$ a una temperatura determinada, oscila entre el 1.7 y el 0.6%.

4.6. Propiedades con los Ensayos Simulados

4.6.1. Refractariedad

El número del cono Seger oscila entre 33 y 34.

4.6.2. Refractariedad bajo carga, T_a

La temperatura del punto A_a oscila entre los 1600°C (calidades inferiores) a los 1700°C.

4.6.3. Resistencia al choque térmico

Mala por debajo de los 700°C, habida cuenta de los altos coeficientes de dilatación y de la baja conductividad térmica, K, del material.

4.6.4. Resistencia al ataque por escorias

Al fin de estudiar la influencia que sobre la refractariedad del óxido de silicio (en su variedad de tridimita) pudieran presentar los óxidos de aluminio (Al_2O_3), titanio (TiO_2), calcio (CaO), magnesio (MgO), hierro (FeO y Fe_2O_3), sodio (Na_2O) y el potasio (K_2O) debemos fijarnos en los diagramas de equilibrio siguientes:



Conociendo la actividad química de cada uno de los óxidos anteriormente mencionados en la escoria metalúrgica, podemos acudir al diagrama binario para calcular la pérdida de refractariedad ocasionada por la mezcla del constituyente disperso del refractario (en este caso SiO_2) con un determinado porcentaje de óxido agresivo procedente de la escoria (ver Figs. 4.5 a 4.11).

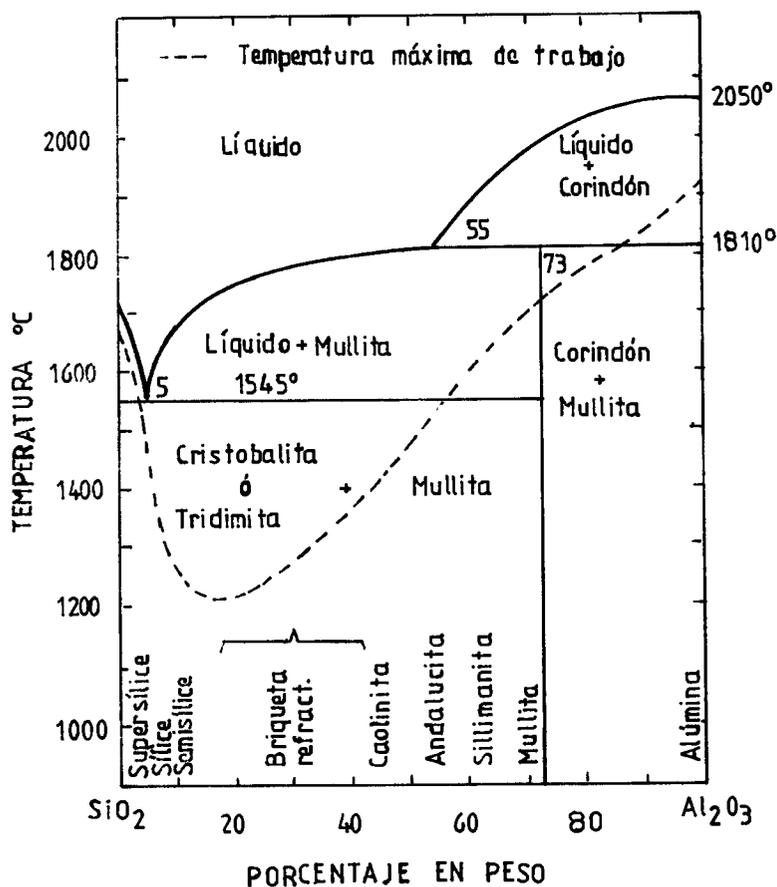
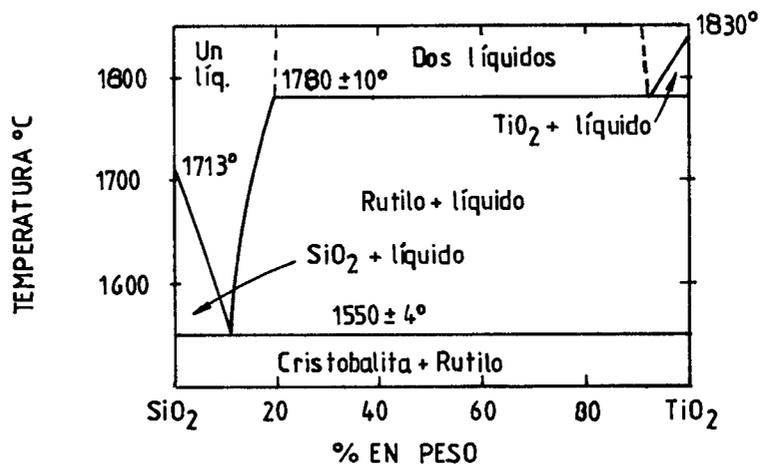
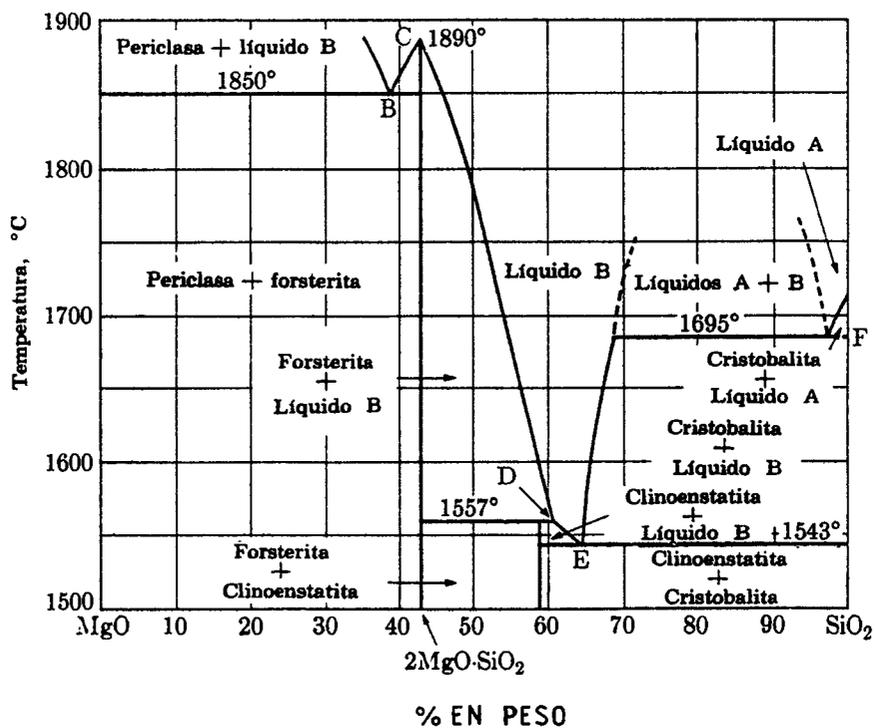


Fig. 4.5. Diagrama de equilibrio Al_2O_3 - SiO_2

Fig. 4.6. Diagrama de equilibrio TiO_2 - SiO_2 Fig. 4.7. Diagrama de equilibrio MgO - SiO_2

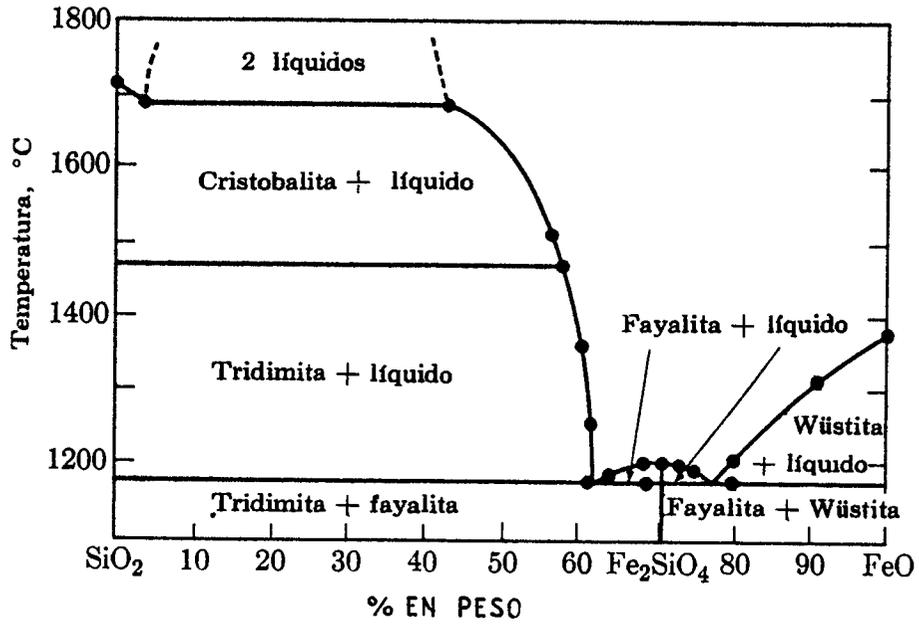


Fig. 4.8. Diagrama de equilibrio FeO - SiO₂

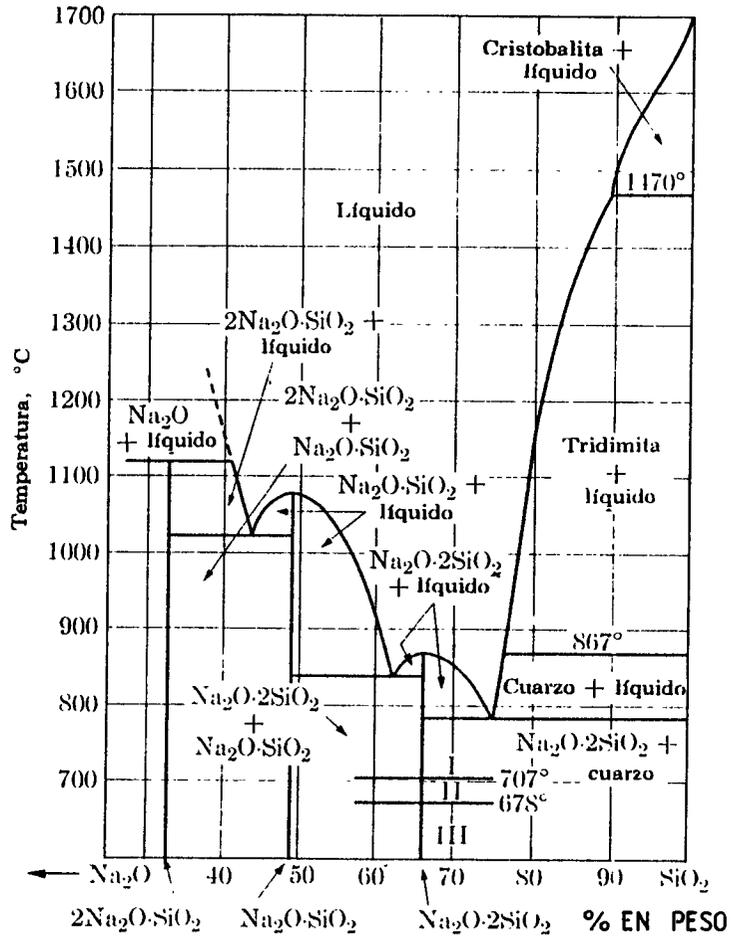


Fig. 4.9. Diagrama de equilibrio Na₂O - SiO₂

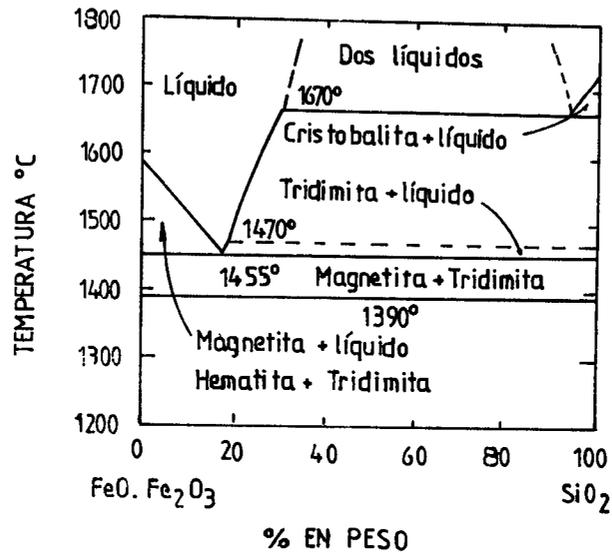


Fig. 4.10. Diagrama de equilibrio $Fe_2O_3 \cdot FeO - SiO_2$

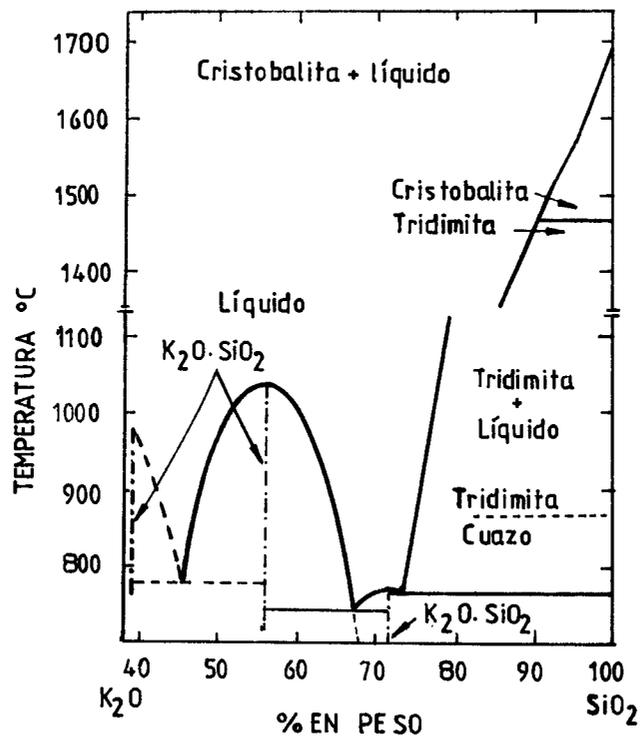


Fig. 4.11. Diagrama de equilibrio $K_2O - SiO_2$

CAPITULO V

EVALUACION TECNICA DE LA DIATOMITA DE BAYOVAR

Esta parte del estudio es muy importante, ya que nos permitirá extraer conclusiones acerca de la calidad de la diatomita de Bayóvar, así como de su comportamiento dentro del uso específico que se estudia.

La evaluación técnica de las tierras de diatomeas de Bayóvar, se orientó hacia la determinación experimental de propiedades que reflejen la calidad del material consolidado natural, las variaciones permanentes que experimentan sus principales parámetros con la temperatura y realización de ensayos de prensado-sinterizado de las tierras granulares; con la finalidad de extraer conclusiones que nos aconsejen las aplicaciones térmicas de las mismas.

Es cierto que la única manera de saber si un material es adecuado para una determinada aplicación sería el ensayar su utilización y observar los resultados obtenidos, ya que a escala de laboratorio es imposible reproducir el nivel de sollicitaciones que van a actuar sobre el material durante su servicio industrial. No obstante, podremos determinar sobre cualquier material aislante o refractario, una serie de propiedades (fundamentales o simuladas) que nos ayudarán a contestar la siguiente pregunta: ¿Cuál será el comportamiento probable del material aislante o refractario durante el servicio?

Podemo afirmar que la caracterización de un material aislante o refractario es total cuando a partir de un número mínimo de datos acerca de

sus propiedades fundamentales o simuladas podemos precisar cuál será el comportamiento que mantendrá en servicio.

No obstante, el estudio pormenorizado de las diferentes propiedades analizadas sobre los materiales aislantes térmicos y refractarios van a constituir, a pesar de sus limitaciones, tanto para el fabricante como para el consumidor, un medio adecuado para controlar la calidad del producto elaborado.

Es preciso dejar constancia que los análisis químico, mineralógico y superficial, determinación de la conductividad térmica y algunos ensayos de prensado-sinterizado, fueron realizados por el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo de España.

5.1. Zonas de Muestreo

Dada la magnitud del yacimiento, se seleccionaron las zonas de muestreo y para ello se contó con el asesoramiento de personal idóneo de las empresas MINERO PERU S.A. y PROBAYOVAR S.A. Se programó un cronograma de trabajo que fue el siguiente:

- 1.- Reconocimiento de las zonas del yacimiento.
- 2.- Identificación de las zonas a muestrear.
- 3.- Muestreo.

Debemos hacer notar que en esta etapa se tuvieron limitaciones, por cuando no se contó con una perforadora que permitiera extraer muestras

inalteradas a profundidades mayores. Las zonas muestreadas fueron las si guientes: (ver Plano 02)

A) "Cueva de los Incas": que es un afloramiento natural producido por efecto de la erosión hídrica y eólica, que pertenece al Estrato Inca. Se encuentra ubicado en el Tablazo (Area III) cuyas coordenadas son las siguientes:

1'427,666.45 N

181,248.33 E

+ 53.39 m de elevación

casi a media distancia entre el área II y el área I. Es decir, a 7 km noroeste con respecto al área I (1'433,350 N - 178,000 E) y a 10 km sure te al área II (1'419,000 N - 187,000 E).

Profundidad de muestreo: - 5 m de la superficie.

B) Area I: en estas zonas se ha extraído el fosfato, superficial, quedando visible la capa de diatomita. De esta área muestreamos dos zonas, a saber:

MUESTRA I : 1'433,750 N - 178,060 E

Profundidad: - 5.00 m de la superficie

MUESTRA II : 1'433,650 N - 178,050 E

Profundidad: - 6.40 m de la superficie

La figura 5.1., muestra un bloque de diatomita que se corresponde con la Zona Inca.

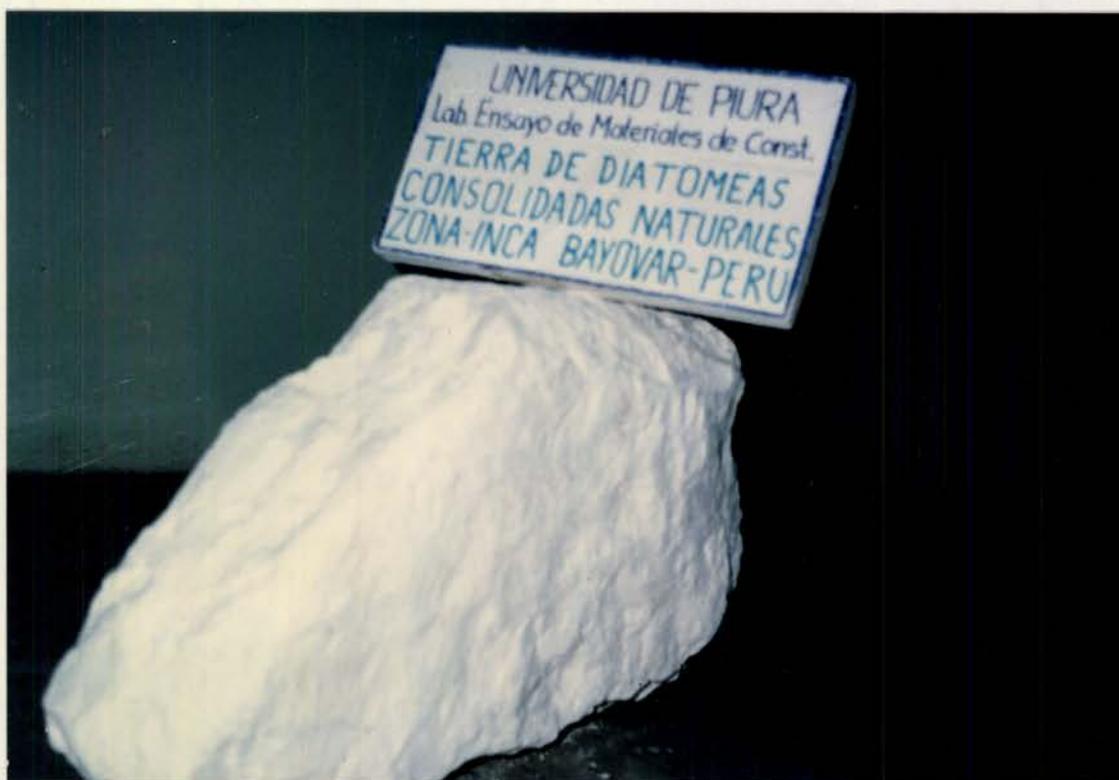


Fig. 5.1. Tierra de Diatomeas consolidadas en el propio yacimiento.

5.2. Determinación Experimental de Propiedades Fundamentales Estructurales

5.2.1. Análisis Químico

El análisis químico de una diatomita, útil en algunos casos, no es un efectivo criterio de predicción de funcionalidad para muchas operaciones. Lógicamente, es de esperar que el porcentaje de componentes no silíceos sea el más bajo posible; lo mejor sería asegurar su ausencia, que es esencial en muchos casos. Por ejemplo, la sola indicación de un alto contenido de sílice (SiO_2), no es un signo suficiente de una materia prima adecuada. Entonces, la pureza química es un atributo que viene a ser más importante únicamente después de que hayan sido definidas otras indicaciones apropiadas, que reflejen el funcionamiento del producto en un específico o similar grupo de aplicaciones.

Por espectrofotometría de absorción atómica, se determinaron los siguientes elementos: Hierro, Magnesio, Aluminio, Sodio, Calcio, Potasio y Silicio. El análisis de cloruros y sulfatos se efectúa en muestras aparte mediante métodos químicos tradicionales. Los cloruros se determinan volumétricamente con nitrato de plata y los sulfatos gravimétricamente precipitándolos con cloruro de Bario.

La Tabla 5.1., nos muestra los análisis químicos de dos muestras de tierras de diatomeas de la zona denominada "Cueva de los Incas".

Tabla 5.1.

Análisis Químicos de Diatomita INCA

<u>Elemento</u>	<u>% en Peso</u>	
	<u>Diatomeas en polvo</u>	<u>Diatomeas Consolidadas</u>
SiO ₂	71.00	64.00
K ₂ O	1.44	0.96
Na Cl	2.80	1.40
Na ₂ O	3.74	1.33
Ca O	1.55	6.95
Mg O	0.82	0.85
Al ₂ O ₃	4.72	6.61
CaSO ₄	4.95	5.66
Fe ₂ O ₃	2.14	2.10
	(Posiblemente Fe ⁺²)	

No se intentó ninguna forma de concentración, porque se deseaba obtener muestras representativas en cada caso. Además, porque en el laboratorio de química de la Universidad de Piura se viene desarrollando un tema de investigación tendiente a evaluar cualitativamente las diatomeas de Bayóvar, así como los métodos de tratamiento y purificación; razón por lo que no se estimó conveniente la realización de más análisis químicos en el presente trabajo.

5.2.2. Análisis Mineralógico

El análisis de los componentes minerales existentes en las muestras de diatomeas, se ha verificado utilizando técnicas de análisis térmico diferencial DTA (cualitativo) y difracción de rayos - X.

El análisis térmico diferencial y gravimétrico de dos muestras, una pulverizada y una consolidada natural, proveniente de la "Cueva de los Incas", se representa en las figuras 5.2 y 5.3 respectivamente. La lectura de la temperatura en los diagramas, puede obtenerse utilizando la Tabla 5.2., que nos da la equivalencia de las divisiones del eje vertical con la temperatura. En ambos diagramas se representa con:

- . TG : Pérdida de peso (cualitativo)
- . DTG : Derivada del registro gravimétrico
- . DTA : Diferencia de temperatura entre la tierra de diatomeas y un patrón térmicamente inerte (corindón).

En la figura 5.2., correspondiente a la muestra pulverizada, se pueden apreciar dos tipos de reacciones:

. A baja temperatura: La pérdida de agua de la sílice amorfa (no cristalina) a la temperatura de 150°C (+ 5.2 divisiones) con reacción endotérmica y la reacción exotérmica debida a la combustión de materia orgánica, a la temperatura de 300°C (+ 12 divisiones).

. A alta temperatura: La pérdida de peso del registro TG (gravimétrico) continúa aún a temperaturas superiores a los 800°C. La causa puede ser la descomposición de cloruros y sulfatos presentes en la muestra.

DATA.

Polvo de Diatomeas.

Diatomeas en polvo

Maña: 138.4 mg.

Flujo: Aire

100
200

90
180

80
160

70
140

60
120

50
100

40
80

30
60

20
40

10
20

TG

Exothermic

Endothermic

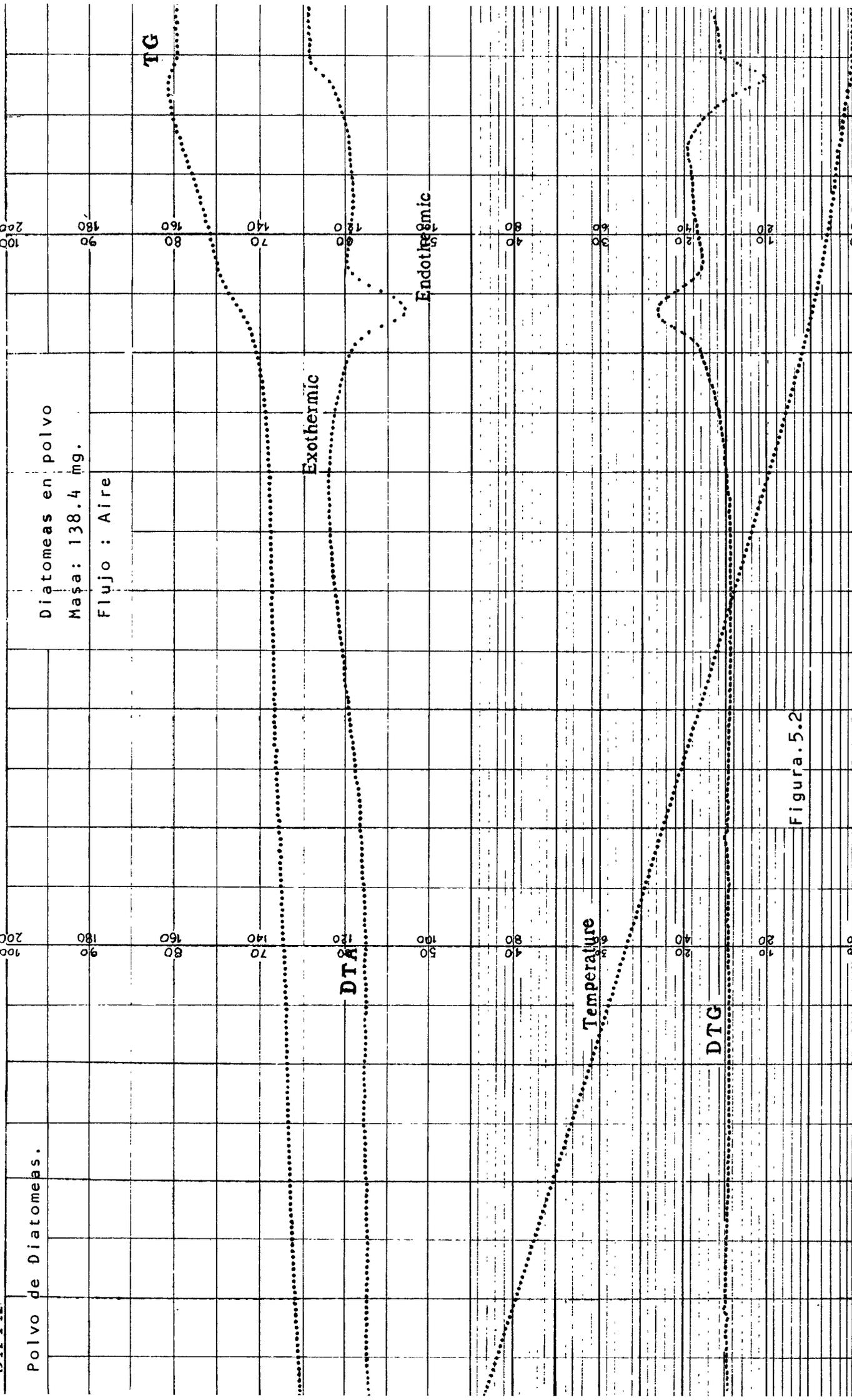
DTA

Temperature

DTG

Figura.5.2

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21



DATA

Tierra de Diatomeas consolidadas.

Masa: 134.3 mg.

Flujo : Aire.

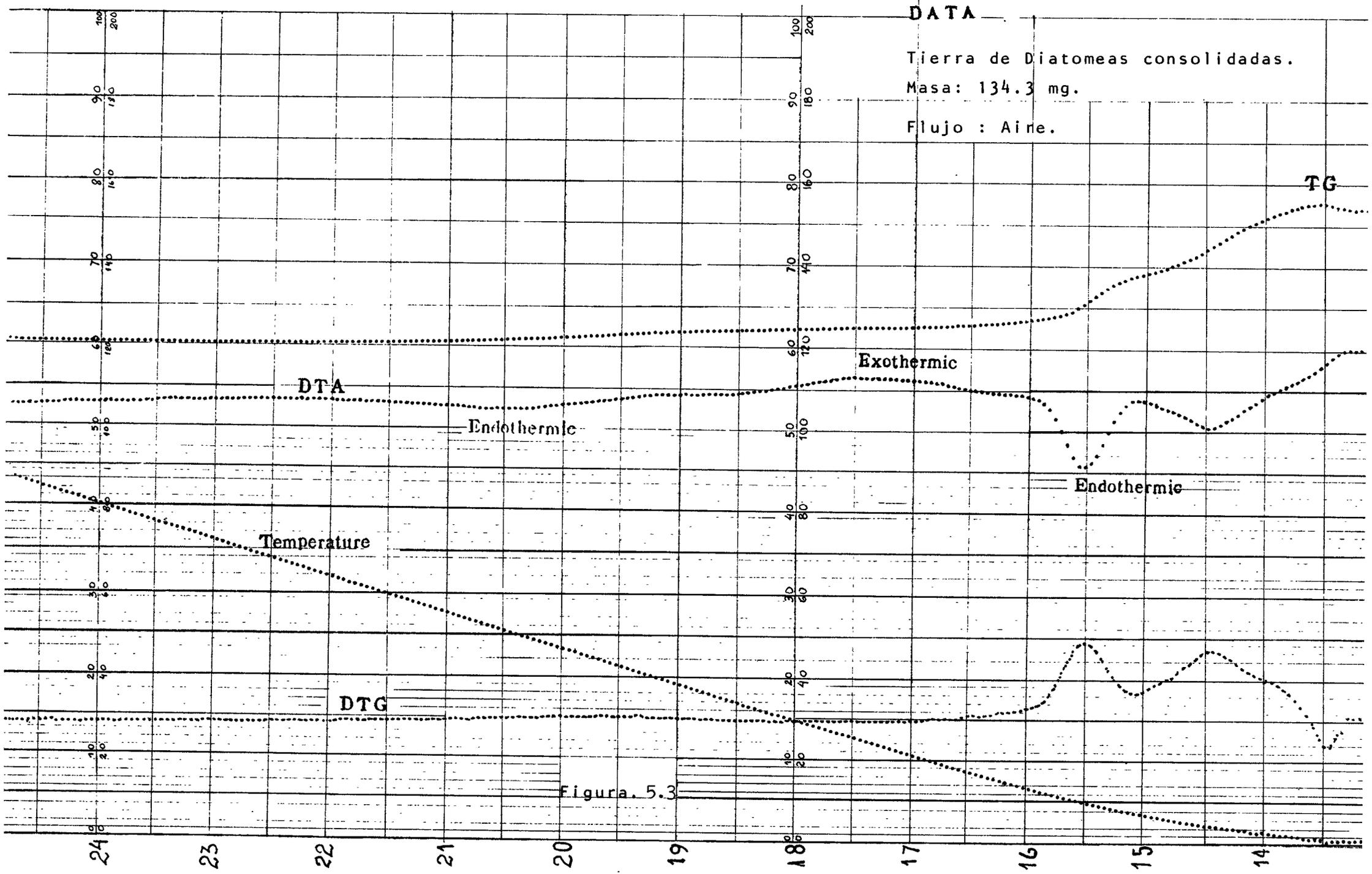


Figura. 5.3

Tabla 5.2.

Tabla para el cálculo de la temperatura de los diagramas de análisis térmico de las figuras 5.2 y 5.3

<u>Temperatura °C</u>	<u>Número de Divisiones</u>	<u>Temperatura °C</u>	<u>Número de Divisiones</u>
0	0.0+	900	45.9+
50	1.5+	950	49.1+
100	3.2+	1000	52.4+
150	5.2+	1050	55.7+
200	7.3+	1100	59.1+
250	9.6+	1150	62.5+
300	12.0+	1200	66.0+
350	14.5+	1250	69.4+
400	17.0+	1300	72.9+
450	19.6+	1350	76.4+
500	22.3+	1400	79.8+
550	25.0+	1450	83.3+
600	27.8+	1500	86.8+
650	30.7+	1550	90.2+
700	33.6+	1600	93.6+
750	36.6+	1650	97.0+
800	39.6+	1700	100.5-
850	42.7+		

Ejemplo: 17 divisiones igual a 400°C.

De la figura 5.3., correspondiente a la muestra de diatomeas consolidadas, no se puede afirmar la existencia de reacciones a alta temperatura (mayor de 800°C), ya que el registro TG tiende a estabilizarse a temperaturas superiores a los 700°C. No obstante, a baja temperatura se aprecian tres reacciones:

- . Dos endotérmicas: una a 150°C (deshidratación de la Sílice) y otra a 550°C (deshidratación de arcillas).
- . Una exotérmica: combustión de materia orgánica.

El análisis mediante difracción de rayos - X (Fig. 5.4), nos revela la existencia, en la muestra de diatomeas pulverulenta, de tres especies minerales: Cuarzo (SiO_2), Cloruro de Sodio (NaCl) y Sulfato de Calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot x \text{H}_2\text{O}$).

La presencia de cloruros se confirmó lavando una pequeña cantidad de muestra con agua. En el difractograma del residuo seco no aparece el pico correspondiente al cloruro de sodio (Fig. 5.5).

El análisis por difracción de rayos - X, además de identificarnos cualitativamente las diferentes especies minerales, la intensidad relativa de los picos nos indica el grado de abundancia dentro de la muestra.

En lo que respecta a la sílice, la única estructura cristalina que nos aparece es el cuarzo, y además en muy pequeña proporción. Esto nos quiere decir que la mayoría de SiO_2 presente en la muestra se encuentra bajo la forma de sílice amorfa (no cristalina).

Fig. 5.4.- Tierra de Diatomeas en polvo. DR-X

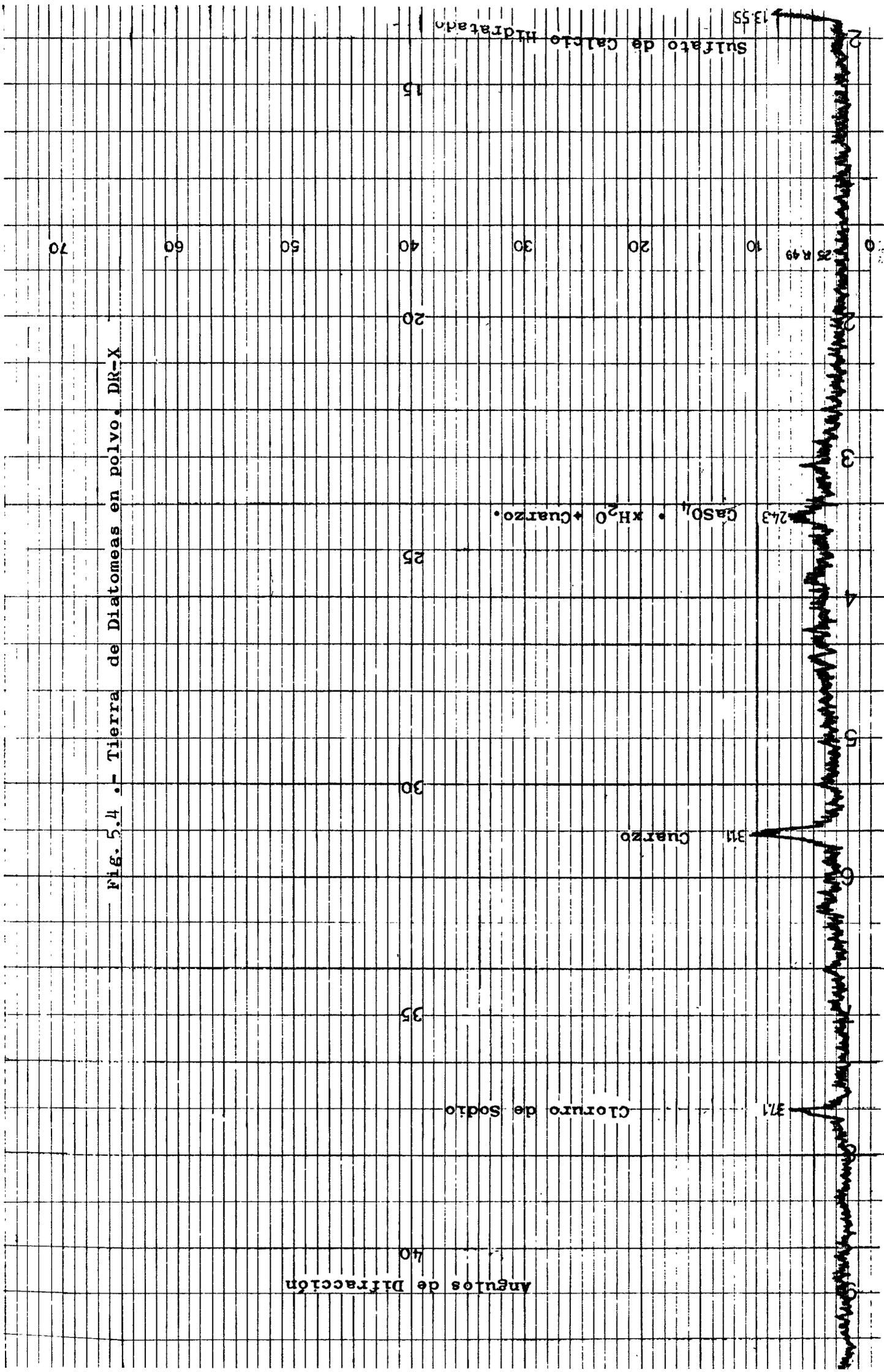
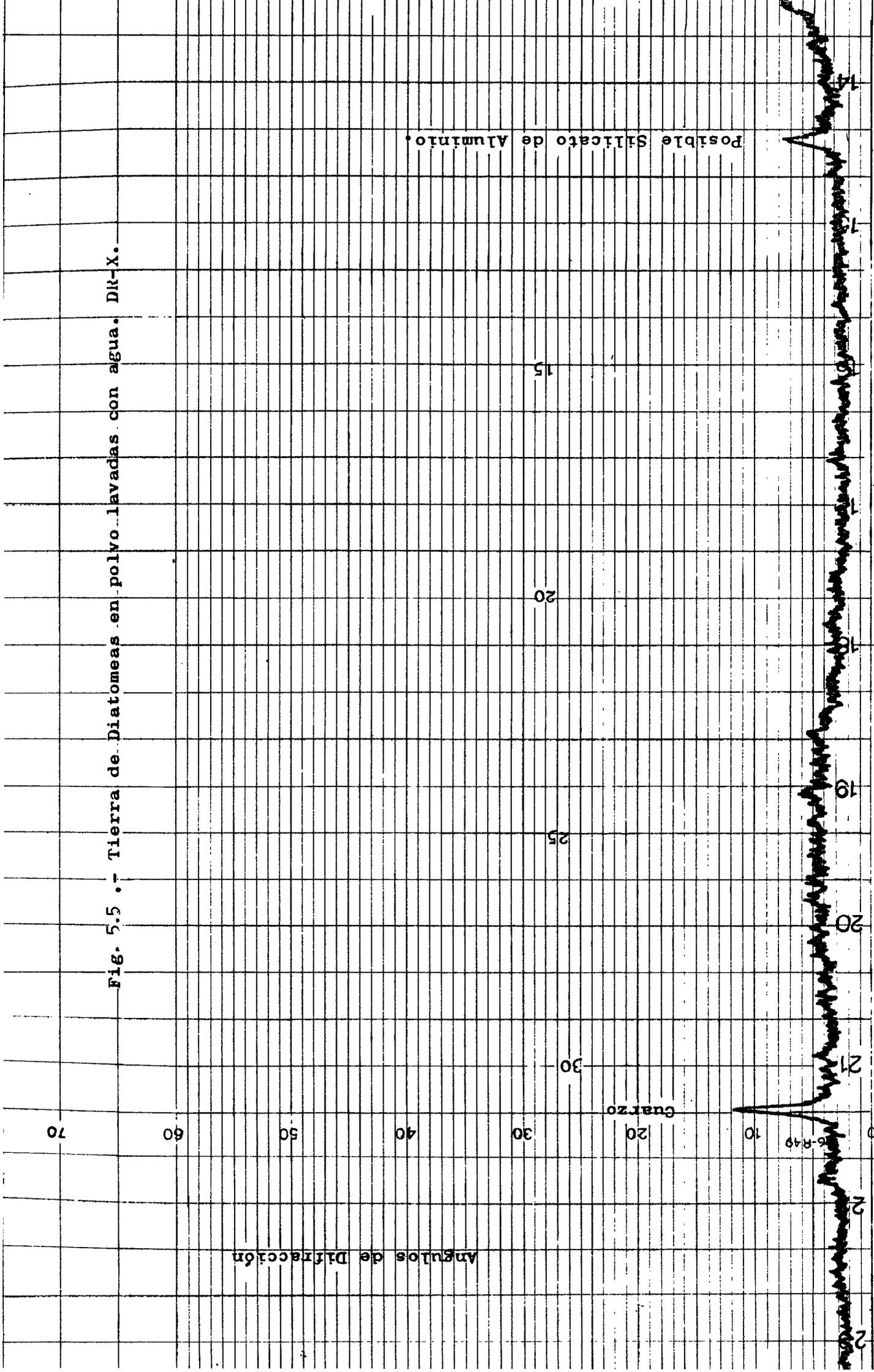


Fig. 5.5 .- Tierra de Diatomeas en polvo lavadas con agua. DR-X.



5.2.3. Pérdida porcentual de peso en función de la temperatura de tratamiento

El presente análisis, pretende cuantificar la variación porcentual promedio de peso que experimentan las diatomeas después del calentamiento a temperatura y tiempo determinados.

El procedimiento seguido para determinar la pérdida porcentual de peso a una temperatura determinada después de secado, se puede resumir en los pasos siguientes:

- 1.- Se toma un trozo de la muestra cuyo volumen global sea mayor o igual a 200 cm³ y se limpia su superficie externa.
- 2.- Se seca previamente a 110 ± 2°C durante 2 horas, después se pone al desecador durante 1 hora, luego se pesa.
- 3.- Se repite el paso 2, hasta peso constante y se registra el peso (W₁).
- 4.- Se somete a calentamiento hasta una temperatura T durante 2 horas, se saca y se pone al desecador durante 1 hora y luego se pesa (W₂).
- 5.- La pérdida porcentual de peso, sobre muestra seca a 110°C, será:

$$\% \text{ pérdida de peso} = \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \times 100$$

Dada la heterogeneidad de las muestras se operó estadísticamente, al objeto de obtener valores promedios de la pérdida porcentual de peso en función de la temperatura de tratamiento. Es decir, ensayar diferentes

muestras a una misma temperatura y registrar su pérdida de peso, sobre muestra seca a 110°C.

El análisis de la pérdida porcentual promedio de peso de las muestras estudiadas, se representa en la figura 5.6., que se corresponden con las Tablas 5.3 y 5.4 respectivamente.

La figura 5.6-a, que corresponde a la Tabla 5.3., representa el análisis de la pérdida porcentual promedio de peso que experimentan las muestras de diatomeas consolidada natural provenientes del lugar denominado "Cueva de los Incas". Se puede observar que, a temperaturas superiores a los 900°C, este porcentaje tiende a mantenerse constante e igual al 6%.

En la figura 5.6-b, correspondiente a la Tabla 5.4., se representa el análisis de la variación porcentual promedio de peso que experimenta la diatomita consolidada natural proveniente del Area I. Se aprecia que, a partir de los 900°C, tiende a estabilizarse y lo hace con un 8.5%, después de secado.

También se pudo observar que después del tratamiento térmico a temperaturas iguales o superiores a 800°C, las caras de las probetas presentan grietas, producto de la contracción que éstas experimentan.

A juzgar por las desviaciones de los valores respecto de la media se puede decir que: tanto la diatomita Inca como la del Area I a temperaturas comprendidas dentro del rango de 500 a 700°C, presenta las mayores desviaciones ($\bar{\sigma}_n$), lo que indica que el contenido de impurezas que a es-

tas temperaturas se deshidratan, que por el análisis térmico diferencial son arcillas, no es uniforme dentro del mismo depósito.

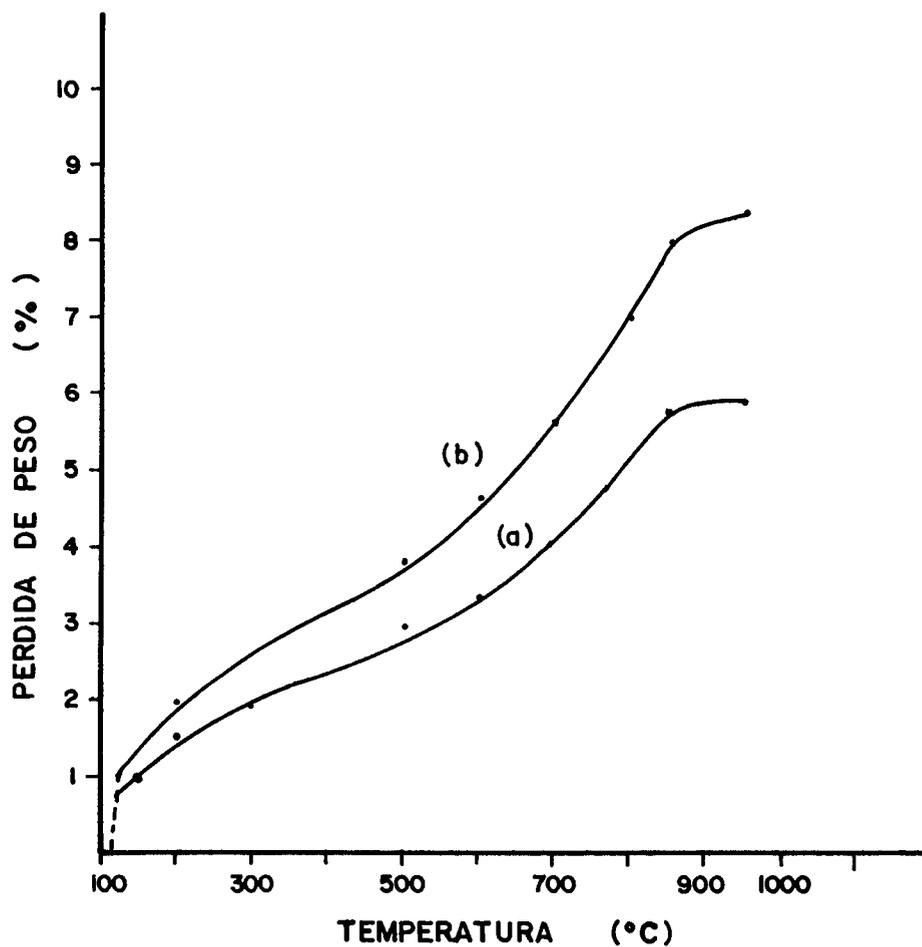


Fig. 5.6. Variación porcentual promedio de la pérdida de peso, sobre muestra seca a 110°C, con la temperatura de cocción de la Tierra de Diatomeas del Desierto de Sechura.

(a) Zona Inca ; (b) Area I.

Tabla 5.3.

Pérdida porcentual de peso, sobre muestra seca a 110°C, a diferentes temperaturas de cocción de la Diatomita en el Desierto de Sechura: Zona Inca

	<u>120°C</u>	<u>200°C</u>	<u>300°C</u>	<u>400°C</u>	<u>500°C</u>	<u>600°C</u>	<u>700°C</u>	<u>750°C</u>	<u>800°C</u>	<u>850°C</u>	<u>900°C</u>	<u>950°C</u>
	0.59	1.03	1.38	1.47	1.53	1.98	2.77	2.93	4.00	5.42	5.42	5.44
	0.63	1.28	1.50	1.52	1.80	2.18	3.43	3.64	4.60	5.82	5.83	5.83
	0.38	1.58	2.15	2.17	3.98	4.53	4.95	5.01	5.21	6.65	6.67	6.76
	0.11	1.76	1.95	2.01	3.03	3.68	5.16	5.20	5.36	5.63	5.90	5.90
	0.11	0.99	1.56	1.97	2.52	2.85	4.11	4.38	5.09	5.22	5.27	5.27
	1.62	1.00	1.72	2.11	2.17	2.22	3.55	3.76	4.77	4.86	4.89	4.93
	0.14	1.00	1.97	2.08	2.21	2.31	3.16	3.28	4.54	5.49	5.50	5.53
	1.09	2.00	2.02	3.07	3.18	3.58	4.02	4.37	5.58	6.26	6.35	6.35
	0.27	1.88	2.01	2.98	4.01	4.27	5.02	5.36	6.04	6.53	6.73	6.74
	1.24	1.71	1.98	3.08	3.13	3.59	4.17	5.18	5.93	6.03	6.32	6.32
	1.29	1.65	2.25	2.98	3.06	3.86	4.03	4.58	5.47	5.47	5.47	5.49
	<u>1.07</u>	<u>1.55</u>	<u>2.24</u>	<u>2.88</u>	<u>4.72</u>	<u>4.83</u>	<u>4.95</u>	<u>5.28</u>	<u>5.53</u>	<u>5.89</u>	<u>5.97</u>	<u>6.02</u>
PROM.:	<u>0.71</u>	<u>1.45</u>	<u>1.89</u>	<u>2.36</u>	<u>2.95</u>	<u>3.32</u>	<u>4.11</u>	<u>4.41</u>	<u>5.18</u>	<u>5.77</u>	<u>5.86</u>	<u>5.88</u>
σ_n	0.51	0.36	0.28	0.58	0.92	0.95	0.75	0.80	0.58	0.51	0.55	0.55

Tabla 5.4.

Pérdida porcentual de peso, sobre muestra seca a 110°C, a diferentes temperaturas de cocción de la Daitomita del Desierto de Sechura: Area I

<u>Zona de Muestreo</u>	<u>120°C</u>	<u>200°C</u>	<u>300°C</u>	<u>400°C</u>	<u>500°C</u>	<u>600°C</u>	<u>700°C</u>	<u>800°C</u>	<u>850°C</u>	<u>900°C</u>	<u>950°C</u>
I	0.87	1.87	2.32	3.26	3.36	4.56	5.12	7.07	8.01	8.30	8.39
	0.91	1.85	2.52	2.98	3.38	4.54	5.28	7.36	7.90	8.18	8.37
	0.79	1.72	2.47	3.01	3.71	4.57	5.82	6.67	7.75	8.20	8.34
	0.93	1.90	2.62	3.08	4.02	4.81	5.21	6.97	7.80	8.28	8.36
	1.07	1.87	2.40	3.27	3.80	4.39	5.75	7.15	8.15	8.21	8.40
	1.27	2.15	2.51	3.01	3.67	4.29	5.98	7.06	8.10	8.25	8.34
	0.99	1.76	2.65	3.15	3.75	4.16	5.61	6.89	8.02	8.25	8.40
	0.98	1.97	2.70	3.27	3.66	4.58	5.15	6.87	8.15	8.33	8.45
	1.03	2.05	2.78	3.25	3.92	4.67	5.87	7.05	7.81	8.30	8.39
	1.15	1.85	2.35	3.15	3.82	4.87	5.91	7.15	7.84	8.20	8.36
II	0.97	1.92	2.60	3.29	3.95	4.70	5.65	7.16	8.17	8.27	8.35
	0.87	2.05	2.66	3.10	3.81	5.02	5.77	7.16	7.92	8.18	8.33
	1.27	2.11	2.53	3.02	3.97	5.10	5.40	6.84	8.15	8.21	8.34
	1.15	1.72	2.57	3.34	3.92	5.07	5.88	6.93	8.02	8.27	8.38
	1.25	1.80	2.70	3.25	4.15	4.72	5.86	6.75	7.85	8.32	8.34
Promedio :	<u>1.03</u>	<u>1.91</u>	<u>2.56</u>	<u>3.16</u>	<u>3.79</u>	<u>4.67</u>	<u>5.62</u>	<u>7.01</u>	<u>7.98</u>	<u>8.25</u>	<u>8.37</u>
σ_n	0.15	0.13	0.13	0.12	0.21	0.27	0.29	0.18	0.14	0.05	0.03

5.2.4. Determinación de la Superficie Específica

Se adjunta la Tabla 5.5., en donde se muestra el resultado obtenido, para una muestra de diatomita en polvo, proveniente de la "Cueva de los Incas", de la superficie específica (dato obtenido sobre muestra seca a 110°C). El valor de la superficie específica obtenido es de 22.6 m²/g.

Sobre la magnitud alcanzada por este parámetro es preciso realizar la siguiente consideración: El valor de la superficie específica es extraordinariamente grande si la comparamos con la obtenida en la arena de cuarzo natural, molida hasta alcanzar tamaños de partículas inferiores de 100 micras, cuyo valor no llega a alcanzar siquiera a 1 m² por gramo de muestra. Ello nos indica la elevada capacidad de reacción que pueden presentar las diatomeas analizadas, tanto en estado sólido como en medio acuoso.

5.2.5. Determinación de la densidad real o cristalográfica y su variación con la temperatura

El tratamiento teórico de la densidad fue expuesto en el Capítulo III, apartado 3.2.3., por lo que aquí se verán algunos aspectos considerados de importancia.

La densidad real es una propiedad primaria de la diatomita, usualmente su valor es de 2.0 g/cm³ para la diatomita natural y 2.30 g/cm³ para la diatomita calcinada.

TABLA 5.5: SURFACE AREA ANALYSIS DATA SHEET
for
SURFACE AREA ANALYZERS
Catalog Numbers 220/00000/0X and 220/50000/0X

Sample Identification Tierra de Diatomeas. Piura (Perú) DATE 12 - 10 - 1977
 BY M. P. Sandoval

Adsorbate N₂ (NITROGENO)

Weights:

Sample Tube Number _____

Sample, Sample Tube
& Stopper, W₁ _____ g

Outgas Temperature 110°C °C

Sample Tube & Stopper, W₂ _____ g

Outgas Time 30' minutes

Sample, W_s _____ g

Nº ANALISIS PESO DE MUESTRA

1 1.5328 g.

2 2.6902 g.

<u>ANALYSIS NUMBER</u>	<u>TOTAL SURFACE AREA (m²)</u>	<u>SPECIFIC * SURFACE AREA (m²/g)</u>
1	<u>34.7</u>	<u>22.6</u>
2	<u>60.8</u>	<u>22.6</u>
Average	<u> </u>	<u>22.6</u>

* The specific surface area of the sample is obtained by dividing the total surface area, indicated on the counter at the completion of an analysis, by the sample weight W_s.

El valor de la densidad real es un parámetro de gran utilidad en el momento de iniciar ensayos de consolidación de las diatomeas con vistas a la producción de ladrillos aislantes y de materiales refractarios. Hay que tener presente que la porosidad total, $\% P_T$, del artículo consolidado es función de la densidad real y de la densidad global o geométrica, según la Ec. (3.7).

La determinación de la densidad real se realizó por el método del picnómetro, según la norma Española UNE 61.032-75 y para determinar su variación con la temperatura de tratamiento, se precede según esta norma pero hay que mantener la muestra a la temperatura T durante 2 horas.

En la Tabla 5.6., se muestra el resultado de la determinación de la densidad real con el autopicnómetro, dato obtenido sobre muestra seca a 110°C, de una muestra de diatomita de la zona Inca.

Y en la Tabla 5.7., a manera de ejemplo, los resultados de 2 determinaciones de densidad real por el método de picnómetro según la norma UNE 61.032-75.

TABLA 5.6 : DENSITY DATA SHEET
for
AutoPycnometer

Sample Identification Tierra de Diatomeas Seca Date 12 - Junio - 1998
Piura (Perú) By M^a P. García López

Weights:	First Weighing	Second Weighing
Sample Cup & Sample, W	<u>21.8843</u> g	<u>21.2406</u> g
Sample Cup, W _c - - - -	<u>15.6283</u> g	<u>15.6271</u> g
Sample, W _s = W - W _c	<u>6.256</u> g	<u>5.614</u> g

Evacuation Time _____ minutes + _____ minutes = 3' minutes

ANALYSIS NUMBER	VOLUME, SAMPLE, $V_s = \frac{W_s}{\rho_s}$ (cm ³)	DENSITY, ρ_s (g/cm ³)
1	_____	<u>2.366</u>
2	_____	<u>2.367</u>
3	_____	<u>2.366</u>
4	_____	<u>2.367</u>
5	_____	<u>2.367</u>
Average	_____	<u>2.367</u>

Tabla 5.7.

Densidad real por el Método del Picnómetro

- . Identificación de la Muestra : Tierra de diatomeas de Bayóvar
- . Temperatura de tratamiento : En verde (secada a 110°C)

ENSAYO N° 1

Parámetro N° Análisis	Z O N A			
	INCA		AREA I	
	1	2	1	2
a (g)	23.8914	24.0216	23.3924	23.4374
b (g)	26.2774	26.2524	26.3090	26.1888
c (g)	49.9210	49.8095	49.5038	49.6873
d (g)	48.5479	48.5252	47.9343	48.2063
Temp. del baño (°C)	31	31	30	30
P	0.995348	0.995348	0.995646	0.995646
D_r (g/cm ³)	<u>2.3447</u>	<u>2.3454</u>	<u>2.1557</u>	<u>2.1563</u>
D_r (g/cm ³) Promedio :	2.345		2.156	

a : Peso del picnómetro vacío

b : Peso del picnómetro + polvo

c : Peso del picnómetro + polvo + líquido

d : Peso del picnómetro lleno de líquido

P : Peso específico del líquido a la temperatura del baño (comparado con el del agua destilada a 4°C).

$$D_r = \text{Densidad real} = \frac{(b - a)}{(d - a) - (c - d)} P$$

El análisis de la variación promedio de la densidad real de las muestras estudiadas, se representa en el figura 5.7., que se corresponde con las Tablas 5.8 y 5.9.

La figura 5.7-a, que se corresponde con la Tabla 5.8., representa la variación promedio de la densidad real de la diatomita Inca. Sobre la variación de la magnitud de este parámetro, se puede apreciar que crece según dos tramos claramente definidos y que a partir de los 600°C esta magnitud crece más rápidamente.

La figura 5.7-b, que se corresponde con la Tabla 5.9., representa la variación promedio de la densidad real de la diatomita del área I. Se puede apreciar claramente que a partir de los 700°C esta magnitud crece mucho más rápidamente que en el primer tramo (110 a 700°C).

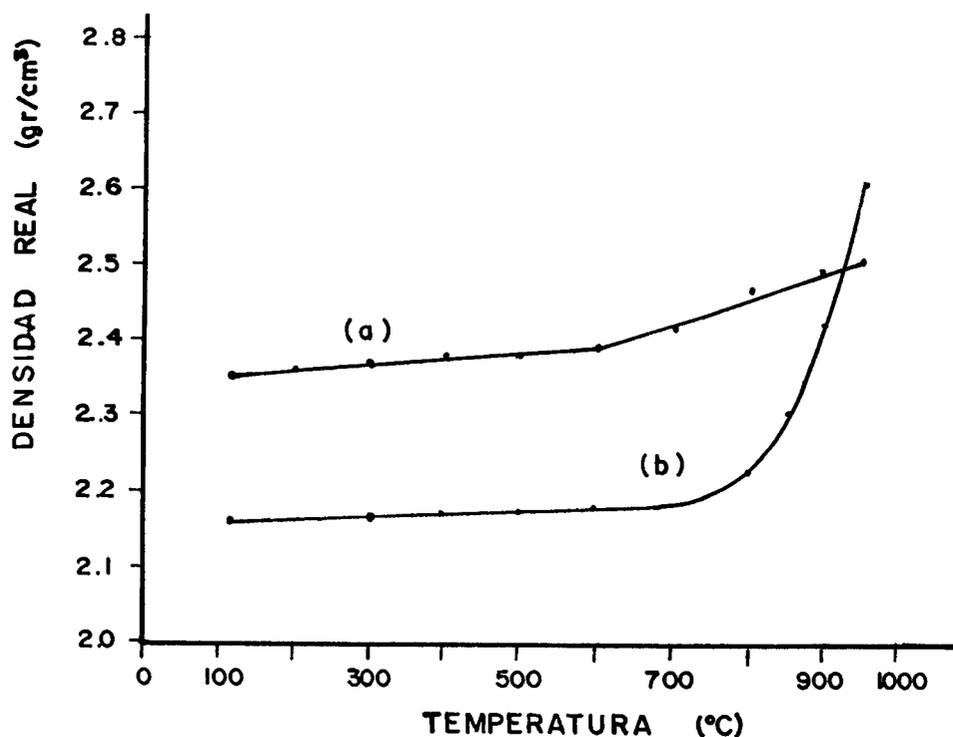


Fig. 5.7. Variación promedio de la densidad real de la Tierra de Diatomeas del Desierto de Sechura con la temperatura de cocción. (a) Zona Inca; (b) Área I.

Tabla 5.8.Densidad real de la Diatomita "Inca" a diferentes temperaturas de cocción

<u>Temp. (°C)</u>	<u>Densidad Real (g/cm³)</u>				<u>Promed.</u>	<u>σ_n</u>
110	2.345	2.344	2.361	2.362	2.353	0.0085
200	2.356	2.363	2.360	2.361	2.360	0.0026
300	2.371	2.369	2.368	2.367	2.369	0.0015
400	2.378	2.379	2.377	2.378	2.378	0.0007
500	2.380	2.379	2.380	2.381	2.380	0.0007
600	2.427	2.390	2.377	2.375	2.392	0.0209
700	2.413	2.415	2.423	2.421	2.418	0.0041
800	2.463	2.462	2.469	2.470	2.466	0.0035
850	2.483	2.481	2.459	2.461	2.471	0.0110
900	2.505	2.503	2.470	2.476	2.489	0.0157
950	2.519	2.506	2.500	2.512	2.509	0.0007

Tabla 5.9.

Densidad real de la Diatomita "Area I" a diferentes temperaturas de cocción

<u>Temp.(°C)</u>	<u>Densidad Real g/cm³</u>				<u>Promed.</u>	<u>σ_n</u>
	<u>Zona de Muestreo I</u>	<u>Zona de Muestreo II</u>	<u>Zona de Muestreo III</u>	<u>Zona de Muestreo IV</u>		
110	2.156	2.157	2.158	2.159	2.158	0.0011
200	2.159	2.159	2.158	2.159	2.159	0.0004
300	2.161	2.162	2.162	2.163	2.162	0.0007
400	2.166	2.167	2.167	2.168	2.167	0.0007
500	2.174	2.175	2.169	2.168	2.172	0.0030
600	2.177	2.176	2.174	2.175	2.176	0.0011
700	2.181	2.182	2.189	2.188	2.185	0.0035
800	2.224	2.225	2.232	2.231	2.228	0.0035
850	2.301	2.298	2.312	2.310	2.305	0.0059
900	2.420	2.421	2.424	2.423	2.422	0.0016
950	2.611	2.611	2.614	2.613	2.612	0.0013

5.2.6. Determinación de la densidad global o geométrica y su variación con la temperatura de tratamiento

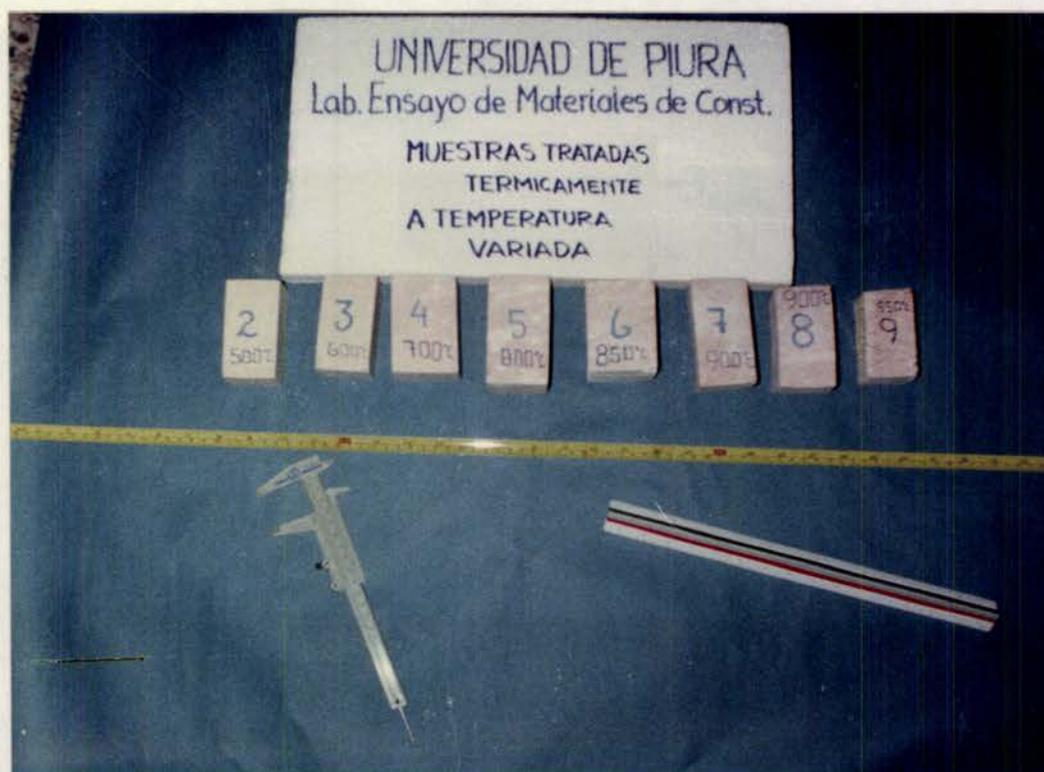
Los aspectos teóricos se han expuesto en el Capítulo III, apartado 3.2.3., pero es preciso hacer un comentario previo.

El cuantificar la densidad global o geométrica nos indica entre otras cosas, el grado de contaminantes sólidos tales como arena, arcilla y otras impurezas. Asimismo, refleja el tipo de diatomeas y el endurecimiento a través del grado de consolidación. Es deseable un bajo grado de consolidación. Las diatomeas altamente consolidadas son difíciles de moler y trae como consecuencia una degradación de la estructura esquelética. La mejor calidad de diatomita muestra un peso relativamente bajo y posee, usualmente, una densidad global que varía entre 0.32 y 0.55 g/cm³ (20 y 34 lb/ft³). Además este parámetro es útil en la determinación de la porosidad total, % P_T, según la Ec. (3.7).

Para determinar la magnitud de este parámetro, así como la variación permanente de la densidad global que experimenta la diatomita consolidada natural, al ser sometida a diferentes temperaturas de tratamiento durante 2 horas, se procedió según la Norma ASTM C-303-82 (ITINTEC 331.016-77) (ver Fig. 5.8) y también se hicieron algunas determinaciones según la Norma Española UNE 61.034-75 (ver Fig. 5.9), a manera de comprobación.



(a)



(b)

Fig. 5.8. Bloques de Diatomeas para determinación de densidad global (ASTM C-303-82).
 (a) En Verde ; (b) Tratados térmicamente.



Fig. 5.9. Disposición del equipo durante la Fase de Saturación de la probeta, según Norma UNE 61.034-75.

La Fig. 5.10-a, nos muestra la variación promedio de la densidad global o geométrica del material diatomáceo consolidado natural proveniente de la zona Inca y la Tabla 5.10., se corresponde con esta figura. Sobre la magnitud de este parámetro se puede decir que en promedio toma un valor de 0.54 g/cm^3 para la muestra seca a 110°C ; dicho valor disminuye con la temperatura de tratamiento hasta los 600°C en donde alcanza el mínimo valor de 0.49 g/cm^3 y después comienza a aumentar.

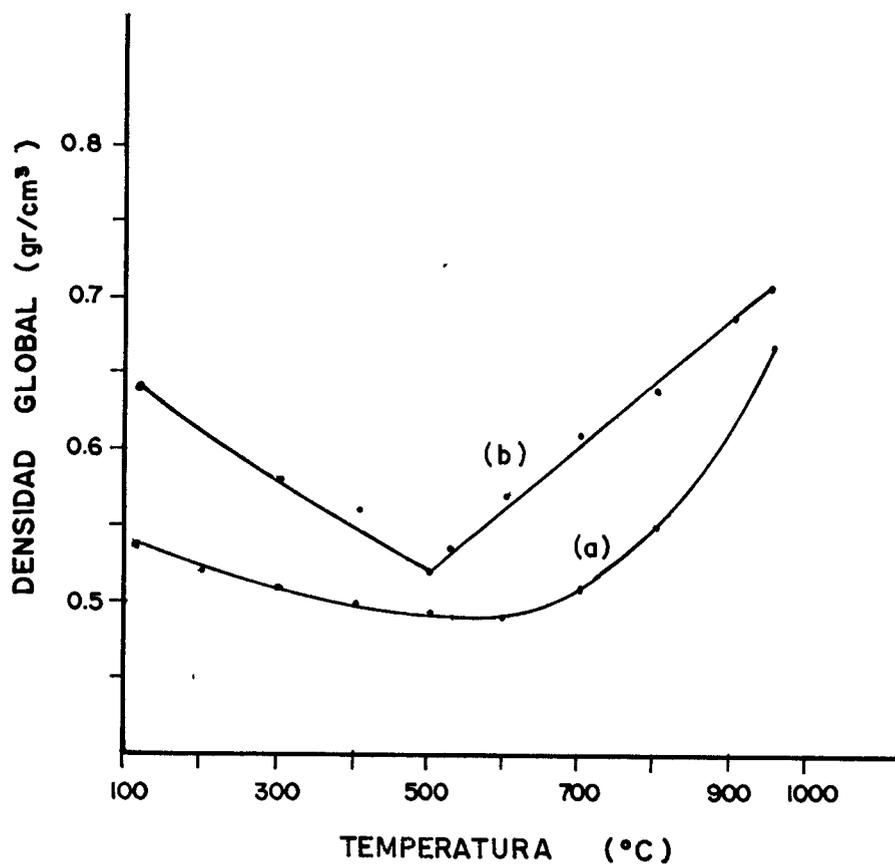


Fig. 5.10. Variación Promedio de la Densidad Global de la Tierra de Diatomeas del Desierto de Sechura, con la temperatura de tratamiento.

(a) Zona Inca

(b) Area I

Tabla 5.10.

Densidad Global (g/cm³) de la Diatomita "Inca" a diferentes temperaturas de tratamiento (°C)

	<u>110</u>	<u>200</u>	<u>300</u>	<u>400</u>	<u>500</u>	<u>600</u>	<u>700</u>	<u>800</u>	<u>900</u>	<u>950</u>
	0.47	0.59	0.56	0.49	0.54	0.53	0.59	0.49	0.77	0.79
	0.51	0.51	0.48	0.49	0.47	0.50	0.46	0.69	0.86	0.65
	0.55	0.58	0.52	0.52	0.53	0.75	0.79	0.60	0.75	0.60
	0.61	0.53	0.48	0.49	0.53	0.46	0.51	0.48	0.57	0.70
	0.53	0.52	0.56	0.47	0.51	0.50	0.53	0.65	0.59	0.68
	0.61	0.53	0.50	0.51	0.47	0.45	0.51	0.52	0.58	0.65
	0.53	0.46	0.47	0.50	0.52	0.48	0.44	0.55	0.53	0.60
	0.55	0.49	0.53	0.48	0.47	0.53	0.49	0.57	0.65	0.67
	0.53	0.46	0.52	0.49	0.45	0.41	0.50	0.55	0.61	0.71
	0.48	0.54	0.47	0.53	0.44	0.42	0.52	0.53	0.60	0.72
	0.51	0.45	0.52	0.48	0.45	0.47	0.50	0.52	0.59	0.68
	0.61	0.53	0.51	0.49	0.51	0.47	0.50	0.49	0.51	0.67
	0.56	0.52	0.48	0.45	0.48	0.46	0.51	0.66	0.67	0.72
	0.55	0.52	0.55	0.52	0.52	0.49	0.51	0.54	0.71	0.62
	0.54	0.53	0.50	0.52	0.48	0.53	0.40	0.53	0.75	0.70
	0.50	0.53	0.46	0.49	0.52	0.50	0.46	0.53	0.55	0.60
	0.54	0.52	0.51	0.52	0.51	0.47	0.48	0.54	0.57	0.63
	0.55	0.50	0.47	0.52	0.50	0.50	0.51	0.54	0.53	0.70
	0.52	0.48	0.52	0.52	0.52	0.46	0.51	0.54	0.50	0.60
	<u>0.46</u>	<u>0.57</u>	<u>0.55</u>	<u>0.47</u>	<u>0.48</u>	<u>0.42</u>	<u>0.50</u>	<u>0.56</u>	<u>0.55</u>	<u>0.62</u>
Prom.:	<u>0.54</u>	<u>0.52</u>	<u>0.51</u>	<u>0.50</u>	<u>0.49</u>	<u>0.49</u>	<u>0.51</u>	<u>0.55</u>	<u>0.62</u>	<u>0.67</u>
σ_n	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.07	0.07	0.06	0.10	0.05

Tabla 5.11.

Densidad Global (g/cm³) de la Diatomita del Area I con la temperatura de tratamiento

Zona de Muestreo	110°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	950°C
I	0.61	0.61	0.60	0.52	0.54	0.56	0.60	0.64	0.64	0.72
	0.68	0.67	0.57	0.56	0.52	0.56	0.63	0.59	0.70	0.66
	0.68	0.60	0.59	0.53	0.54	0.58	0.61	0.64	0.70	0.75
	0.62	0.57	0.56	0.58	0.54	0.55	0.60	0.65	0.72	0.77
	0.69	0.60	0.57	0.60	0.53	0.57	0.60	0.64	0.69	0.76
	0.62	0.60	0.56	0.52	0.50	0.58	0.62	0.63	0.69	0.71
	0.60	0.63	0.60	0.53	0.49	0.56	0.60	0.65	0.72	0.66
	0.69	0.60	0.62	0.56	0.49	0.56	0.63	0.64	0.68	0.75
II	0.71	0.60	0.57	0.54	0.53	0.57	0.60	0.60	0.73	0.70
	0.63	0.65	0.60	0.57	0.53	0.56	0.61	0.63	0.67	0.70
	0.63	0.60	0.57	0.59	0.53	0.56	0.62	0.64	0.68	0.68
	0.64	0.62	0.56	0.55	0.53	0.59	0.59	0.65	0.70	0.72
	0.60	0.62	0.59	0.57	0.47	0.57	0.60	0.67	0.70	0.71
	0.60	0.60	0.60	0.56	0.53	0.55	0.61	0.66	0.65	0.69
	0.65	0.58	0.52	0.60	0.56	0.57	0.63	0.65	0.70	0.70
	0.65	0.58	0.54	0.57	0.53	0.56	0.60	0.67	0.65	0.70
Promedio	0.64	0.61	0.58	0.56	0.52	0.57	0.61	0.64	0.69	0.71
σ_n	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03

La figura 5.10-b, que se corresponde con la Tabla 5.11., refleja la variación promedio que experimenta la densidad global de la diatomita con solidada natural proveniente del Area I. Se puede observar que toma el valor de 0.64 g/cm³ para la muestra seca a 110°C y que este valor decrece hasta 0.52 g/cm³ a la temperatura de 500°C a partir de lo cual comienza a crecer en la forma que allí se aprecia.

También se pudo observar que después del tratamiento térmico a temperaturas iguales o superiores a 800°C, las caras de algunas probetas presentan grietas, producto de la contracción que éstas experimentan.

5.2.7. Porosidad Total (% P_T)

Se ha calculado haciendo uso de la densidad real y global, Tablas 5.8 a 5.11., que están relacionadas por la Ecuación (3.7), a saber:

$$\% P_T = \left(1 - \frac{D_g}{D_a}\right) 100$$

según Norma UNE 61.035-75 (ITINTEC 331.020-78). Estos valores se encuentran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12.

Variación promedio de la porosidad total (% P_T) de la Diatomita del Desierto de Sechura con la temperatura de tratamiento (°C)

<u>Zona</u>	<u>110</u>	<u>200</u>	<u>300</u>	<u>400</u>	<u>500</u>	<u>600</u>	<u>700</u>	<u>800</u>	<u>900</u>	<u>950</u>
Inca	77.1	78.0	78.5	79.0	79.2	79.5	78.9	77.7	75.1	73.3
Area I	70.3	71.7	73.2	74.2	76.1	73.8	72.1	71.3	71.5	72.8

Sobre la magnitud de los resultados obtenidos, se puede decir que al canzan su máximo valor cuando la diatomita Inca y del Area I han sido tra tadas a la temperatura de 600°C y 500°C respectivamente.

5.3. Propiedades Fundamentales Térmicas

En nuestro caso, es útil la determinación de la conductividad térmica de la tierra de diatomeas Sechuranas para tener una idea del rango de variación de este parámetro con la temperatura, que nos permita fundamentar más sus aplicaciones térmicas.

5.3.1. Medida de la Conductividad Térmica (K)

Los aspectos teóricos de este parámetro fueron tratados en el Capítulo III, apartado 3.3.3. Aquí se darán algunos alcances referentes a la preparación de la muestra y al método de medida.

A. Preparación de la Muestra

La muestra analizada consiste en una tierra de diatomeas de Bayóvar (de la zona Inca y del Area I) consolidada en el propio yacimiento y sinterizada (deshidratada y estabilizada térmicamente) a la temperatura de 850°C. Se corta la muestra de tal manera que podamos obtener dos bloques geoméricamente semejantes. Las dimensiones de las muestras pueden ser variables, pero han de tener una longitud mínima de 150 mm (en este caso

las medidas de los bloques fueron de altura: 75 mm; anchura: 75 mm y largo: 150 mm).

B. Método de Medida

La determinación de la conductividad térmica, K , del material se realiza según el método del hilo caliente, que fue sugerido por SCHLEIER MACHER en 1888, pero que no comenzó a desarrollarse hasta 1945, fecha en que VAN DER HELD y VAN DRUMEN, analizaron una técnica que permitía eliminar las fuentes de error y con la que se obtenían buenos resultados en la evaluación de K .

La conductividad térmica del material, K , puede calcularse según la siguiente expresión experimental:

$$K = \frac{q \ln(t_2 - t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)}$$

donde:

K , es la conductividad térmica del material

q , es el flujo de calor por unidad de longitud del hilo de calentamiento (KCal/m.h)

T_1 y T_2 , son las temperaturas obtenidas para los tiempos t_1 y t_2 respectivamente.

t_1 y t_2 , son los tiempos de medida de la temperatura.

El valor del flujo de calor, q , es el siguiente:

$$q = 0.86 RI^2 = 0.86 V \frac{I}{L}$$

donde:

R, es la resistencia eléctrica por unidad de longitud (ohmio/m) del hilo de calentamiento.

I, es el flujo de corriente eléctrica en el hilo de calentamiento (Amperios).

V, es el voltaje aplicado (Voltios).

L, es la longitud del hilo de calentamiento en el cual se aplica el voltaje, V.

El equipo utilizado es el SHO THERM QTM-F1 de al Casa SHOWA DENKO.

C. Resultados Experimentales

Los valores de K obtenidos a diferentes temperaturas de las muestras de diatomeas consolidada natural, se representan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13.

Resultados de Conductividad Térmica

<u>Temp.(°C)</u>	<u>K(KCal/h.m.°C)</u>
24	0.095
219	0.102
386	0.133
603	0.158
818	0.189
824	0.196

La correlación existente entre K y T, puede exponerse mediante la ecuación:

$$K = 0.0833 + 1.30 \times 10^{-4} T \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ (KCal/h.m.}^\circ\text{C)}$$

$$r \text{ (coeficiente de correlación)} = 0.98$$

D. Comparación de los resultados de la Conductividad Térmica de las Diatomeas de Bayóvar con otros aislantes térmicos comerciales

En el presente apartado se pretende realizar un estudio comparativo de los valores de K, de diferentes materiales aislantes en función de la temperatura. Además de la diatomita de Bayóvar, se han analizado:

- . El hormigón aislante, para el cual

$$K = 0.10 + 0.001035 T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{KCal/h.m.}^\circ\text{C}$$

- . La fibra cerámica de alta temperatura (T = 1400°C)

$$T < 300^\circ\text{C} \quad K = 0.07 + 1 \times 10^{-4} T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{KCal/h.n.}^\circ\text{C}$$

$$T > 300^\circ\text{C} \quad K = 0.02 + 4 \times 10^{-4} T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{KCal/h.m.}^\circ\text{C}$$

- . Ladrillo "SKAMOL SM-65", elaborado a partir de tierra de diatomeas y especialmente recomendado para aislar los cátodos de las células de producción de aluminio.

$$K = 0.1150 + 1 \times 10^{-4} T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{KCal/h.m.}^\circ\text{C}$$

En la Tabla 5.14., se presenta un estudio comparativo de K, a diferentes temperaturas.

Tabla 5.14.

Comparación de la Conductividad Térmica de la Diatomita Sechurana con la de otros aislantes térmicos, a diferentes temperaturas

Temp.(°C)	K (KCal/h.m.°C)			
	Hormigón aislante	Fibra cerámica	SM-65	Diatomita de Bayóvar
100	0.200	0.080	0.13	0.096
200	0.307	0.090	0.14	0.109
400	0.514	0.140	0.15	0.135
600	0.721	0.220	0.17	0.161
800	1.010	0.301	0.20	0.187

5.4. Evaluación de Propiedades Simuladas: Determinación de la Resistencia a la Compresión en Frío

Los aspectos teóricos de este ensayo se han tratado en el Capítulo III, apartado 3.4.3.

La determinación se efectuó siguiendo, en líneas generales, la Norma UNE 61.037-75 (ITINTEC 331.042-82), en la que se utilizó el equipo SOIL-TEST U-160.

A continuación, se dan algunos alcances para la realización de este ensayo.

A. Preparación de la Muestra

- . Se cortan probetas de geometría cilíndrica o paralelepípeda, en la que la altura deberá ser mayor o igual a dos veces el ancho (diámetro) de la base.
- . Se seca el material a 110°C hasta peso constante.
- . Para las muestras tratadas térmicamente, se mantendrán a la temperatura T durante 2 horas y se enfriarán lentamente, para evitar el choque térmico.

B. Método de Medida

El aparato mecánico U-160 SOILTEST para medir la carga, P, utiliza un doble anillo dinamométrico, con un factor de calibre K, que lleva un cuadrante con graduaciones hasta 10^{-4} de pulgada, las cuales se transforman en cargas mediante la expresión siguiente:

$$\text{Carga axial } P = \frac{K \cdot x}{9.81} \quad (\text{kg})$$

En donde:

K = factor de calibre = 3.75×10^4 Newton/pulgada

x = lectura del cuadrante del anillo de carga medida en 10^{-4} pulgadas (plg).

Las deformaciones se miden en otro cuadrante que tiene graduaciones de hasta 10^{-3} de pulgada, las cuales se transforman en porcentajes de deformación que experimenta el material (E) mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{Y}{h} \times 2.54 \times 100 (\%)$$

En donde:

Y = lectura del cuadrante vertical, medido en 10^{-3} plg.

h = altura de la probeta (cm).

Para cada lectura del dial vertical hay que corregir el área mediante la expresión:

$$A = \text{área corregida} = \frac{A_0}{1 - E/100}$$

En donde:

A_0 = el área inicial (cm^2)

E = deformación de la probeta en (%)

La resistencia a la compresión en frío (q_c) se determina por la expresión siguiente:

$$q_c (\text{kg/cm}^2) = \frac{P}{A}$$

El procedimiento seguido se puede resumir en los siguientes pasos (ver Fig. 5.11):

- 1) Colocar la probeta preparada en el equipo, con su eje vertical tan próximo al centro de la placa inferior como sea posible.
- 2) Se ajusta el cuadrante de los anillos dinamométricos en la lectura cero, sin aplicarle carga alguna.
- 3) Se monta el medidor de deformaciones de modo que el brazo horizontal accesorio apoye en la parte inferior de la placa superior cuando el

vástago del cuadrante esté en su posición más extendida.

4) Se colocan los discos de fibrocelulosa a la probeta, uno a cada extremo. El uso de los discos elimina la necesidad de ajustar en cada en sayo la lectura de la probeta. También prevé un medio de mantener la mayor lectura del cuadrante una vez que se quita la carga.

5) Se pone el cuadrante del medidor de deformaciones en cero, con los discos pero sin aplicar carga.

6) Hay que elegir una velocidad de deformación. Se continúa comprimiendo hasta que ocurra la rotura. Se quita la carga y se retira la probeta.

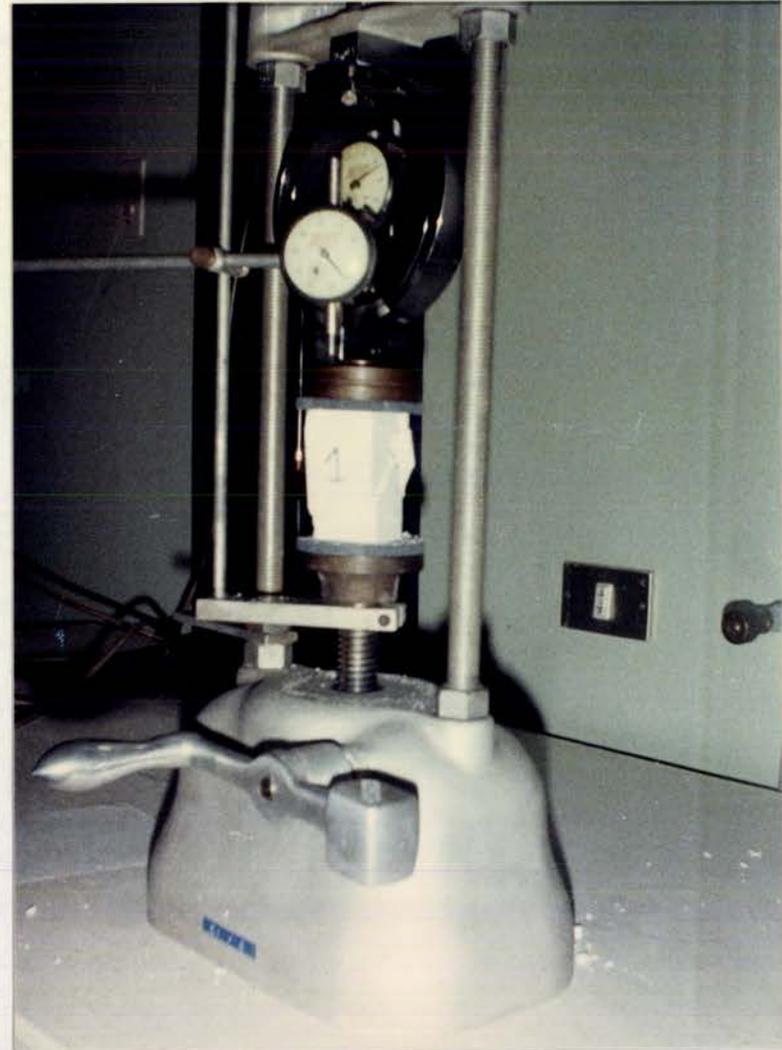
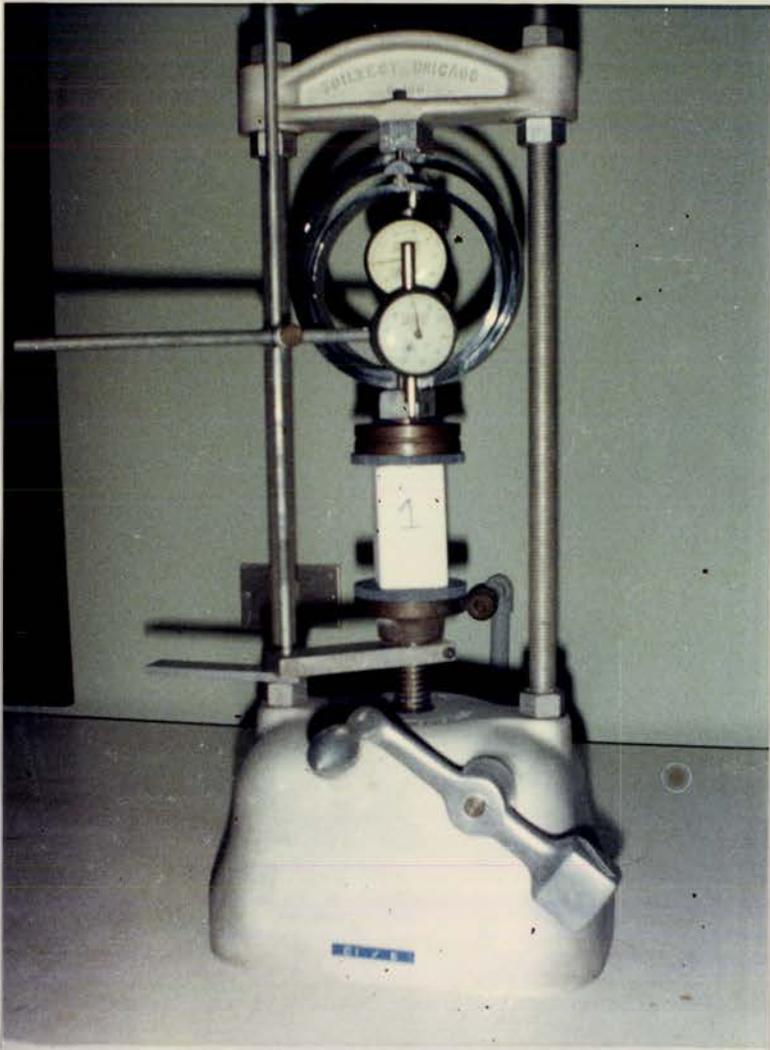


Fig. 5.11. Disposición de las probetas, antes y después del ensayo de Resistencia a la Compresión en frío.

C. Resultados Experimentales

Como ejemplo, en la Tabla 5.15., se registran los datos obtenidos para un ensayo de resistencia a la compresión en frío, de diatomita Inca.

Las Tablas 5.16 y 5.17 que se corresponden con la Fig. 5.12., representan los resultados experimentales de q_c obtenidos a diferentes temperaturas, para la diatomita de la zona Inca y del Area I respectivamente. En ellas figuran, para cada temperatura de tratamiento, los valores del esfuerzo máximo a la compresión ($q_{c \text{ máx}}$), ángulo de falla principal (θ_r) medido en sentido antihorario y a partir de un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada, y el porcentaje de deformación (E) correspondiente al $q_{c \text{ máx}}$.

Sobre la magnitud de los resultados obtenidos, es interesante comentar lo siguiente:

. La materia prima analizada, en promedio, presenta una resistencia a la compresión en frío de 10 kg/cm² para la diatomita del Area I y de 17 kg/cm² para la diatomita Inca y que aumenta conforme lo hace la temperatura de tratamiento hasta los 600°C en la que adquiere el valor máximo, y a temperaturas superiores comienza a decrecer.

. De la observación directa se pudo apreciar que el valor de q_c está influenciado por la presencia de impurezas, a saber: sales sódico-potásicas, que se encuentran localizadas a lo largo de finísimas vetillas y que al ser sometidos a temperaturas superiores a los 900°C reblandecen mucho, lo que origina grietas y fisuras, que influyen negativamente en el ensayo, ya que por allí fallan mayormente las probetas.

Tabla 5.15.

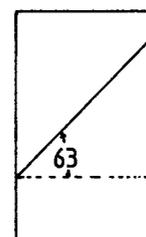
Ensayo de Compresión en FríoMUESTRA

Descripción: Diatomita Inca
 Perforación: Cueva de Los Incas
 Profundidad: 5 m
 Temp. Tratamiento: 110°C (en verde)
 UBICACION : Desierto de Sechura

MEDIDAS DE LA MUESTRA

Area inicial, A_0 : 11.34 cm²
 Alt. inicial, l_0 : 7.58 cm
 SERIE DE ANILLO : 10741
 FACTOR CALIBRE : 3.75

Dial Vertical ($\times 10^{-3}$ ")	Defor- mación E(%)	Area Corre- gida, A (cm ²)	Anillo de Carga ($\times 10^{-4}$ ")	Carga Axial, P (kg)	Resistencia A Compresión q_c , (kg/cm ²)	Observación
0	0.00	11.34	0	0	0	
3	0.10	11.35	120	45.87	4.04	
4	0.13	11.35	155	59.25	5.22	
5	0.17	11.36	186	71.10	6.26	
6	0.20	11.36	218	83.33	7.33	
7	0.23	11.37	242	92.51	8.14	
8	0.27	11.37	270	103.21	9.08	
9	0.30	11.37	305	116.59	10.25	
10	0.33	11.38	337	128.82	11.32	
11	0.37	11.38	363	138.76	12.19	
12	0.40	11.39	386	147.55	12.96	
13	0.43	11.39	416	159.02	13.96	
14	0.47	11.39	448	171.25	15.03	
15	0.50	11.40	469	179.28	15.73	
16	0.54	11.40	500	191.13	16.73	
17	0.57	11.41	516	197.25	17.30	
18	0.60	11.41	530	202.60	17.76	
19	0.64	11.41	535	204.51	17.92	
20	0.67	11.42	532	203.36	17.81	
22	0.74	11.42	528	201.83	17.67	



q_c máx

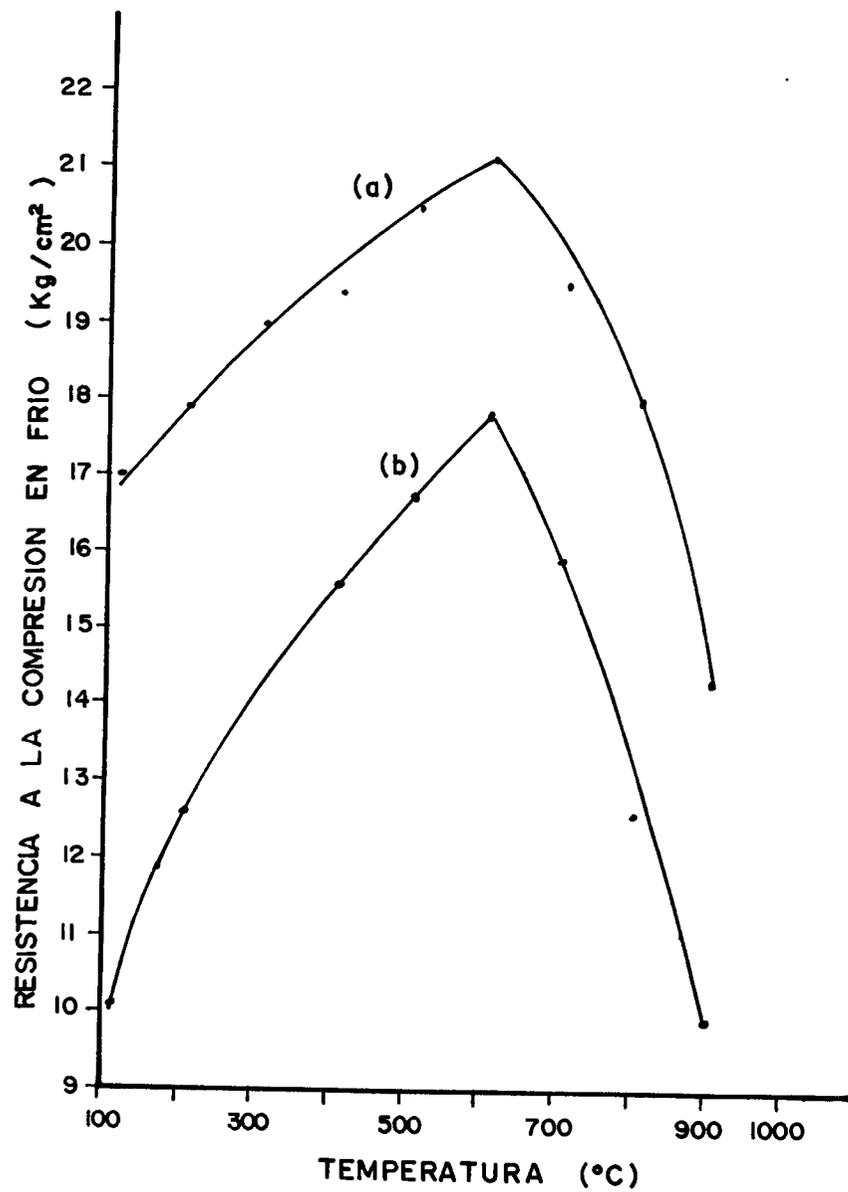


Fig. 5.12. Variación promedio de la resistencia a la compresión en frío de la tierra de diatomeas del Desierto de Sechura con la temperatura de cocción.

(a) Zona Inca

(b) Area I

Tabla 5.16.

Variación de la resistencia a la compresión en frío de la Diatomita
"Inca" a diferentes temperaturas de cocción

q_c : Esfuerzo máximo a la compresión en frío (kg/cm²)

E : Deformación que experimenta la probeta durante el ensayo

θ_r : Angulo que sigue la falla principal, medido en sentido antihorario a partir del plano perpendicular a la carga aplicada.

	<u>110°C</u>	<u>200°C</u>	<u>300°C</u>	<u>400°C</u>	<u>500°C</u>	<u>600°C</u>	<u>700°C</u>	<u>800°C</u>	<u>900°C</u>
q_c	17.9	14.3	22.5	18.9	15.8	21.3	18.8	15.4	12.7
E (%)	0.64	0.37	0.36	0.40	0.22	1.16	1.25	1.50	3.31
θ_r	63	90	115	140	120	90	135	140	35
q_c	15.4	20.0	20.2	21.7	17.0	21.0	14.7	18.7	14.5
E (%)	2.66	0.49	0.98	0.67	0.69	1.01	0.59	1.75	1.36
θ_r	58	45	30	150	60	60	35	30	90
q_c	16.8	16.2	18.8	19.1	26.3	16.2	19.0	18.8	16.1
E (%)	0.22	0.45	0.47	0.67	0.53	1.48	1.83	1.51	2.60
θ_r	90	60	36	90	60	60	45	15	30
q_c	18.7	17.8	17.5	18.5	18.2	23.2	20.2	20.0	15.3
E (%)	0.97	0.52	0.76	0.32	0.65	0.97	1.05	1.02	2.15
θ_r	135	155	30	18	30	15	145	90	165
q_c	16.9	18.2	18.8	20.5	22.4	24.2	21.7	19.7	14.3
E (%)	0.80	0.80	0.65	0.41	0.43	0.87	0.98	0.98	3.17
θ_r	45	60	25	160	45	90	20	60	30
q_c	17.1	19.8	16.5	20.0	21.5	22.2	19.8	17.6	13.3
E (%)	0.76	0.60	0.56	0.33	0.32	0.71	1.22	1.35	2.86
θ_r	105	150	160	90	15	60	140	45	155

Tabla 5.16. (Continuación)

	<u>110°C</u>	<u>200°C</u>	<u>300°C</u>	<u>400°C</u>	<u>500°C</u>	<u>600°C</u>	<u>700°C</u>	<u>800°C</u>	<u>900°C</u>
q_c	14.8	20.7	18.9	18.0	23.2	18.7	17.2	16.8	12.4
E (%)	0.97	0.60	0.65	0.42	0.22	1.02	0.95	1.17	1.55
θ_r	40	90	150	135	90	135	127	32	90
q_c	15.3	17.2	18.5	17.8	22.2	21.6	20.5	15.8	14.7
E (%)	0.71	0.62	0.28	0.37	0.35	0.95	0.88	1.06	1.35
θ_r	150	145	15	25	140	110	115	127	105
q_c	18.3	16.5	17.8	20.5	19.9	22.3	18.5	19.8	16.4
E (%)	0.65	0.52	0.32	0.38	0.40	0.72	0.53	0.88	1.85
θ_r	90	45	18	140	30	35	35	130	45
q_c	19.2	17.6	17.1	18.8	18.2	20.2	24.6	17.5	12.9
E (%)	0.98	0.65	0.27	0.35	0.35	1.07	0.65	0.76	0.98
θ_r	130	142	90	60	15	120	150	15	30
\bar{q}_c	17.0	17.8	18.7	19.4	20.5	21.1	19.5	18.0	14.3
\bar{J}_n	1.43	1.85	1.63	1.19	3.06	2.18	2.50	1.57	1.34

Tabla 5.17.

Variación de la resistencia a la compresión en frío de la Diatomita"Area I" a diferentes temperaturas de cocción (°C)

q_c : Esfuerzo máximo a la compresión en frío (kg/cm²)

E (%) : Deformación que experimenta la probeta durante el ensayo

θ_r : Angulo que sigue la falla principal, medido en sentido antihorario a partir del plano perpendicular a la carga aplicada.

<u>Zona de Muestreo</u>	<u>110</u>	<u>200</u>	<u>300</u>	<u>400</u>	<u>500</u>	<u>600</u>	<u>700</u>	<u>800</u>	<u>900</u>
q_c	10.5	13.3	12.2	10.5	14.2	16.9	13.3	14.3	8.2
E (%)	0.40	0.35	0.52	0.72	0.68	0.78	0.80	1.38	0.98
θ_r	150	43	90	90	35	90	60	90	90
q_c	8.5	12.4	14.6	15.7	15.9	17.2	16.6	10.7	9.2
E (%)	0.28	0.19	0.50	0.75	0.49	0.65	0.85	1.52	1.02
θ_r	15	135	127	130	45	60	45	140	142
q_c	9.5	12.4	13.8	17.6	19.3	15.9	15.2	15.8	8.2
E (%)	0.15	0.29	0.55	0.52	0.72	0.72	0.92	0.98	0.78
θ_r	75	90	30	60	90	50	90	135	45
q_c	12.4	10.8	10.8	13.3	16.5	16.2	17.9	13.7	7.1
E (%)	0.17	0.36	0.87	0.32	0.58	0.65	1.15	1.28	1.25
θ_r	45	25	38	35	45	150	145	90	108
q_c	8.3	14.2	13.5	17.7	17.8	19.9	18.5	12.1	11.7
E (%)	0.22	0.32	1.37	0.85	0.32	0.72	1.20	2.18	0.75
θ_r	127	52	45	90	90	90	30	37	54

Tabla 5.17. (Continuación)

<u>Zona de Muestreo</u>	<u>110</u>	<u>200</u>	<u>300</u>	<u>400</u>	<u>500</u>	<u>600</u>	<u>700</u>	<u>800</u>	<u>900</u>
q_c	12.7	13.7	12.5	15.9	15.1	19.4	14.7	10.5	12.7
$E(\%)$	0.18	0.31	0.90	1.32	0.51	0.67	0.97	1.86	1.02
θ_r	30	135	75	127	145	38	45	117	47
q_c	10.2	11.4	15.1	16.7	18.9	18.7	16.2	14.7	8.1
$E(\%)$	0.22	0.30	0.87	1.52	0.63	0.69	1.10	1.34	1.25
θ_r	90	105	60	148	75	30	90	75	90
q_c	8.7	10.3	13.6	15.5	17.2	18.8	15.6	13.2	13.2
$E(\%)$	0.15	0.33	0.77	0.97	0.78	0.80	0.98	1.02	0.75
θ_r	38	45	40	90	135	135	55	30	32
q_c	9.2	12.1	17.5	15.1	14.8	17.1	14.9	9.9	8.2
$E(\%)$	0.17	0.11	0.79	0.70	0.87	0.78	1.21	1.17	0.97
θ_r	48	15	127	53	127	90	15	115	90
q_c	11.2	15.1	9.7	17.8	16.9	17.8	15.6	10.7	12.4
$E(\%)$	0.11	0.87	0.62	1.37	0.92	0.82	1.01	1.32	0.72
θ_r	135	135	135	35	35	30	115	90	50
\bar{q}_c	10.1	12.6	13.3	15.6	16.7	17.8	15.9	12.6	9.9
\bar{f}_n	1.50	1.44	2.10	2.15	1.62	1.29	1.46	1.96	2.20

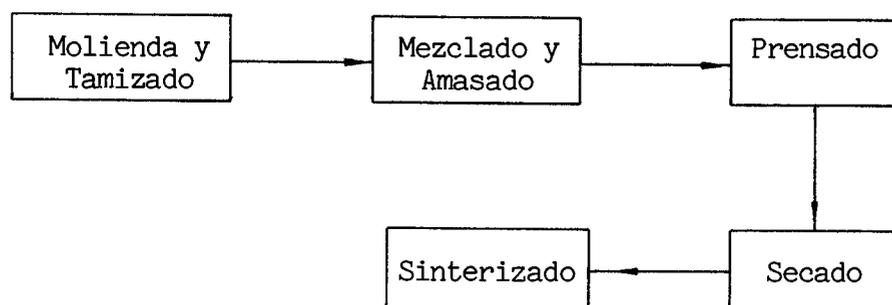
5.5. Ensayos de Prensado-Sinterizado de Diatomita Pulverulenta

Después de haber realizado ensayos con diatomita consolidada natural y observado que a temperaturas iguales o superiores a 850°C algunos bloques, los que presentaban un mayor contenido de impurezas y por la contracción que experimentaban, se agrietaban mucho, como se puede observar en la figura 5.13. Se ha creído conveniente la realización de ensayos con diatomeas prensadas y sinterizadas, con el objeto de evaluar algunas propiedades de interés que nos permita hacer comparaciones con las del material consolidado natural.



Fig. 5.13.

La dinámica operativa en la obtención de probetas consolidadas y sin terizadas, fue la siguiente:



. El sinterizado se efectuó durante 2 horas a la temperatura T, que dependerá del material que se desee obtener, siendo necesario un calentamiento y enfriamiento lento para evitar el choque térmico.

. El secado a 110°C, hasta peso constante.

En el presente apartado se indican los resultados obtenidos y las condiciones de trabajo bajo las cuales se operó, al objeto de obtener diferentes probetas de diatomeas consolidadas y estabilizadas térmicamente, utilizando diatomita INCA.

En la Tabla 5.18., se recogen las características más notables de un primer grupo de ensayos. Se pudo observar que las probetas de los ensayos N° 3, 5, 9, 11, 12 y 13, presentaban pequeñas fisuras que se les conoce como efecto de hojaldramiento-laminación, que es típico en aquellos polvos en los cuales durante su compactación se produjo la entrada de aire o bien que la distribución en profundidad de la carga de presión aplicada fuera muy irregular.

TABLA 5.18 RESULTADOS DE ENSAYOS DE CONSOLIDACION- SINTERIZADO

N° ENSAYO	PREPARACION PREVIA		PRESION DE CONSOLIDACION (Kg/cm ²)	DENSIDAD GLOBAL EN VERDE: D _g (gr/cm ³)	TEMPERATURA DE SINTERIZADO (°C)	DENSIDAD GLOBAL DESPUES DE SINTERIZADO (gr/cm ³)	ENSAYO DE COMPRESION EN FRIO		POROSIDAD TOTAL DESPUES DE SINTERIZADO (%) P _T
	TAMIZ ASTM	MEZCLADO CON :					q _c (Kg/cm ²)	E (%)	
1	+20	40% de agua	350	0.72	En verde	—	12.46	0.134	69
2	+40	3 % aceite SAE 30	150	0.88	900	0.90	32.10	0.101	64
3	+40	35% de agua	190	0.76	850	0.75	24.50	0.360	70
4	+40	40% de agua	140	0.84	850	0.78	17.30	0.380	68
5	+20	40 % de agua	260	0.72	850	0.70	28.00	0.760	72
6	+40	40% de agua	150	0.86	900	0.90	18.50	0.250	64
7	+60	40% de agua	150	0.93	900	0.84	20.20	0.152	66
8	+20	40% de agua	380	0.72	900	0.70	20.70	0.170	72
9	+40	40% de agua	110	0.84	850	0.77	22.80	0.270	69
10	+10	40% de agua	330	0.79	850	0.77	18.70	0.474	69
11	sin tamizar	40% de agua	360	0.81	900	0.78	19.50	0.425	69
12	+10	40% de agua	360	0.87	950	0.88	40.10	0.897	65
13	sin tamizar	40% de agua	360	0.80	950	0.81	27.00	0.720	68

En la Tabla 5.19., se exponen los resultados y las condiciones bajo las cuales se operó con la finalidad de obtener diferentes probetas de diatomeas consolidadas, secadas a 120°C y sinterizadas a 800°C. Se incluye una muestra de diatomeas consolidada natural de geometría prácticamente cúbica. Se pudo apreciar que las probetas que corresponden a los ensayos N° 3 y 4, presentan el efecto de hojaldramiento-laminación.

En vista de que en los ensayos de consolidación con un 40% de agua se necesitaba cargas de prensado elevadas, para que la distribución de carga sea uniforme, se optó por realizar ensayos variando el contenido de humedad. Los resultados se exponen en la Tabla 5.20. El secado se realizó al ambiente y posteriormente en estufa, después del cual se pudo observar un pequeño agrietamiento en la parte céntrica de algunas de ellas, que es donde se acumula la mayor cantidad de humedad durante el prensado, causadas por la evaporación del agua de la superficie a mayor velocidad de la que está siendo difundida desde el interior. Después del sinterizado a 950°C durante 2 horas, éstas presentaban un ligero agrietamiento en la superficie, producto de la contracción que experimentan.

Cabe hacer notar que en nuestro caso únicamente hemos realizado ensayos de consolidación en vía húmeda: Utilizando agua como aglutinante, que industrialmente no es recomendable por el gran consumo energético y los problemas de agrietamiento durante el secado. Pero, existen otros aglutinantes utilizados para la consolidación de las diatomeas, por ejemplo:

. Vía Semi-seca

Con Silicato de Sodio : 6%

Con Arcilla + H₂O : 6%

. Con resinas orgánicas (fenólicas o furánicas).

Tabla 5.19.

Resultados de Ensayos de Prensado-Sinterizado

<u>Tipo de Material</u>	<u>Preparación Previa</u>	<u>Características de la compactación</u>	<u>D_g después de secado (120°C) + Sinterizado (800°C)</u>	<u>Porosidad Total después de Secado + Sinterizado (800°C)</u>
Tierra de D. consolidada natural (N° 1)	-	-	0.48 g/cm ³	80%
Tierra de D. Polvo (N° 2)	Ninguna	100 kg/cm ²	0.72 g/cm ³	70%
Tierra de D. Polvo (N° 3)	Ninguna	100 kg/cm ²	0.73 g/cm ³	69%
Tierra de D. Polvo (N° 4)	Ninguna	160 kg/cm ² Presencia de lubrif	0.75 g/cm ³	68%
Tierra de D. Polvo (N° 5)	Ninguna	160 kg/cm ² Presencia de lubrif	0.80 g/cm ³	66%
Tierra de D. Polvo (N° 6)	Mezcla con un 2.60% de aceite SAE-30	160 kg/cm ² Presencia de lubrif	0.93 g/cm ³	61%
Tierra de D. Polvo (N° 7)	Mezcla con un 2.60% de aceite SAE-30	160 kg/cm ² Presencia de lubrif	0.97 g/cm ³	59%
Tierra de D. Polvo (N° 8)	Ninguna	160 kg/cm ² Presencia de lubrif	0.77 g/cm ³	67%

TABLA 5.20 RESULTADOS DE ENSAYOS DE PENSADO-SINTERIZADO

PREPARACION PREVIA		CARGA DE PENSADO (Kg/cm ²)	PARAMETROS DEL MATERIAL EN VERDE SECADO A 110 °C			PARAMETROS DEL MATERIAL SINTERIZADO A 950 °C			
TAMIZ ASTM	% AGUA (en peso)		DENSIDAD GLOBAL Dg (gr/cm ³)	R. COMPRESION EN FRIO		DENSIDAD GLOBAL Dg (gr/cm ³)	R. COMPRESION EN FRIO		% PT
				qc (Kg/cm ²)	% E		qc (Kg/cm ²)	% E	
-60	49	95	0.68	2.0	0.017	0.80	22.5	0.205	68
-60	90	95	0.72	3.0	0.025	0.92	55.7	0.220	63
+40	77	95	0.78	3.2	0.030	0.88	23.6	0.318	65
+20	107	62	0.64	8.0	0.130	0.85	32.8	0.275	66
+20	118	62	0.58	4.0	0.085	0.87	55.2	0.227	65
+20	110	95	0.68	7.0	0.087	0.88	50.0	0.390	65
+20	55	62	0.69	5.0	0.062	0.94	67.0	0.410	63
+20	86	62	0.72	6.2	0.077	0.98	48.0	0.340	61
+20	109	62	0.62	8.5	0.089	0.86	85.0	0.380	66
-4	102	62	0.60	9.5	0.132	0.82	62.0	0.400	67
-4	97	62	0.62	9.6	0.147	0.83	63.0	0.420	67
-4	94	95	0.66	5.2	0.090	0.88	63.8	0.247	65
-4	85	95	0.66	5.0	0.080	0.82	63.8	0.235	67
-4	100	95	0.68	4.7	0.083	0.87	62.5	0.252	65
-4	95	125	0.67	9.0	0.075	0.83	52.5	0.272	67
-4	69	125	0.75	8.0	0.052	0.93	78.5	0.356	63
-4	107	125	0.61	5.2	0.040	0.85	80.1	0.390	66
-4	103	125	0.63	5.0	0.042	0.84	78.6	0.370	66
-4	105	155	0.61	7.0	0.053	0.82	60.2	0.278	67
-4	105	155	0.61	7.2	0.051	0.80	54.4	0.330	68

Los resultados de los ensayos de prensado-sinterizado nos permiten observar que las probetas obtenidas, a diferentes condiciones, no presentan mayormente, problemas en cuanto al agrietamiento exagerado y que poseen mejores propiedades mecánicas, aún habiéndolas tratado a temperaturas que se encuentran en el intervalo de 850 a 950°C, lo que no ocurría con el material consolidado natural.

Es necesario resaltar la importancia del secado y del prensado, pues ambos nos pueden causar problemas de agrietamiento, de resquebrajaduras, etc., que hacen que el producto obtenido presente una disminución en sus propiedades mecánicas ya que, evidentemente, afecta directa o indirectamente a la sección eficaz de trabajo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos a escala de Laboratorio, se deduce que:

1.- Las muestras analizadas presentan una marcada heterogeneidad, razón por la que se trabajó estadísticamente con el objeto de obtener valores promedios de los parámetros, lo que nos indica que el yacimiento presenta diferentes calidades de diatomita.

2.- La diatomita analizada está compuesta mayormente por sílice amorfa pero presenta, en pequeña proporción, contaminantes sólidos, tales como cuarzo, cloruro de sodio y sulfato de calcio hidratado.

3.- Genéricamente, la diatomita de la zona Inca es de calidad superior, a saber, menor contenido de impurezas: sólidos (tales como arcilla, cuarzo, sales solubles, yeso), materia orgánica, etc., y mayor contenido de sílice amorfa. Presentando, además, un mejor comportamiento con la temperatura de tratamiento que la del Area I.

4.- A temperaturas superiores a los 950°C la diatomita analizada tiende a estabilizarse térmicamente.

5.- La diatomita presenta una porosidad total que varía entre 70 y 80%, razón por la cual presenta una baja conductividad térmica.

6.- Las mejores propiedades mecánicas de las tierras de diatomeas se verifican dentro del intervalo de 500 a 600°C, intervalo en el cual presentan sus mejores propiedades aislantes, a saber: baja densidad global y elevada porosidad.

7.- Hay que tener presente la elevada capacidad de reacción de la diatomita (superficie específica = 22.6 m²/g) tanto en estado sólido como en medio acuoso, que la hacen particularmente adecuada para la fabricación de aislantes Sílice-cal y como fuente de sílice para la obtención de silicatos (de sodio y calcio, etc.).

8.- Las diatomeas consolidadas en el propio yacimiento presentan una conductividad térmica (K) que para el intervalo de 25 a 900°C varía de 0.1 a 0.2 KCal/h.m.°C, menor que la que presentan otros productos comerciales (ver Tablas 5.13 y 5.14).

9.- De los resultados de los ensayos de prensado-sinterizado, se deduce claramente que existe una diferencia notable del material artificialmente consolidado al natural, pues variando ciertos parámetros se pueden obtener materiales de calidad superior (ver Tablas 5.18 a 5.20).

10.- Es factible el aprovechamiento de las propiedades térmicas de las diatomeas consolidadas en los yacimientos del Desierto de Sechura para orientarlas hacia la obtención de materiales aislantes térmicos y refractarios aislantes idóneos para su uso en la industria.

11.- Dada la calidad de las diatomeas Sechuranas, se puede lograr materiales (cortados del propio yacimiento) refractarios aislantes que muy bien pueden encajar en el grupo 85, según la Norma UNE 61.007-75 (ver Anexo I) y aislantes térmicos de calidad competitiva con los del mercado (ver Anexo I).

12.- Es importante anotar que en todos los ensayos se ha realizado el secado a 110°C hasta peso constante, velocidad de calcinación-sinterización de 2.5 a 5°C/min y un tiempo de tratamiento de 2 horas para asegurar, de cierta manera, una buena transformación del material, ya que utilizando tiempos menores se obtenían probetas poco transformadas.

13.- Asimismo, es interesante recalcar que en los ensayos de prensado-sinterizado, únicamente hemos utilizado agua como aglutinante y ningún otro agregado y que, evidentemente, utilizando otros aglutinantes obtendremos, sin lugar a dudas, materiales de muy buena calidad para altas temperaturas.

Quedan abiertos nuevos horizontes de investigación tanto científicos como técnicos.

RECOMENDACIONES

1.- El trabajo debe ser continuado, hay que convocar la participación de la Empresa Minera del Perú (MINEROPERU S.A.) para realizar un estudio mucho más profundo de las diatomeas en el campo de los refractarios, refractarios aislantes y aislantes térmicos. Dicho estudio deberá hacerse a nivel de planta piloto y permitirá realizar nuevas pruebas técnicas, evaluar los costos, aglutinantes a utilizar, etc.

2.- Respecto al material consolidado artificialmente, se recomienda estudiar en forma sistemática, las siguientes variables:

- . Granulometría óptima
- . Presión de consolidación
- . Densidad global en verde (sin sinterizar), procurando obtener valores dentro del intervalo $0.5 - 0.9 \text{ g/cm}^3$, con miras a la producción de refractarios aislantes.
- . Densidad global después de sinterizar (D_g)
- . Resistencia a la compresión en frío, antes y después de sinterizar (q_c).
- . Deformación producida durante la compresión en frío (E).

Se debe igualmente sistematizar y repetir ensayos en función de las variables dadas, manteniendo constante las velocidades y temperaturas de secado y calcinación-sinterización de las probetas.

3.- Se recomienda iniciar un estudio orientado al "Proyecto de instalación de una planta industrial para la fabricación de materiales refractarios y aislantes térmicos", bajo formas de bloques de dimensiones varia

das, coquillas (para aislamiento de tuberías) muy utilizadas en la industria del petróleo y en plantas térmicas, y otras formas especiales.

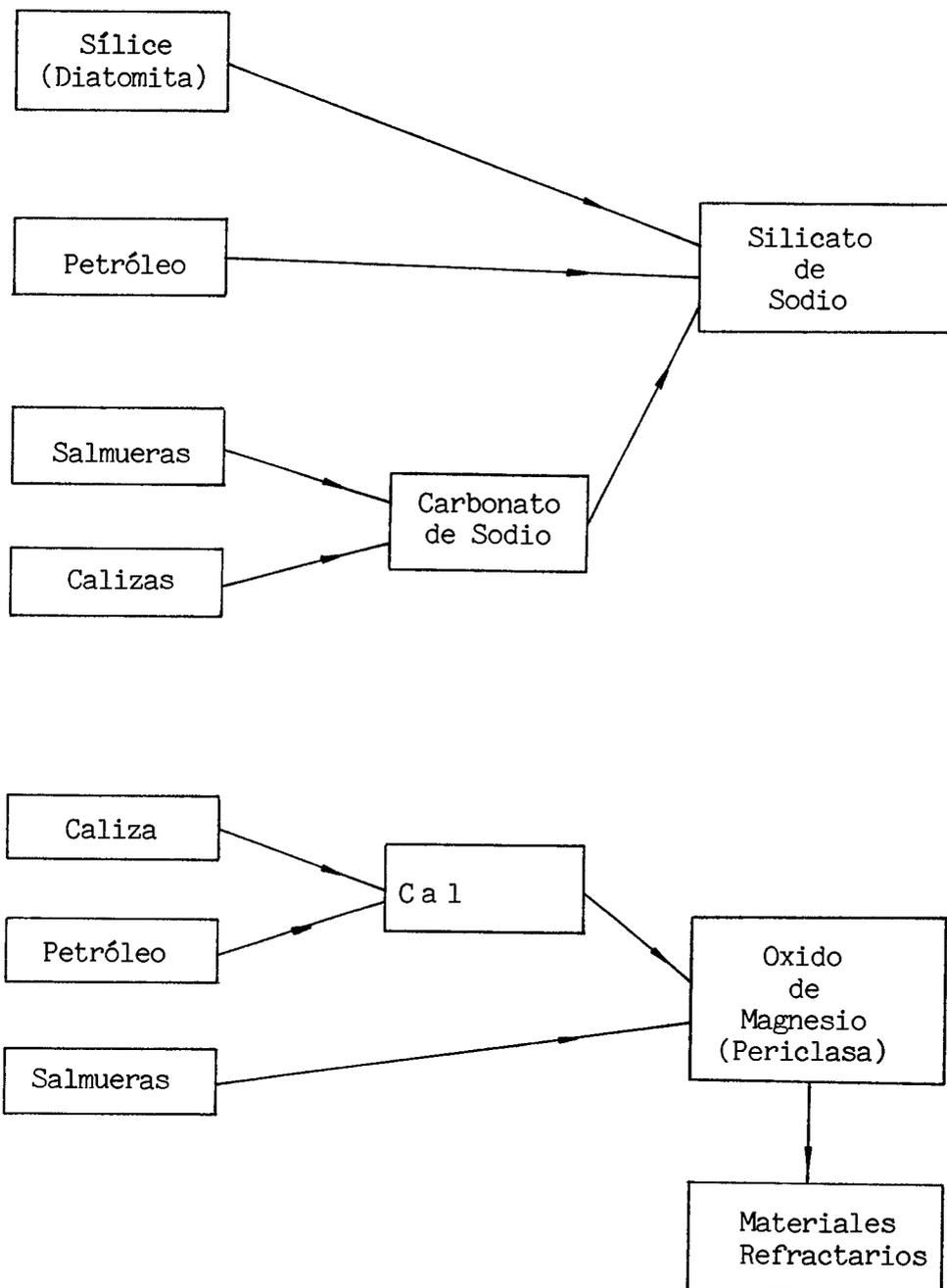
4.- Se recomienda evaluar el efecto corrosivo que podría originar la diatomita durante el proceso de manufactura de los materiales aislantes térmicos o refractarios aislantes, ya que podría tener efectos gravitantes en el costo de inversión de la planta, en el caso de que los problemas de corrosión sean excesivos.

5.- Al margen del presente estudio, es necesario la realización de una serie de estudios de las diatomeas de Bayóvar que nos muestren otras posibilidades de industrialización, con el fin de establecer la prioridad de los mismos, debido a que en la actualidad es mínima la información que se posee.

6.- Se recomienda hacer un estudio tendiente a obtener el silicato de sodio y refractarios de Magnesio, con recursos básicos de Bayóvar, cuyas cualidades vienen siendo estudiadas en diferentes trabajos de investigación, por parte de la Universidad de Piura (ver página siguiente).

7.- La Empresa Minero Perú, debería destinar los recursos necesarios para el conocimiento de las reservas probadas de diatomita y su ley, en el Desierto de Sechura.

RECURSOS BASICOS



B I B L I O G R A F I A

- ANON. "Celite - The Story of Diatomite". Johns Manville Corp. Bull FA-41A, 26 pp.
- CAMPOS LORIZ, D. "Los Materiales Refractarios: Generalidades y Clasificación". Revista Metalúrgica CENIM, V.d. 16, N° 2,113 (1980).
- CUMMINS, A.B. "Industrial Minerals and Rocks: Diatomite". Ed. J.L. Gilson, AIME, New York, 1960. 3a. edición, pp. 303-314.
- CHAPMAN, A.J. "Transmisión de Calor". 3a. edición, Ed. Interciencia, Madrid, España, 1974.
- CHESTERS, J.H. "Refractories: Production and Properties". Ed. The Iron and Steel Institute, London, 1973.
- DIAMANT, E. "Aislamiento Térmico y Acústico de Edificios". 1a. edición, Ed. Blume, Madrid, España, 1967.
- ENCICLOPEDIA SALVAT DE LA CIENCIA Y DE LA TECNOLOGIA. Tomos 3 y 4. 1a. edición. Ed. Salvat S.A., Barcelona, 1964.
- HAYDEN, H.W.; MOFFATT, W.G.; WULFF, J. "Colección Introducción a la Ciencia de Materiales - Volumen III: Propiedades Mecánicas". 1a. edición, Ed. Limusa-Wiley S.A., México, 1968.

- HAWLEY, G.G. "Diccionario de Química". 2a. edición, Ed. Omega S.A., Barcelona, 1975.
- INGEMMET "Estudio Geológico de Bayóvar, Vol. II: Geología de la Región de Bayóvar". Lima, 1979.
- KADEY. "Industrial Minerals and Rocks: Diatomite". 4a. edición. New York, pp. 605-629.
- KIRK, R.E. y OTHMER, D.F. "Enciclopedia de Tecnología Química". Tomos 1, 4, 6, 13. 1a. edición, Ed. Uteha, México, 1963.
- LAMBE, W. "Soil testing for Engineers". Ed. John Wiley & Sons, New York, 1951.
- MEISINGER, A.C. "Minerals facts and Problems: Diatomite". Bull. 675. U.S. Bureau of Mines, 1985. pp. 249-254.
- MOFFATT, W.G.; PEARSALL, G.W.; WULFF, J. "Colección Introducción a la Ciencia de Materiales, Vol. I: Estructura". 1a. edición, Ed. Limusa S.A., México, 1968.
- PERRY, J.H. "Manual del Ingeniero Químico", Tomo I, Ed. Uteha, México, 1978.
- PETKOF, B. "Minerals Yearbook: Diatomite". U.S. Bureau of Mines, 1970. pp. 501-503.
- PIATTI, G. "Enciclopedia de la Tecnología Química: Vol. IV: Materiales de Ingeniería Química". 1a. edición, Ed. Urmo, Bilbao, España, 1973.
- RUMFORD, F. "Materiales de Ingeniería Química". 2a. edición, Ed. Eudeba, Universitaria, B.B.A.A. - Argentina, 1964.

SHREVE, R.N. "Industrias de Proceso Químico". Ed. Dossat S.A., Madrid, 1954.

SINGER, F. y SINGER, S.S. "Cerámica Industrial, Vol. III". Ed. Urmo, España.

TERZAGHI, K. y PECK, R.B. "Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica". 2a. edición, Ed. El Ateneo, Argentina, 1973.

VERDEJA, J.I. "Metalurgia Mecánica - Propiedades Mecánicas - Ensayos". E.T.S.I.M., Oviedo, España, 1985.

VOGEL, A.I. "Química Analítica Cuantitativa, Vol. I". Ed. Kapelusz S.A., Buenos Aires, Argentina, 1960.

ANEXO I

Instituto Nacional de Racionalización y Normalización (IRANOR) - Serrano, 150 - Madrid (6) - Teléfono 261 70 00 - Reproducción prohibida

NORMA ESPAÑOLA	Materiales refractarios PRODUCTOS REFRACTARIOS AISLANTES CON FORMA Clasificación y división	U N E 61 - 007 - 75
-------------------	--	------------------------

1 OBJETO

Esta norma tiene por objeto definir y clasificar los refractarios aislantes con forma.

2 DEFINICION

Se consideran productos refractarios aislantes con forma, aquellos cuya refractariedad es igual o superior a 1 500 °C y su porosidad total es igual o superior al 45 % en volumen.

Puesto que existe una relación estrecha entre la conductividad térmica, la porosidad total y la densidad aparente y esta última es la más sencilla de determinar, se toma como uno de los criterios de división.

3 CLASIFICACION

Su clasificación sigue el mismo esquema dado para los productos refractarios con forma y por lo tanto queda establecida según la norma UNE 61-001-75.

La presente norma se refiere exclusivamente a productos de sílice y alúmina.

4 DIVISION

La división de cada grupo de productos se basará en la temperatura a la cual la contracción permanente es igual o menor del 2 % (*Tabla I*), y en la densidad aparente (*Tabla II*).

4.1 Observación a la Tabla I

Las temperaturas indicadas como límites de grupos, no son las temperaturas límites de empleo, puesto que el comportamiento de los productos en servicio, depende no solamente de la temperatura, sino también de las condiciones de utilización, ya que el material objeto de esta norma puede utilizarse como cara de trabajo o como aislamiento posterior.

Tabla I

GRUPO	Temperatura a la cual es producto no debe tener más del 2 % de variación de dimensiones en el ensayo convencional (°C)
85	850
95	950
105	1 050
125	1 250
135	1 350
140	1 400
150	1 500
160	1 600
170	1 700
180	1 800

Tabla II

GRUPO	Límites superiores de densidad aparente
85	0,55
95	0,65
105	0,65
125	0,75
135	0,80
140	0,85
150	0,95
160	1,10
170	1,30
180	1,60

4.2 Observación a la Tabla II

Como se indica en la *Tabla II*, los valores dados para la densidad aparente son límites superiores, pudiendo existir materiales clasificados en un mismo grupo, con densidades aparentes inferiores.

5 NORMAS PARA CONSULTA

UNE 61 - 001 - 75 - *Materiales refractarios. Definiciones y clasificación por su composición química.*

Las observaciones relativas a la presente norma deben ser dirigidas al IRANOR - Serrano, 150 - Madrid (6)
--

COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES TERMICAS DE LA DIATOMITA
DE SECHURA CON LAS DE OTROS AISLANTES TERMICOS COMERCIALES

Número	* 1	* 2	* 3	* 4	* 5	* 6	* 7	* 8	* 9	10	11				
Nombre	Moler	Fosasil super	—	—	Insulex	—	P600	Sil-3	Sil N 550	Skamol-65 (SM-65)	"INCA"	"AREA 1"			
Tipo de aislante	Inter-medio	Alta temp.	—	—	Intermedio	—	—	Intermedio	Intermedio	—	Intermedio				
Tipo de pasta	Diatomáceo	Diatomáceo	Diatomita	Diatomita	Diatomáceo	Diatomáceo	Diatomáceo	Silex	Silex	Diatomáceo	Diatomita consolidada natural				
País de origen	Gran Bretaña	Gran Bretaña	—	—	Gran Bretaña	Francia	Dinamarca	Italia	Italia	—	Desierto Sechura - Piura - Perú				
Temperatura de fusión (°C)	—	—	—	—	—	> 1350	—	1650	1600	—	—	—	—		
Temp. segura máxima (°C)	850	1350	—	—	930	900	875	1400	1250	950	900	900	900		
Porosidad total (%)	—	—	76	66.1	—	—	—	52	76	71	75.1	71.5	71.5		
Densidad global (gr/cm ³)	40-80	.84	0.51	0.75	0.28-0.32	0.40	0.60	1.15	0.55	0.65	0.62	0.69	0.69		
Resist. Compresión enfrio (Kg/cm ²)	14-102	52	9	31	8 - 13	10	40	70 - 90	10	33.7	14.3	10	10		
Conductividad térmica a temperatura (°C) (Kcal/h·m·°C)	—	—	500	500	57 175 290	100 400 700	100 400 700	—	—	200 400 600 800	200 400 600 800	200 400 600 800	200 400 600 800		
	0.072 0.144	0.180	0.144	0.216	0.072 0.108	0.072 0.108 0.144 0.108 0.144 0.18	—	—	—	—	0.14 0.15 0.17 0.2	0.109 0.135 0.161 0.187	0.109 0.135 0.161 0.187		
Ecuación								$K = 0.0648 + 73.6 T$	$K = 0.027 + 32.4 T$	$K = 0.15 + 1 \times 10^{-4} T$	$K = 0.0833 + 1.3 \times 10^{-4} T$				
Postcontracción: temperatura (°C)	—	—	900 1000	1100 900 950 1000	870 925	—	—	—	—	—	—	—	—		
tiempo (h)	—	—	2 2	2 2 2 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
variación (%)	—	—	-0.2 -0.2	-4.7 -0.1 -0.5 -3.24	-2.4 -3.3	—	—	—	—	—	—	—	—		

(*) SINGER, F y SINGER, S.S. "Cerámica Industrial" Vol. III. ed. URNO-Español. Pág. 268-271