

656-7

# Contribución a la determinación de las propiedades expansivas de las materias primas cerámicas

**HANS LEHMANN y HELMUT DIETRICH**

**Tonindustrie-Zeitung nº 9, septiembre 1971, págs. 244-251**

## **S I N O P S I S**

La creciente necesidad de áridos de poco peso ha conducido a la búsqueda de materias primas adecuadas y a métodos de enjuiciamiento de su idoneidad.

En este trabajo se describen métodos de investigación y procedimientos de laboratorio que permiten hacer una investigación sistemática del comportamiento a la fusión y expansión de las materias primas cerámicas.

Mediciones de acuerdo con estos procedimientos han dado como resultado que, sin modificar la composición material, las medidas de preparación y la técnica de procedimientos solas influyen notoriamente sobre la capacidad de expansión.

## **1 INTRODUCCION**

En los pasados años el hormigón ligero, cuyo principal campo de aplicación se encuentra en la construcción y en la fabricación de elementos constructivos ligeros de gran formato, ha alcanzado una creciente importancia.

Con este progreso ha crecido asimismo la demanda de áridos ligeros que, no obstante, sólo pudo cubrirse en parte con las provisiones de áridos naturales.

La limitación de estas materias primas a unos pocos yacimientos en la naturaleza, así como la reducida resistencia de estos materiales, conducen a la fabricación de áridos ligeros artificiales. A su vez, con la arcilla expandida se encuentra un producto que, mediante adecuados procedimientos de fabricación, puede variar sus propiedades en un vasto campo y puede acomodarse a las más diversas exigencias de calidad, especialmente con vistas a su peso aparente y su resistencia.

## **2 ARCILLA EXPANDIDA Y SUS CONDICIONES DE FABRICACION**

Generalmente, por arcilla expandida se entiende un producto cerámico poroso, en el que las materias primas que contienen mineral arcilloso han sido sometidas a un proceso de expansión de acuerdo con diferentes procedimientos de preparación y cocción.

Como condición previa del hinchamiento de materias primas cerámicas se impone un comportamiento favorable a la viscosidad en el campo de temperaturas de 1.000° a 1.250°C con la presencia simultánea de gases, que expansionan la masa viscosa, piroplástica (1), (2), (3), (4), (5), (6) y (7). Entonces se originan poros, que confieren al producto expansivo una estructura alveolar. De una arcilla expandida de alta calidad se espera una superficie externa compacta con absorción de agua muy reducida, junto con una estructura alveolar regular lo más fina posible.

Como principales gases de expansión se presentan:  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$  y  $H_2O$ , que han de considerarse como productos de la descomposición y reacción de los elementos de la arcilla y sus impurezas.

Materias primas para la fabricación de arcilla y pizarra expandidas son las arcillas, las pizarras y los esquistos arcillosos, que como consecuencia de un elevado contenido de fundentes tienen su punto de reblandecimiento dentro del campo de temperatura indicado.

De acuerdo con las circunstancias de formación durante la evolución de la historia de la tierra estas materias primas son sedimentaciones secundarias. Se ha podido observar que arcillas y pizarras de determinado origen geológico y formación geológica presentan un comportamiento similar a la expansión.

### **3 MAGNITUDES DE INFLUENCIA SOBRE LA EXPANSION DE MATERIAS PRIMAS QUE CONTIENEN MINERALES ARCILLOSOS**

En la fabricación de áridos ligeros artificiales, el comportamiento de los materiales durante el proceso de preparación, cocción, y expansión así como las ventajas de los productos terminados, son consecuencia, en gran parte, de las propiedades específicas de las materias primas de las que se fabrican (2), (8), (9), (10), (11) y (12).

La figura 1 muestra en una exposición esquemática la multiplicidad de factores de influencia, de cuya vinculación y variación antes y durante el proceso de cocción resulta el comportamiento a la expansión de una materia prima.

Mientras que la arcilla expandida se fabrica a escala industrial de acuerdo con métodos empíricamente desarrollados las más de las veces, no han faltado ensayos para predecir de antemano la idoneidad de una materia prima cerámica para la fabricación de áridos ligeros. En este caso se tienen en cuenta, no obstante, la mayor parte de las veces, propiedades relacionadas con la materia prima y se presentan cifras nominales, que o bien resultan de la composición química por la relación de determinados componentes entre sí, o se ha hecho depender la capacidad de expansión de la presencia de elementos minerales muy determinados (5), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20) y (21). Evaluaciones previas de este tipo sólo se hacen condicionalmente.

Casi coincidiendo con esto, en los trabajos de investigación existentes hasta ahora se viene a expresar que, dada la compleja naturaleza del proceso de expansión en el caso de materias primas que contienen minerales arcillosos, no se ha podido encontrar una relación universalmente válida con las propiedades de expansión que podían esperarse, mediante métodos de investigación químicos, espectrográficos, petrográficos, rayos X o análisis térmico diferencial.

Se ha visto más bien que toda materia prima tiene sus propiedades características y debe ser investigada individualmente en relación con sus mejores condiciones de expansión.

## 4 PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACION

La necesidad existente de un enjuiciamiento de materias primas para la fabricación de áridos ligeros y las investigaciones sistemáticas de la eficacia de factores de influencia en la expansión de materias primas que contienen minerales arcillosos, dieron ocasión a presentar procedimientos de investigación adecuados y a examinar sus posibilidades de aplicación.

Siguiendo el principio fundamental de que los conocimientos más instructivos acerca del desarrollo de las reacciones cerámicas con el calor exigen métodos sistemáticos de trabajo de alta temperatura, en estas investigaciones se aplicaron los procedimientos que puedan dar luz acerca de los criterios de cesión de gas y del comportamiento a la fusión, considerados como esenciales para el proceso de expansión.

Deben describirse, tanto la investigación del comportamiento al reblandecimiento y fusión de materias primas cerámicas en el microscopio de calentamiento como los métodos de ensayos de laboratorio, junto con algunos resultados de los mismos.

### 4.1. Ensayo con el microscopio de calentamiento

Con este procedimiento puede observarse una muestra que se encuentra en el horno durante su calentamiento y se puede captar fotográficamente su modificación en la forma.

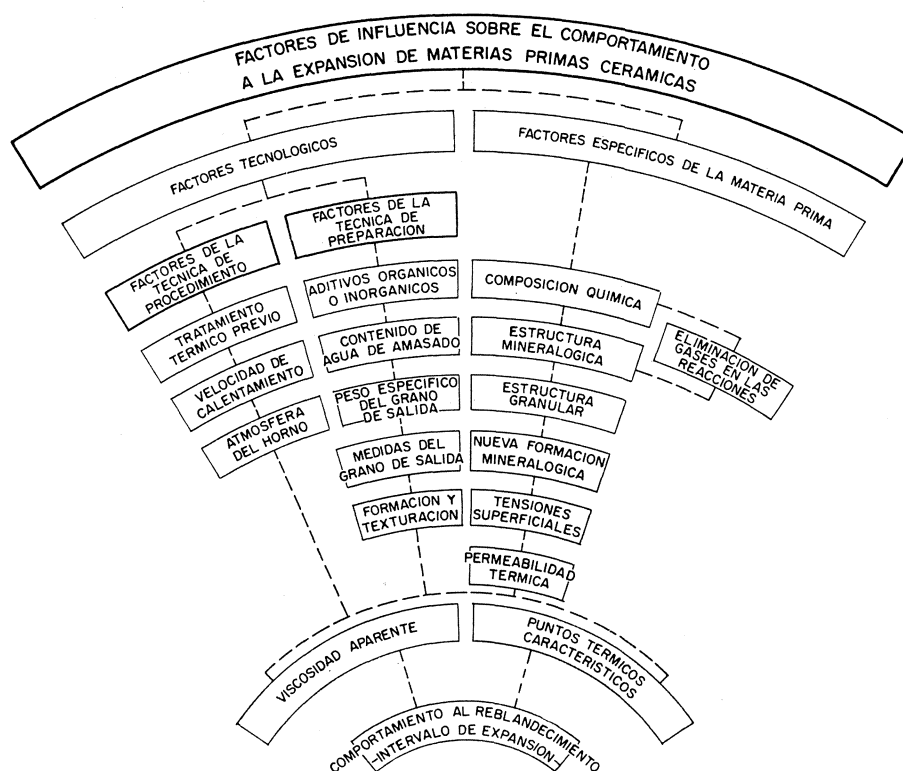


Fig. 1.—Factores de influencia sobre el comportamiento a la expansión de materias primas cerámicas.

Se disponía de un microscopio de calentamiento-Leitz, equipo JIA, con una lámpara Xenon de alta presión y un horno para temperaturas hasta unos 1.750°C con iluminación transversal para investigaciones con luz reflejada.

Durante el ensayo, la muestra de forma cúbica y 3 mm de lado proyecta, a través de un microscopio, una imagen de sombra ampliada sobre la placa esmerilada de observación o, sobre una película de pequeña imagen, respectivamente. La valoración de las fotografías se hace relacionando la superficie sombreada con las medidas iniciales de la muestra.

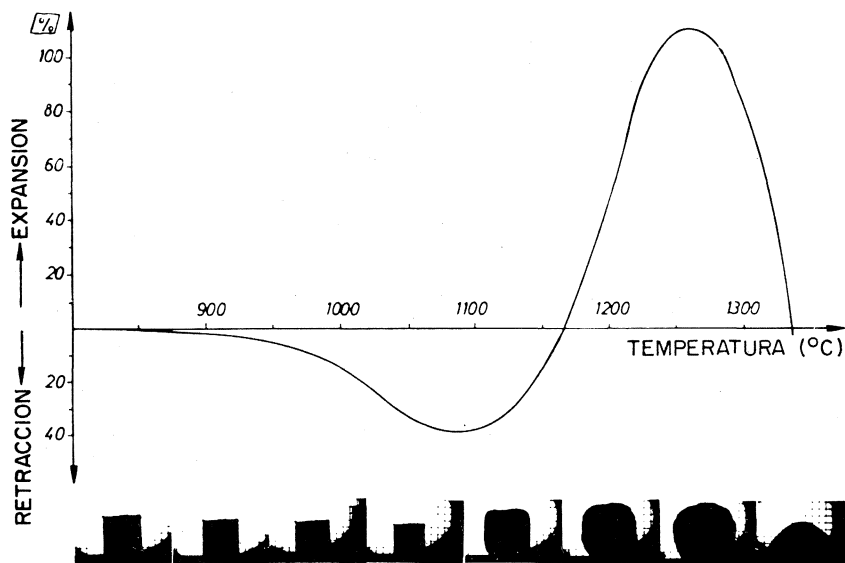


Fig. 2.—Toma de imágenes pequeñas de la muestra durante el calentamiento con la curva de fusión deducida a partir de ellas.

Este método permite la obtención de curvas de contracción-dilatación, como se representa en la figura 2 y determinaciones semicuantitativas mediante comparaciones de estas curvas entre sí.

#### 4.2. Ensayo de expansión en el laboratorio

Los ensayos de expansión a escala de laboratorio deben considerarse útiles:

1. si los resultados son consecuencia de una evaluación fundamental de la capacidad de expansión de una materia prima,
2. si el método de investigación se ha dispuesto de tal modo, que es posible una aproximación a un desarrollo técnico del procedimiento, y
3. si la reproducibilidad de los resultados es tan buena que al variar los factores de influencia el efecto sobre el resultado de expansión puede correlacionarse con las distintas condiciones y no se encuentran en el campo de dispersión de medida.

#### 4.2.1. Método de tres etapas

En los procedimientos de laboratorio corrientes hasta ahora no se cumplen, o sólo se cumplen parcialmente. El procedimiento que se describe la mayor parte de las veces en la literatura y se practica en muchos laboratorios es el tratamiento de las materias primas en 3 etapas como se representa esquemáticamente en la figura 3. En este caso, se procede de forma que a las muestras colocadas en estufa a 100°-110°C se les sustrae el agua retenida mecánicamente. En un segundo paso se expulsa el agua combinada químicamente a los minerales arcillosos, a temperaturas entre 300° y 600°C. Ambos pasos son necesarios para evitar el estallido que se presenta en las materias primas por espontánea evaporación del agua por un sobrecalentamiento local. Finalmente, se realiza el ensayo de expansión en un horno, que se mantiene a una temperatura comprendida entre 1.050° y 1.250°C.

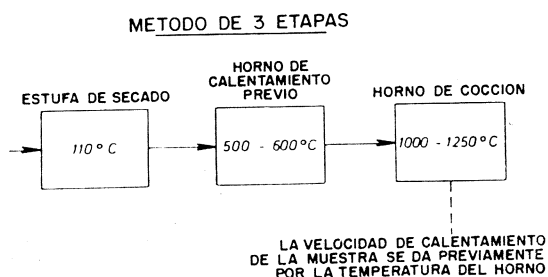


Fig. 3.—Método de tres etapas para la investigación de la capacidad expansiva de materias primas.

Este procedimiento no sólo es desfavorable por la prolijidad del manejo y el empleo de tres hornos o estufas, sino que, debido a los efectos incontrolables del traslado de las muestras al horno de cocción y las variaciones de temperatura producidas al abrir y cerrar dichos hornos o estufas, existe una reproducibilidad muy mala de los resultados. No es posible la regulación de atmósferas definidas de gas. Además este procedimiento sólo permite el choque térmico, que depende de la temperatura final, pero no investigaciones con diferentes calentamientos por lo que apenas ofrece similitud con los procedimientos a gran escala corrientes en la industria.

#### 4.2.2. Método del tubo transversal

Cernjak (22) sustituyó el principio estático del procedimiento de tres hornos por otro dinámico, al calentar las muestras de arcilla de acuerdo con una curva de cocción, aproximándose más a las condiciones reinantes en los hornos industriales.

Para su ensayo eligió un horno tubular calentado eléctricamente, tal como se presenta esquemáticamente en la figura 4.

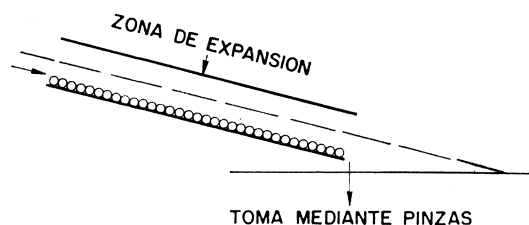


Fig. 4.—Horno transversal para investigación en laboratorio de arcillas según Cernjak (22).

El calentamiento por medio de arrollamientos controlables se efectúa de tal manera que la temperatura de expansión se alcanza en el centro del horno. Si las bolas de arcilla colocadas unas tras otras en el horno situado transversalmente se empujan para que pasen a un determinado ritmo, se establece una curva de cocción.

Este método representa un gran progreso en comparación con el procedimiento de las 3 etapas.

Sin embargo las deficiencias de este procedimiento se encuentran en que:

- son limitadas las posibilidades de variación de las curvas de cocción, especialmente en lo que respecta a las velocidades de calentamiento y los tiempos de permanencia a diversos grados de temperatura y en la zona de expansión,
- debe graduarse de antemano la temperatura de expansión ya que las bolas de arcilla que pasan pueden influir sobre ella,
- la fácil formación de fase líquida puede llevar a que se peguen las bolas de arcillas contiguas, y
- debe sobrepasarse un tamaño mínimo de bolas de arcilla.

#### 4.2.3. Método dinámico para la determinación de las propiedades de expansión de materias primas cerámicas en hornos con gradiente de temperatura controlado

Si, de acuerdo con el principio dinámico, han de someterse muestras en un sistema cerrado a programas variables de temperatura-tiempo, existen, fundamentalmente, dos posibilidades:

- a) el material de cocción se calienta con el horno; la curva de cocción depende de la velocidad en el aumento de la temperatura del horno, y
- b) en el horno se ajusta un gradiente de temperatura, en el que se puede mover el material de cocción; la curva de cocción se puede regular con un gradiente constante de temperatura sobre la velocidad inicial.

En el primer caso, la velocidad de calentamiento de hornos suficientemente grandes tiene limitaciones, debido a la potencia eléctrica de las resistencias de calentamiento y al esfuerzo térmico de los elementos del horno.

La segunda posibilidad podría —como se representa en la figura 5— realizarse de tal manera, que en un horno tubular calentado por electricidad se graduase el gradiente de temperatura mediante arrollamientos de calentamiento regulables separadamente, de manera que se alcanzase un aumento de temperatura constante, casi lineal, desde la entrada del horno hasta la temperatura máxima al final del mismo.

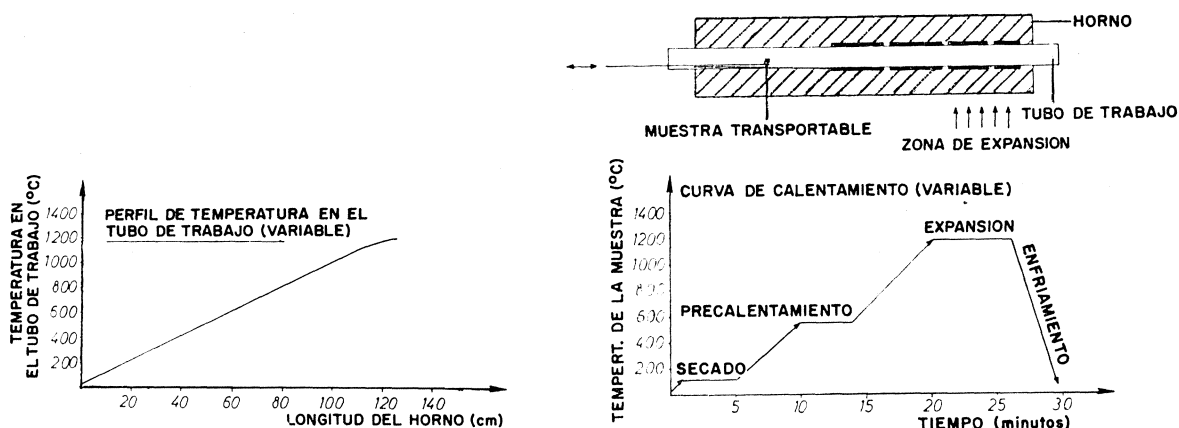


Fig. 5.—Representación esquemática del horno de gradiente de temperatura con perfil de temperatura en el tubo de trabajo y curva de calentamiento del material a cocer.

Con un dispositivo de avance impulsado por motor, que se puede controlar por medio de unidades electrónicas reguladas de acuerdo con programas temperatura-tiempo, se puede mover el material de cocción en el tubo de trabajo del horno y de este modo someterse a condiciones de calentamiento exactamente definidas.

## 5 EL HORNO DE GRADIENTE DE TEMPERATURA MODIFICADO

En la construcción del horno fue fundamental el principio del horno de gradiente de temperatura. Gracias a un método con un nuevo tipo de disposición de conductores térmicos, instalaciones y montajes especiales, así como dispositivos adicionales, se llegó a un aparato tal como se representa en la figura 6.

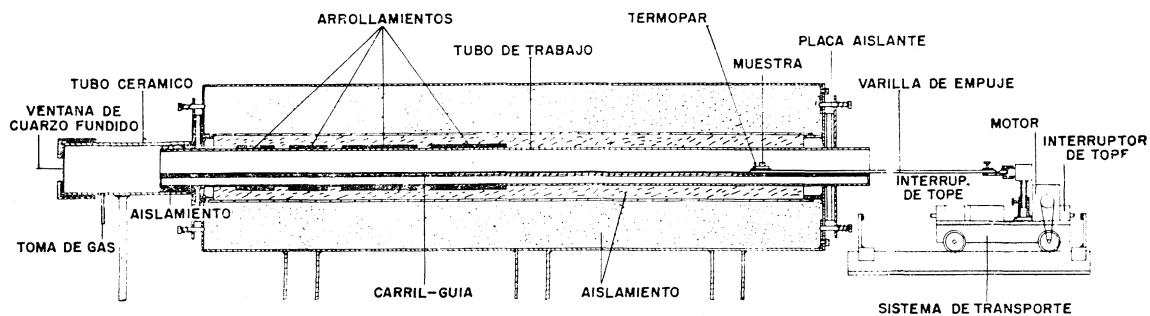


Fig. 6.—Estructura del horno de gradiente de temperatura modificado con dispositivo de colocación y transporte de la muestra.

El soporte de los cuatro arrollamientos de calentamiento es un tubo cerámico de estructura central fina.

Por el lado de la alta temperatura, el tubo de trabajo se puede cerrar a elección con un tapón de refractario aislante o, como se muestra en la figura 6, por medio de un cierre de tubo con una ventanilla de cristal de cuarzo para la observación de las muestras en el interior del horno y con un tubo de salida de gases para la graduación de la atmósfera gaseosa.

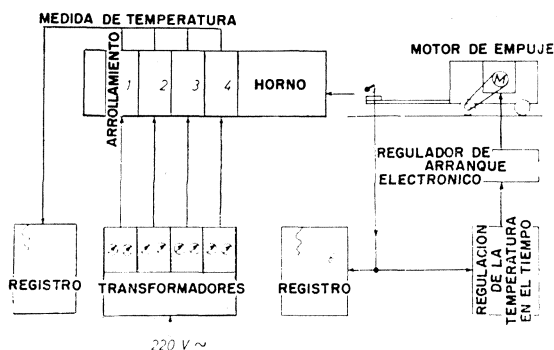


Fig. 7.—Cuadro de conexiones del aparato.

En el último caso, un cierre de tubo que está suspendido en el lado de entrada del tubo de trabajo, sirve para garantizar la estanquidad del recinto del horno por este lado.

En toda la longitud del tubo de trabajo corre un carril cerámico previsto para la conducción de la barra de avance, por medio de la cual se garantiza una marcha constante de las muestras en el horno. En la figura 7 se explica más concretamente el modo de trabajar del aparato.

El horno está conectado a la red de corriente alterna a través de cuatro transformadores combinados en un armario. El calentamiento de los arrollamientos hasta el gradiente de temperatura deseado del tubo de trabajo se efectúa por regulación manual.

Las temperaturas del arrollamiento se controlan por termopares Pt/PtRh y se registran, al igual que las temperaturas de las muestras.

La temperatura de las muestras se regula según un programa temperatura-tiempo, de tal manera, que la salida del regulador actúa sobre el motor de marcha que lleva la muestra a través de la barra de avance con la velocidad de calentamiento teórico al campo de la temperatura teórica. El termopar dispuesto en la proximidad de las muestras, que en un doble tubo capilar es guiado desde el horno por la barra de avance, actúa sobre la entrada del regulador como un indicador del valor real.

Si la muestra alcanza la temperatura teórica en el horno, que ha de mantenerse durante un determinado período de tiempo, se conecta un relé de supresión para evitar una regulación que sobrepase excesivamente el valor teórico.

## 6 REALIZACION DEL ENSAYO

Al comienzo de un ensayo de expansión primeramente se mueve la barra de avance fuera del horno por regulación a mano hasta el punto de que su extremo sea visible junto con la cajita de recocido a la entrada del tubo. La arena de cuarzo que hay en la cajita de recocido debe evitar la adherencia de las muestras en la fusión.

Las muestras se colocan en la cajita de recocido a una distancia siempre igual de la perla soldada del elemento térmico. Tras el arreglo previo del programa del ensayo y conexión del automatismo regulador temperatura-tiempo se introduce la muestra en el tubo de trabajo y sufre un tratamiento, tal como se describe en la figura 8 con el ejemplo de diagrama registrador de una curva de calentamiento original.

Una característica especial del procedimiento reside en que se pueden observar las muestras durante todo el proceso de calentamiento y cocción a través de una ventana de cristal de cuarzo. En la figura 9 se ve el proceso de expansión de una muestra de arcilla registrada en tomas en serie.

La observación durante el proceso de cocción se ha presentado muy instructiva para enjuiciar el comportamiento de una muestra frente a la temperatura. Junto con la curva establecida en el diagrama del registrador relativa al desarrollo del ensayo y a los datos de la muestra expansionada, el registro fotográfico permite una evaluación posterior de la prueba con mayor detalle.

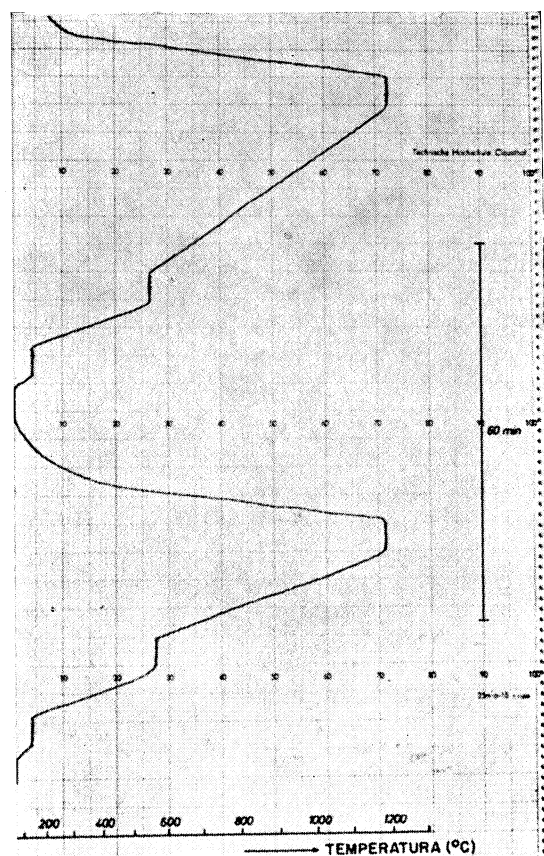


Fig. 8.—Curvas de calentamiento según el plan temperatura-tiempo.



En la figura 9 se pueden determinar el comienzo de la expansión a 970°C y la medida del aumento de volumen con temperatura creciente y tiempo de estacionamiento. Los dibujos de contorno ponen en claro estos procesos.

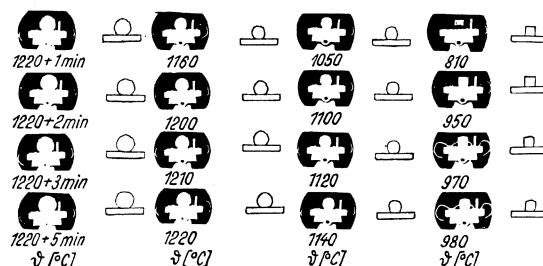


Fig. 9.—Transcurso de expansión de una muestra de arcilla a la velocidad de calentamiento de 80°C/min.

Para la evaluación cuantitativa se amplifican las fotografías con ayuda de una marca de medida, que la muestra en cada caso tiene en el formato original. Mientras la muestra es de forma aproximadamente esférica, se puede averiguar el volumen en la eventual etapa de temperatura o estacionamiento y de este modo establecer el valor de la expansión determinando el diámetro medio o central de la superficie proyectada.

## 7 RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presenta en forma abreviada los resultados de la investigación.

### 7.1. Investigaciones con el microscopio de calentamiento

En la figura 10 se registran las curvas de fusión de un cierto número de arcillas.

En el transcurso de la fusión de arcillas no muy distintas en su composición química se puede ver que existen diferencias considerables en las zonas EP, HKP, y en la zona de reblandecimiento EB, tan importantes para la expansión.

Este diferente comportamiento a la temperatura, junto a la influencia de los elementos químicos dominantes —así como de los fundentes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ —, debe atribuirse a una compleja interacción físico-química de todos los componentes contenidos en la arcilla, de los que resultan las propiedades características de viscosidad propias de una materia prima semejante.

De las curvas de fusión con EB amplio, como en las arcillas 3 y 4, se pueden derivar favorables propiedades de viscosidad para la expansión.

Los EB limitados de las arcillas 6 y 8 permiten concluir la existencia de desfavorables relaciones de viscosidad; la arcilla 6 con un EB extremadamente pequeño debe excluirse de antemano para su uso en la fabricación de arcilla expandida. Esta comprobación coincide con la situación de esta arcilla claramente fuera del campo Riley, en la dirección de proporciones de fundentes más elevadas.

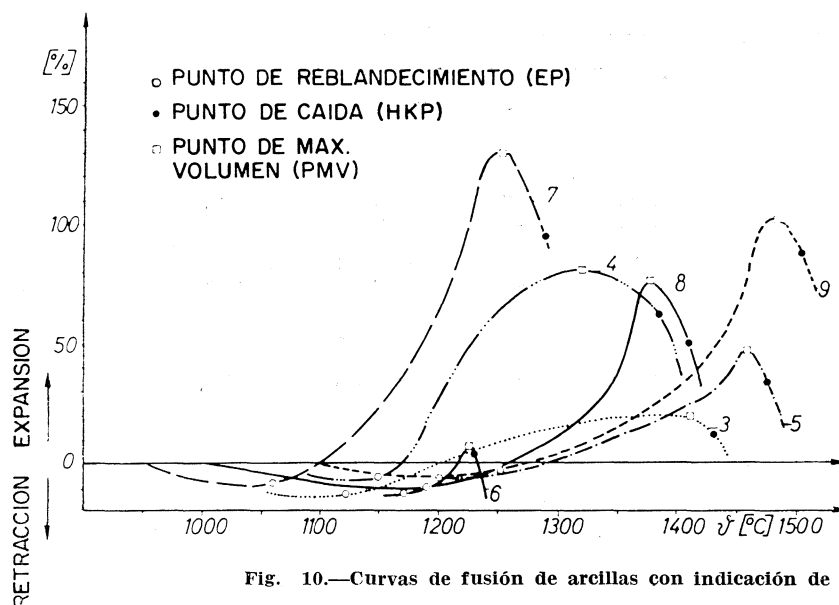


Fig. 10.—Curvas de fusión de arcillas con indicación de EP, HKP, y P.M.V.

Si el EB de una arcilla se extiende, como por ejemplo en el caso de las arcillas 5 y 9, a campos de temperatura elevados, esto puede significar, a pesar de las buenas propiedades viscosas, la exclusión para su uso en la producción de arcilla expandida.

Sin embargo, no es justo sacar como consecuencia la capacidad concreta de expansión por el desarrollo o la dilatación de las muestras, ya que, en virtud de los diferentes campos de temperatura y la diferente cinética de cesión de gases, arcillas con velocidad creciente de calentamiento pueden presentar una capacidad de expansión notablemente modificada.

Con ayuda del método de investigación y valoración empleados se puede determinar también el carácter de la modificación de la viscosidad aparente al calentarse, uno de los factores más importantes en el estudio de la idoneidad de arcillas para la fabricación de materiales expandidos.

Sin embargo, los resultados en el medio ambiente oxidante no dan indicación alguna acerca de las temperaturas absolutas de los puntos térmicos EP y HKP, pues tanto éstas como la modificación del comportamiento viscoso con la temperatura se influyen notoriamente durante la cocción de factores tales como la velocidad de calentamiento y el ambiente gaseoso (5).

#### 7.1.1. El comportamiento expansivo al modificarse la velocidad de calentamiento

Al modificarse la velocidad de calentamiento de 10°C/min se ha podido comprobar la influencia sobre el comportamiento a la fusión y a la expansión en muestras del mismo tipo de arcilla, como se observa en la figura 11.

Se ha visto en todas las arcillas investigadas que con una velocidad creciente de calentamiento disminuye la capacidad expansiva.

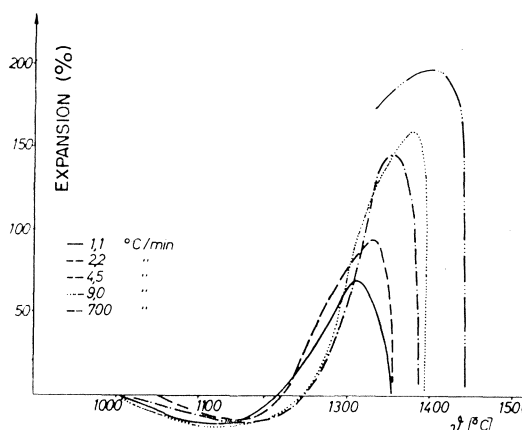


Fig. 11.—Comportamiento a la fusión y expansión de una arcilla en función de la velocidad de calentamiento.

Tanto el EP como el  $P_{Mv}$  se desplazan hacia temperaturas superiores al aumentar la velocidad de calentamiento.

Una velocidad de calentamiento más elevada provoca, en arcillas de reducido EB, una acción expansiva relativamente mayor que en el caso de arcillas con amplio EB.

## 7.2. Investigaciones en el horno de gradiente de temperatura modificado

### 7.2.1. El contenido de agua en la materia prima arcillosa

La observación de que las arcillas preparadas en seco muestran peor comportamiento a la expansión que después de una preparación semihúmeda (15) dio motivo para someter este efecto a una investigación más precisa.

Partiendo de material seco se aumentó la adición de agua de la masa arcillosa y los productos brutos prensados a una presión constante fueron sometidos a iguales condiciones de calentamiento en cada una de las etapas de humedad.

Con esta investigación se pudo mostrar la relación existente entre el factor de expansión  $K_B$   $\left( K_B = \frac{\text{volumen expandido}}{\text{volumen original}} \right)$  y el contenido de agua, representándose en la figura 12.

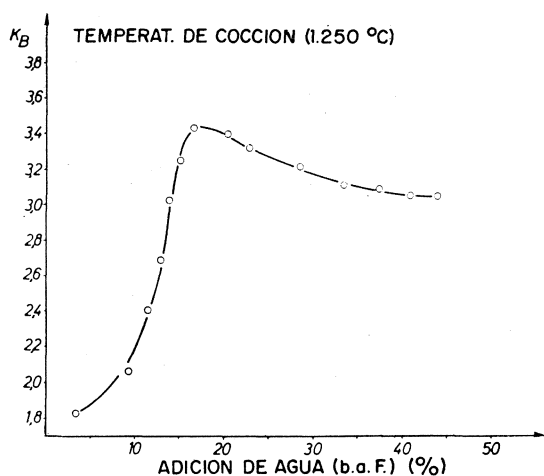


Fig. 12.—El valor de expansión  $K_B$  en función del contenido de humedad del material crudo.

Según esto, el mejor comportamiento expansivo lo mostraron las materias primas, cuyos contenidos de agua se encontraban en la zona de 18 a 25 %, en la que las masas cerámicas se pueden deformar, por lo general, con mayor facilidad.

Se pudo comprobar también que con una creciente adición de agua surge una modificación del volumen aparente de los productos crudos secos, de tal manera que el volumen máximo aparece con una adición de agua del 16,7 %, valor con el que se consiguió asimismo el mayor volumen en la expansión.

Los efectos o resultados más favorables, en el caso de las arcillas, se pueden esperar cuando se elige el contenido de agua de amasado que corresponde con una buena plasticidad.

Los efectos anteriormente mencionados de las modificaciones del volumen aparente tienen su causa inmediata en el secado del producto bruto arcilloso.

Como este proceso concluye en la cocción, en todo caso, antes de la entrada del producto en la zona de cocción, es natural que el efecto de la adición de agua se base en su acción indirecta sobre la contracción de volumen del producto bruto durante el secado y en el aumento de volumen aparente unido a ello.

Si esta suposición es cierta, los materiales brutos, a los que se confieren densidades aparentes crecientes mediante prensado con un contenido constante de agua, deben presentar un comportamiento expansivo similar.

### 7.2.2. La influencia de las densidades aparentes de origen en la capacidad expansiva

Para estas investigaciones se prepararon materiales con un contenido constante de agua de 13,0 % en peso y con presiones crecientes de moldeo, de manera que se dispuso de materiales de partida de diferentes densidades aparentes. También a estas muestras se les dio las mismas medidas de origen después del secado mediante rebaje con torno y fueron sometidas a las mismas condiciones de cocción que en la investigación de la influencia de la adición de agua. Los resultados se presentan en la figura 13.

El resultado confirma la opinión de que una mayor densidad de la materia prima favorece el proceso de expansión. Con una densidad inicial creciente aumenta, en igualdad de condiciones de cocción, el índice de expansión.

El desarrollo de las curvas en las funciones cantidad de agua añadida/ $K_B$  y densidad inicial/ $K_B$  son casi idénticas hasta llegar a la mayor densidad con añadido de agua óptimo.

Una densidad aparente más elevada junto con una mayor ocupación de espacio y densidad de empaquetamiento produce una multiplicación del número de puntos de contacto de las partículas de la masa. Según Oel y Tomandl (23), Haase y Lange (24) y Kukolew y colaboradores (25) el proceso de sinterización transcurre tanto mejor y más regularmente cuanto mayor es la densidad aparente de un cuerpo. Cuanto mejor se cumple esta condición, que depende también en gran manera de la granulación del material, tanto más baja se puede mantener la temperatura de cocción, para llegar al mismo resultado de cocción.

A la inversa, esto significa que el mantener constante la temperatura de cocción con una densidad aparente del material creciente significa una elevación aparente de temperatura, tal como se ha llegado a expresar en el aumento de los valores de expansión en los resultados.

A estos se añade el efecto de que al descenso de las temperaturas de sinterización y ablandamiento va unido el cierre prematuro de las vías de difusión del gas y también una disminución de la cesión de gases de expansión, de manera que se dispone de una parte mayor de los gases productores de la expansión.

### 7.2.3. La influencia de la velocidad de calentamiento en la capacidad de expansión

La influencia de la velocidad de calentamiento en el comportamiento expansivo y en el grado de expansión de las arcillas se conocía de antemano (2), (3), (20), (21), (26), (27), (28) y (29) y pudo mostrarse con los resultados microscópicos de calentamiento. Este conocimiento, que hasta ahora ha sido empírico, se tuvo en cuenta prácticamente de diferentes maneras cuando el horno de tambor en contracorriente tomado de la industria del cemento para la producción de agregados ligeros fue sustituido por otros procedimientos: hornos rotatorios en contracorriente de dos secciones con diferentes diámetros y número

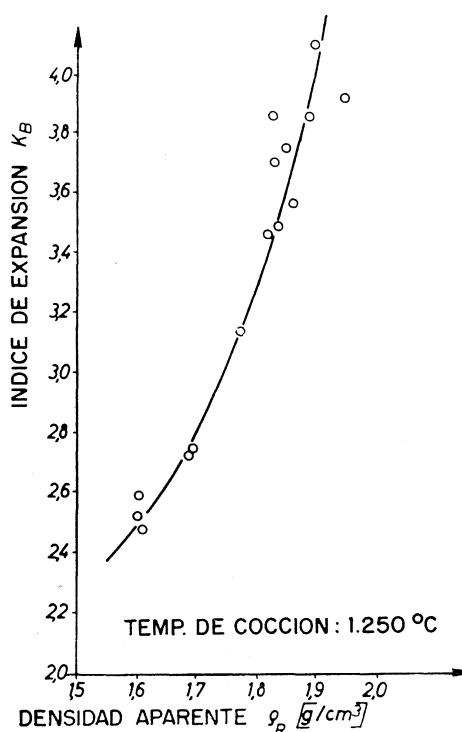


Fig. 13.—El valor de expansión en función del peso específico aparente del material de partida  $G_R$ .

de revoluciones y procedimientos de choque térmico tales como el procedimiento de corriente de circulación (30), el procedimiento del lecho fluidizado o el procedimiento de termomutación de corriente continua (31). Con ello se dieron mayores posibilidades de variación en las características de calentamiento.

Este factor de influencia sobre el comportamiento expansivo debe recibir especial atención porque sólo por la exacta determinación del comportamiento al calentamiento de una arcilla se puede aplicar una tecnología óptima especialmente adecuada a esta materia prima.

El calentamiento de las materias primas se efectúa de tal manera que la variación de la velocidad de calentamiento se llevó de 5°C/min a 350°C/min en el campo de temperatura comprendido entre 520° y 1.220°C.

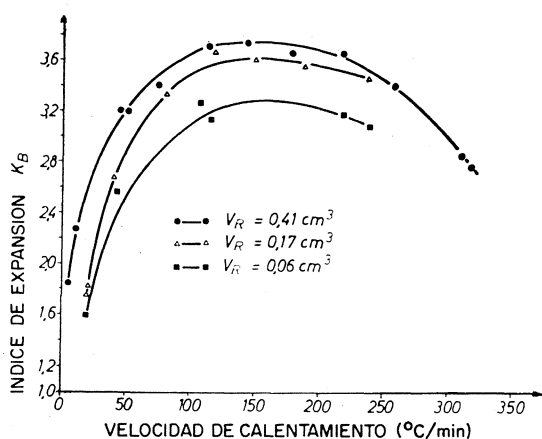


Fig. 14.—Valor de expansión  $K_B$  en función de la velocidad de calentamiento y de los volúmenes de las muestras.

En el ejemplo de la figura 14 se han resumido los resultados. Todas las curvas se caracterizan por el hecho de que tienden a los máximos valores de expansión al crecer la velocidad de calentamiento, para descender nuevamente. Para cada velocidad de calentamiento es posible una evaluación cuantitativa del valor correspondiente de expansión.

La medida del aumento de temperatura es pues decisivo en este sentido, de tal forma que se pueden obtener diferencias en los valores de expansión de más del 100 %.

La influencia del tamaño de las muestras mostró los resultados más favorables de expansión con volúmenes de origen  $V_R = 0,4$  a  $0,7 \text{ cm}^3$ .

Los aumentos más intensos de los valores de la expansión se presentan hasta una velocidad de calentamiento de 120°C/min. Entre 120° y 200°C/min los valores de expansión permanecen casi constantes, para descender nuevamente con velocidades de calentamiento de 250°C/min.

El hecho de que a temperaturas de calentamiento elevadas existan notables caídas de temperatura entre la superficie y el centro de una muestra, hace que se comprenda el que los procesos que aquí discurren en oposición provoquen un mejoramiento de la capacidad de expansión. Cuanto más rápidamente se calienta un material, antes se inicia la sinterización y estanquidad de la superficie con la formación inicial de la fase líquida y tanto mayor es la diferencia entre la temperatura interna y la temperatura de la superficie.

La diferencia de temperatura entre la superficie pirolástica y el interior, que pudo medirse en investigaciones propias, tiene como consecuencia que en el centro de la masa arcillosa, pueden desarrollarse todavía procesos de cesión de gas, que se concluyen en la proximidad de la superficie.

No obstante se ha limitado un aumento excesivamente grande de la velocidad de calentamiento y, en consecuencia, del grado de aprovechamiento de las reacciones de cesión de gas por debajo de la temperatura de sinterización, porque a consecuencia de tensiones térmicas y de reacciones de desgasificación demasiado espontáneas dentro de los materiales surge una prematura formación de resquebrajamiento o estallidos.

## **RESUMEN**

La necesidad de investigación de la idoneidad de las materias primas cerámicas para la fabricación de áridos ligeros ha hecho que se realicen grandes esfuerzos en este sentido.

Con el método del microscopio de calentamiento son posibles la determinación del carácter de la modificación de la viscosidad y comprobaciones semicuantitativas acerca del comportamiento a la expansión de materias primas cerámicas con un aumento lineal de temperatura.

Con el horno de gradiente de temperatura modificado se describe un procedimiento de laboratorio, que permite realizar investigaciones de expansión de acuerdo con un principio dinámico observando condiciones definidas de ensayo, que pueden aproximarse a las circunstancias de los procesos técnicos.

Se tratan algunos resultados obtenidos con estos procedimientos.

## **BIBLIOGRAFIA**

- (1) SCHELLMANN, W.: *Sprechsaal* 101 (1968), S. 306-307.
- (2) FUSS, D. A.: Thesis at the State University of New York College of Ceramics, Alfred University 1961.
- (3) RILEY, Ch. M.: *J. Amer. Ceram. Soc.* 34 (1951), S. 121-128.
- (4) LAWRENCE, W. F. Jr.: Thesis at the Faculty of the New York State College of Ceramics, 1949.
- (5) DOOLITTLE, B.; BAIRD, F. E.: *Washington State Institute of Tecnology, Bull.* 235 (1956), S. 1-12.
- (6) KAEMPFER, F.: *Zement-Kalk-Gips* 11 (1958), S. 437-442.
- (7) PIVEN, I. J.: *Stroitel'nye materialy* 5 (1959), S. 29-30.
- (8) BERGMANN, K.: *Ziegelind.* 19 (1966), S. 426-431.
- (9) EVERHART, J. O.; EHLERS, E. G.; JOHNSON, J. E.; RICHARDSON, J. H.: *The Ohio State University Columbus, XXVII* (1958), No. 3.
- (10) ROSENBERGER, H.: *Z. f. angew. Geol.* 15 (1969), S. 241-247.
- (11) HOFFMANN, H.: *Informationsblatt "Der Leichtzuschlagstoff"* 4 Sonderausgabe Januar 1968.
- (12) PILTZ; ATZKERN; FOSSUM: *Literaturrecherche L 284, Institut für Ziegelforschung Essen e.V., unveröffentlicht.*
- (13) BUDNIKOV, P. P.; KOLESNIKOV, E. A.: *Neorganceskie materialy (Sbornik)* (1968), S. 217-226.
- (14) BUDNIKOV, P. P.; KOLESNIKOV, E. A.: *Stroitel'nye materialy* 12 (1966), S. 19-22.
- (15) BUDNIKOV, P. P.: *Neorganceskie materialy (Sbornik)*, (1968), S. 212-216.
- (16) PAVLOV, V. F.: *Steklo i keramika* 16 (1959), S. 26-31.
- (17) PAVLOV, V. F.: *Steklo i keramika* 17 (1960), S. 21-25.
- (18) HILL, R. D.; CROOK, D. N.: *Austr. J. Appl. Sc.* 11 (1960), S. 374-384.
- (19) WILSON, H. S.: *J. Canad. Ceram. Soc.* 44 (1953), S. 44-50.
- (20) AUSTIN, Ch. R.; NUNES, J. L.; SULLIVAN, J. D.: *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication No. 1.486* (1942).
- (21) SCHELLMANN, W.; FASTABEND, H.: *Geol. Jb.* 82 (1963), S. 1-20.
- (22) CERNJAK, Ja. N.: *Stroitel'nye materialy* 5 (1959), S. 32-34.
- (23) OEL, H. J.; TOMANDL, G.: *Veröffentlichung des Instituts für Werkstoff-Wissenschaften III, Erlangen, Februar 1970.*
- (24) HAASE, Th.; LANGE, J.: *Silikattechn.* 7 (1956), S. 222-223.
- (25) KUKOLEW, G. W.; MISCHULOWITSCH, L. W.; SYRIKIN, J. M.: *Silikattechn.* 4 (1953), S. 329.
- (26) EHLERS, E. G.: *Amer. Ceram. Soc. Bull.* 37 (1958), S. 95-99.
- (27) GORTON, R. E.: Thesis, Alfred University, New York, 1960.
- (28) MAKAROW, N. W.: *Ziegelind.* 19 (1966), S. 441-443.
- (29) BLYUMEN, L. M.: *Steklo i keramika* 17 (1960), S. 32-36.
- (30) DENNERT, H. V.: *Silikat-J.* 5 (1966), S. 20-26.
- (31) HOFFMANN, H.: *Informationsblatt der Erzeugnisgruppe Leichtzuschlagstoffe* 5 (1969), Nr. 3 und 4.