

# EL SECADO DE LOS PRODUCTOS CERAMICOS

Dr. D.A. ESTRADA  
Dr. J. ESPINOSA DE LOS MONTEROS  
Instituto de Cerámica y Vidrio.

## RESUMEN

Se expone resumidamente el proceso de secado en cerámica, señalando los conceptos fundamentales del mismo, las distintas técnicas de secado aplicadas a los productos cerámicos (infrarrojos, alta frecuencia, atomización y aire caliente) y las relaciones analíticas que rigen este proceso. También se considera el rendimiento térmico de un secadero y se expone un ejemplo de un diagrama de trabajo útil para determinar las condiciones de secado de las piezas consideradas. Por último, se hace una clasificación general de los secaderos y se tratan los defectos de secado.

## SUMMARY.

The process of ceramic drying is described in a summarized way, indicating its basic concepts, the different drying techniques applied to ceramic products (infrared, high frequency, atomization and hot air) and the analytical relationships that control this process.

The thermal efficiency of a dryer is also considered and an example is shown of a working diagram useful for determining the conditions of drying of the parts considered.

Finally, a general classification is made of dryers and drying defects are considered.

## RESUME

On expose d'une façon abrégée le procès de séchage en céramique soulignant les concepts fondamentaux du même, les diverses techniques de séchage appliquées aux produits céramiques (infrarouges, haute fréquence, atomisation, air chaud) et les relations analytiques qui régissent ce procès. On considère aussi le rendement thermique d'un séchoir et on expose un exemple d'un diagramme de travail utile pour déterminer les conditions de séchage des pièces considérées. Pour en finir, on fait une classification générale des séchoirs et on travail les défauts du séchage.

## ZUSAMMENFASSUNG

Eine kurzgefasste Beschreibung des keramischen Trocknungsprozesses, seiner Grundbegriffe, der im einzelnen bei Keramikerzeugnissen zum Einsatz gelangenden technischen Verfahren (Infrarot-, Hochfrequenz-, Zerstäubungs- und Heissluftverfahren) sowie der den Prozess steuernden analytischen Beziehungen. Es werden ferner der Wärmewirkungsgrad einer Trockenanlage untersucht und anhand eines Nutzerarbeitsdiagramms die Trocknungsbedingungen einzelner Keramikobjekte dargelegt. Abschliessend erfolgt eine allgemeine Einteilung der Trockenanlagen und wird auf beim Trocknen entstehende Fehler eingegangen.

El secado es una operación que, en general, consiste en separar un fluido de otro cuerpo, inicialmente ligados entre sí bajo estados dados, con el fin de obtener el cuerpo en un estado distinto del estado final del fluido.

En cerámica se entiende generalmente por "secado" la eliminación del agua contenida en un producto cerámico moldeado ó no. Es sin duda la operación más individualizada dentro del conjunto del proceso de fabricación de productos cerámicos. Existen en la industria, en general, diversos métodos de secado basados en principios muy distintos. Así se puede secar un producto mediante uno ó más de los métodos siguientes: Absorción, adsorción, filtración, centrifugación, evaporación, vaporización, condensación y liofilización. En la industria cerámica el método que se emplea por ahora casi exclusivamente es el de evaporación, aunque en la actualidad va ganando terreno poco a poco el de vaporización.

El producto a secar en cerámica consiste generalmente en una mezcla de materiales inorgánicos con un contenido en agua de hasta un 35% dispersa en toda su masa. Por tanto, las partículas minerales de una pasta cerámica blanda se encuentran inmersas en un retículo líquido constituido por canales capilares de agua. Durante el secado, el agua debe de ser llevada desde el interior de la pieza, a través de dichos capilares, hasta la superficie, donde podrá evaporarse

libremente, por lo cual habrá que tener en consideración los dos factores siguientes: La velocidad de difusión y la velocidad de evaporación.

El delicado problema del secado en cerámica, se resuelve en gran parte cuando la velocidad de evaporación no supera a la velocidad de difusión del agua desde el interior a la superficie de la masa, y el agua puede difundirse y evaporarse a una velocidad tal que no dañe el material que se está secando.

El agua se moverá a través de los huecos que dejan las partículas laminares, es decir, en los canales capilares formados por éstas, con una velocidad de difusión que depende:

- de la temperatura de la pieza.
- de la naturaleza mineralógica del material.
- de la magnitud y forma de las partículas y por tanto de los capilares.
- del porcentaje de agua en la pasta.
- de la dinámica e importancia de la contracción de la pasta.
- de la relación entre la tensión de vapor del líquido en la pieza y la presión de vapor del aire, es decir, de su estado higrométrico y de su humedad relativa.

La difusión será posible mientras haya evaporación en la superficie de la pieza, y puesto que la evaporación depende

de la relación entre la tensión de vapor del líquido y la presión de vapor de la atmósfera que rodea al sistema, es obvio que la velocidad de difusión depende también de dicha relación.

Si se calienta el material a secar a una temperatura no superior a 100°C, en un ambiente cuya atmósfera esté saturada de vapor de agua (100% de humedad relativa) el sistema líquido-vapor estará en equilibrio y por lo tanto no habrá evaporación alguna. Si, manteniendo constante la temperatura, se disminuye la humedad relativa del aire, esto es, se varía su estado higrométrico, se inicia inmediatamente la evaporación y su velocidad será tanto más grande cuanto menor sea el porcentaje de humedad relativa de dicho aire.

Con la evaporación, la temperatura de la pieza tiende a disminuir. Esto debe ser absolutamente evitado, porque a una caída de la temperatura de la pieza corresponde, o bien una disminución de la velocidad de difusión del agua en el material, o bien una disminución de la velocidad de evaporación a causa de la pequeña tensión de vapor del líquido a evaporar, con el peligro de poder llegar al punto de rocío, condensándose vapor de agua sobre las piezas, lo cual sería desastroso.

Para poder prever el comportamiento al secado de los productos cerámicos recién moldeados, es necesario tener en cuenta, además de los factores ya indicados, las modifi-

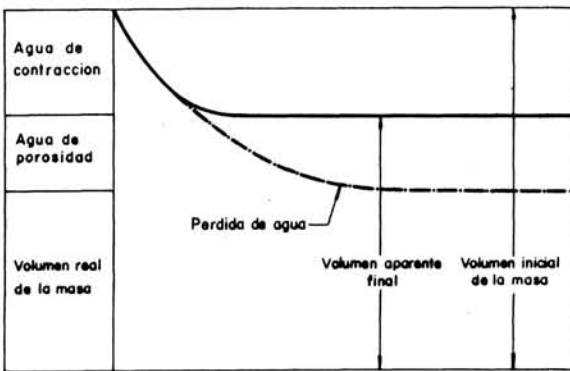


Figura 1.

caciones que se verifican en la pasta durante la evaporación del agua de amasado, es decir, la dinámica del secado. Estas modificaciones fueron estudiadas por primera vez por Bourry en el año 1897, quien propuso un modelo en el cual el ciclo completo del secado comprende tres fases distintas (figura 1):

- En la primera fase, la pasta disminuye de volumen proporcionalmente al agua eliminada. Este período es peligroso y debe efectuarse lentamente. El agua perdida se llama "agua de contracción".
- En la segunda fase, comienzan a formarse huecos y la pasta sigue contrayéndose algo hasta alcanzar el **punto crítico**, en el cual cesa la contracción. Las partículas han llegado a estar en contacto directo unas con otras. Hay peligro de formación de grietas o de deformaciones hasta que se alcanza este punto. El agua perdida se llama "agua de poros".
- En la tercera fase, el volumen aparente de la masa no disminuye y el volumen de los huecos que se producen es proporcional al del agua eliminada. Ya no hay el peligro citado y por lo tanto el secado se puede acelerar.

Los resultados de las medidas se representan gráficamente, poniendo en ordenadas los volúmenes de la arcilla, del

agua y de los poros, y en abscisas la duración del secado en horas. Se obtiene así el llamado diagrama de secado de Bourry (fig.2), que aún se emplea bastante hoy en día. Pero desde hace tiempo se viene observando que esta representación es demasiado teórica y que se ajusta difícilmente a la realidad en la mayoría de los casos. Realmente sólo es útil en el caso de arcillas con bajo contenido en desgrasantes, y se presta mal al confrontamiento entre distintas muestras.

En el año 1921, Bigot mide la contracción lineal y la pérdida de agua en peso durante el secado de diversas materias primas al estado de pasta blanda, y representa los resultados de sus medidas llevando en ordenadas el peso de las mues-

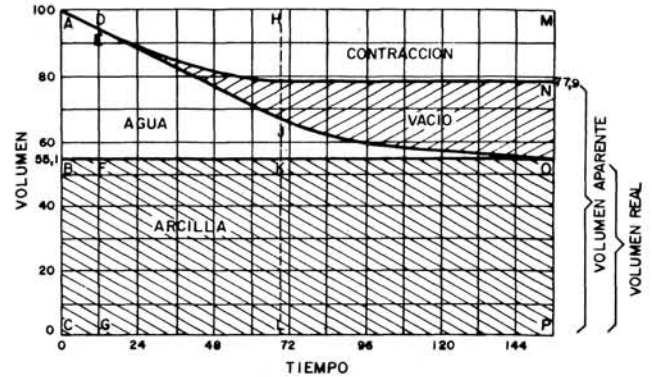


Figura 2.

tras (poniendo 100 en el origen para el peso de las probetas secas) y en abscisas la longitud de las mismas (100 mm. recién moldeada), como puede verse en la figura 3A. Esta representación ha sido muy utilizada y aún lo es bastante, pero como en el caso anterior, las curvas se prestan mal al confrontamiento entre muestras. Por otra parte, P. Munnier y G. Hirne, en 1951, pusieron en evidencia que este método de representación es irracional, puesto que en ordenadores

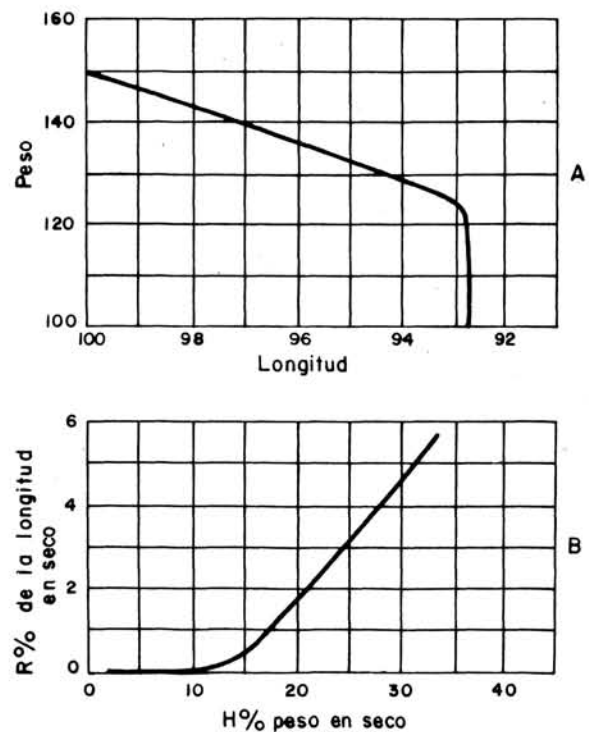


Figura 3.

se valora la pérdida de humedad con relación al material en estado seco, mientras que en abscisas aparecen las variaciones de longitud con relación a las dimensiones de la probeta en estado húmedo.

Estos últimos autores propusieron para representar el proceso de secado en productos cerámicos, la curva llamada de "contracción absoluta" llevando en ordenadas las contracciones en tantos por ciento de la longitud de la probeta seca, y en abscisas la humedad en % del peso en seco. Se obtiene así la gráfica de la figura 3B, llamada representación de Munnier y Gerard-Hirne. Esta representación de la dinámica del proceso de secado, se adapta mejor que las otras a la confrontación de muestras distintas.

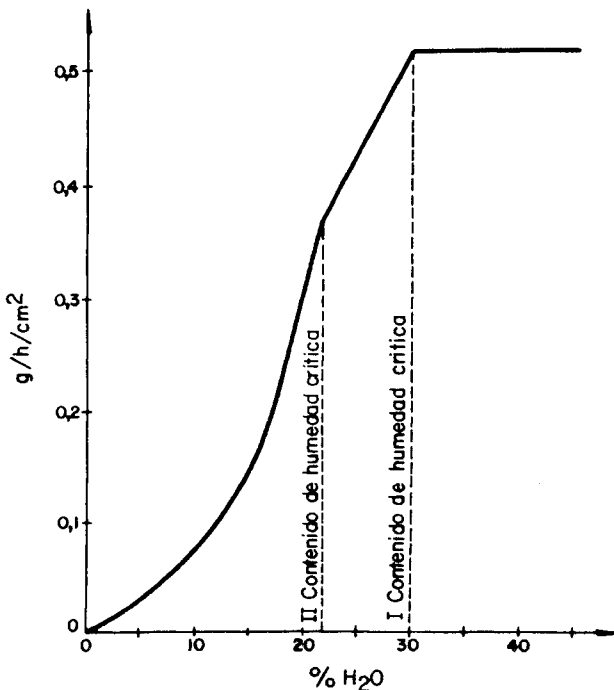


Figura 4.

Vistos estos antecedentes vamos a exponer los conceptos fundamentales de la teoría clásica del secado en cerámica:

En condiciones ambientales constantes el secado de un material húmedo en función de su humedad, puede dividirse en tres períodos (fig. 4): Un primer período en el cual la velocidad de evaporación es constante e independiente de la naturaleza del material y de su humedad; un segundo período en el cual la velocidad de secado es función lineal del contenido en humedad del material mismo, y un tercer período en el cual la relación entre la velocidad de secado y la humedad residual no es lineal. Los dos valores de humedad, funciones de la naturaleza del material en condiciones ambientales fijas, que corresponden al principio del segundo del tercer período del secado se indican respectivamente como primero y segundo contenido de humedad crítica (puntos críticos).

En muchos casos (fig. 5), no puede definirse la separación entre los períodos segundo y tercero, y entonces hay un sólo valor de humedad crítica (punto crítico), que siempre es función de la naturaleza del material en condiciones ambientales fijas, separando el "período de secado a velocidad constante" del "período de secado a velocidad variable no linealmente con el contenido de humedad del material".

En el primer período la superficie del material se comporta como si fuese una superficie especular de agua, y la "velocidad de evaporación" es independiente de la natura-

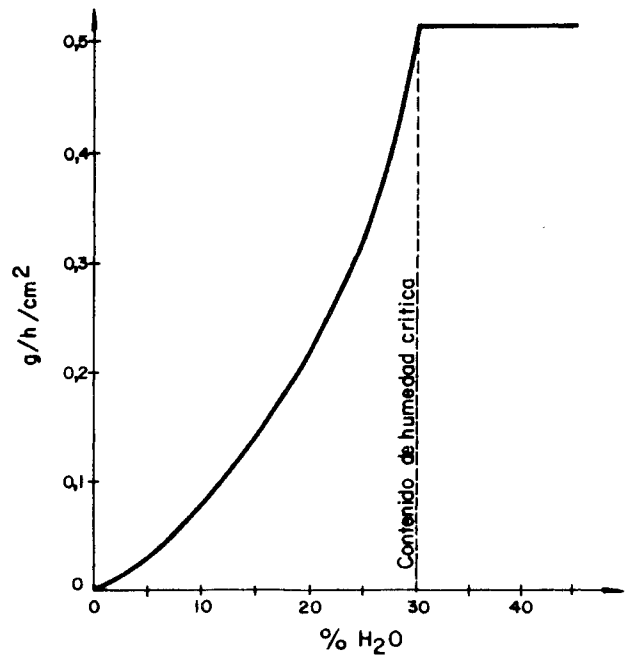


Figura 5.

leza de la pieza y de su humedad, siendo únicamente función de las condiciones ambientales (temperatura, velocidad y estado higrométrico del aire): el agua pasa del corazón a la superficie de la pieza, con una velocidad de paso igual a la velocidad de evaporación superficial, manteniéndose por tato invariable la humedad superficial.

En el segundo período, la velocidad de migración del agua a la superficie de la pieza es inferior a la velocidad de evaporación superficial: Como consecuencia, la velocidad de secado decrece proporcionalmente a la reducción de la velocidad de migración interna, función, entre otros factores, de la humedad misma de la pieza.

En el caso de materiales prensados con contenidos de humedad variables entre el 5 y el 10%, que es el caso de materiales para revestimiento y pavimentación, el relativamente bajo contenido de humedad de prensado implica en las condiciones ambientales normales un secado principalmente en condiciones de velocidad variable, siendo en tal caso el contenido de humedad inferior al valor de humedad crítica.

En este caso, la velocidad de secado debe ser condicionada al fenómeno de migración interna, más lento, para evitar que un secado superficial, más rápido, dé lugar a un agrietamiento de la pieza cuando la humedad interna tenga que salir a una superficie seca: "La necesidad de mantener una humedad superficial hasta el término del proceso, es el problema fundamental del secado y en consecuencia del proyecto y de la regulación de un secadero".

La velocidad de evaporación superficial es función de algunas variables sobre las cuales es necesario actuar para mantenerla entre valores convencionales, no superiores a la velocidad de migración interna: Las principales de estas variables son la temperatura, la humedad y la velocidad del aire en contacto con las piezas.

En las figuras 6 y 7 se representa la variación de la velocidad de evaporación superficial (gramos/hora/cm² y gramos/minuto/°C respectivamente) en función de la humedad relativa ( $X_a \rightarrow X_d$ ) y de la velocidad de flujo del aire desecante (metros/minuto), respectivamente. De estos diagramas se puede deducir fácilmente que aumentando la hume-

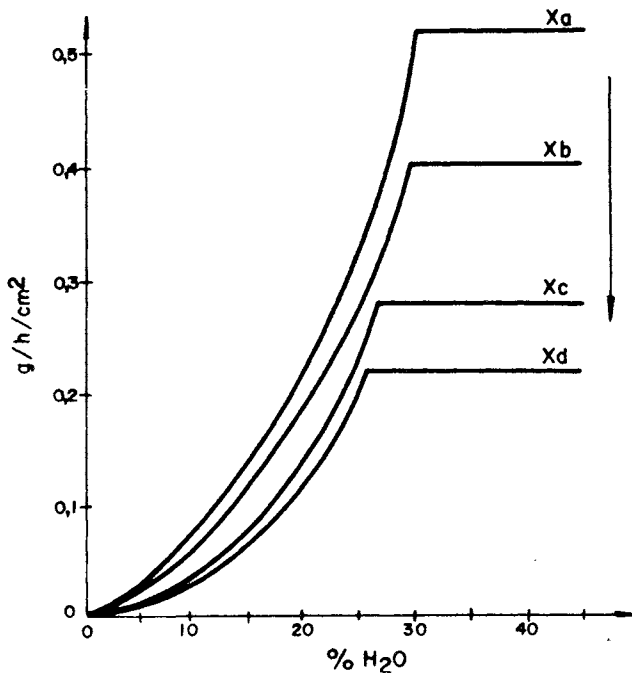


Figura 6.

dad relativa y disminuyendo la velocidad de flujo, del fluido desecante, se puede reducir la velocidad de evaporación superficial, incluso hasta crear una situación de equilibrio que la anule.

Análogamente (Fig. 7), un aumento de la temperatura provoca un aumento de la velocidad de evaporación superficial, y viceversa. Podemos considerar ahora como influyen estas variables sobre la "velocidad de migración interna". Este proceso transcurre principalmente por dos caminos: "Por flujo capilar" y "por difusión" bajo forma de líquido o de vapor. Ambos están determinados por la naturaleza del material y por sus condiciones de moldeo y no son influenciados sensiblemente por la humedad relativa ni por la velocidad del fluido desecante. La "difusión interna" depende además de la temperatura de la pieza: Es esencial por ello, que exista un gradiente térmico en el seno del material

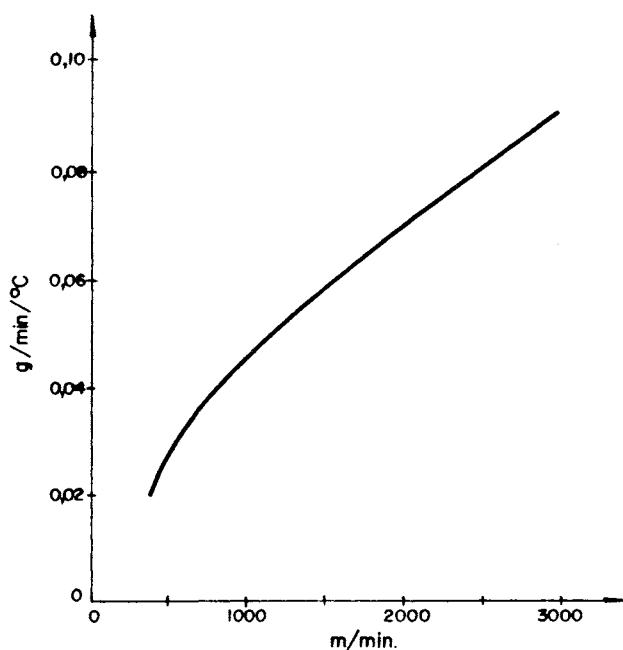


Figura 7.

que dé lugar a un gradiente de densidad o de tensión de vapor. Por lo tanto, es necesario que el calor penetre hasta el corazón de la pieza para que dé lugar a la migración de la humedad hacia la superficie a una velocidad industrialmente rentable.

Por estas breves consideraciones se comprende fácilmente cómo es posible, actuando sobre la humedad relativa y la velocidad del aire, reducir al mínimo la evaporación superficial, mientras se puede acelerar la velocidad de migración interna aumentando gradualmente la temperatura, manteniendo en todo momento los dos fenómenos en equilibrio. Esto explica por qué el secado industrial con aire hay que realizarlo "en un ambiente caliente húmedo", para evitar la rotura de las piezas que inevitablemente se produciría si el secado se realizase en un ambiente caliente seco, en el cual secaría la superficie antes que el corazón de las piezas.

El secado de los productos cerámicos va acompañado, como hemos visto, de contracciones en sus dimensiones, y estas contracciones son al principio directamente proporcionales a la cantidad de agua evaporada hasta un cierto punto y decrecen, más o menos bruscamente, una vez alcanzado un determinado valor del contenido de humedad, que corresponde al punto crítico, en el cual las partículas de la masa cerámica han alcanzado un contacto mutuo. En general se puede decir, que la máxima parte de la contracción ocurre en el primer período a régimen constante, y únicamente ciertas arcillas, de granulometría finísima o que contienen constituyentes coloidales, contraen sensiblemente en el segundo período.

En el secado industrial, considerando los grandes volúmenes interesados en este proceso y la inevitable falta de uniformidad en las características de temperatura y humedad de la corriente de aire, en distintos puntos del mismo grupo de piezas, y aún en puntos distintos de una misma pieza de grandes dimensiones, pueden estar verificándose al mismo tiempo los dos períodos del secado, con las consiguientes diferencias de contracción. Si la velocidad de evaporación superficial supera a la velocidad de difusión, la contracción diferencial entre la superficie y el interior podrá sobrepasar la fuerza de cohesión de la pasta provocando la rotura de la pieza.

Sobre las bases precedentes, se asienta el secado de los productos cerámicos y en consecuencia las técnicas de su secado, el proyecto y la regulación de los secaderos.

Las técnicas del secado de estos productos por evaporación, son numerosas, y algunas se han introducido en la práctica industrial en los últimos años. Vamos a considerar las más principales:

a) Secado por rayos infrarrojos: El empleo de los rayos infrarrojos presenta una ventaja fundamental, cual es su rapidez de secado. Esto es posible gracias al poder penetrante de estas radiaciones, que se transforman en calor en el interior del cuerpo, y siendo el agua especialmente opaca a ellas, dicha transformación de energía radiante en energía calorífica se cumple de modo especial en el agua misma. Y como en el primer período del secado ésta se encuentra principalmente en el interior del cuerpo cerámico, resulta que las piezas no demasiado gruesas, se calientan sobre todo en su parte más interna; en consecuencia, antes de que la evaporación en la superficie sea apreciable, se produce la difusión del agua desde la parte más central del cuerpo a la superficie. Secando con rayos infrarrojos, se verifica que desde el período preliminar de calentamiento de la pieza, la temperatura de la parte central del cuerpo cerámico es siempre más alta que la

periférica. Estas condiciones permiten efectuar el secado con cierta rapidez sin peligro de roturas. El secado se produce por efecto exclusivo de la energía radiante, la cual es absorbida (anilinas negras) en casi el 90% por el material radiado. La fuente de calor está constituida por algunas series de lámparas de infrarrojo de 150 a 500 W de potencia. Para tener buen rendimiento es necesario que la temperatura del aire ambiente sea superior a la temperatura de la superficie del producto, lo que únicamente se cumple en recintos cerrados.

b) Secado por alta frecuencia: Aunque el secado por infrarrojos ha sido llevado a un alto nivel de perfección, por tratarse de una técnica tradicional, no ofrece límites adecuados en cuanto a los tiempos de secado y rendimientos térmicos, en la producción de ciertos artículos cerámicos por ciclos de cochura rápida.

Por esto, desde hace algún tiempo, ha comenzado a emplearse para estos casos de producción por ciclos rápidos, la técnica de secado por micro ondas, que aporta un sensible ahorro de calorías por unidad de masa seca. Con esta aplicación las calorías se generan homogéneamente en el interior del material quedando fríos los soportes y los moldes en que esté contenido. La técnica del secado por alta frecuencia tiene carácter selectivo, homogéneo, con elevado rendimiento y rapidez de acción. Con esta técnica se puede llegar a una humedad residual del 0% y en cualquier caso por debajo del 1%. Esta técnica de secado es posible aplicarla únicamente en una o dos capas de producto, y excepcionalmente en 3 capas, pero nunca en vagonetas.

Un secadero de este tipo para tazas (Fig. 8), con una longitud de 3 metros y una anchura de 1,24, provisto de

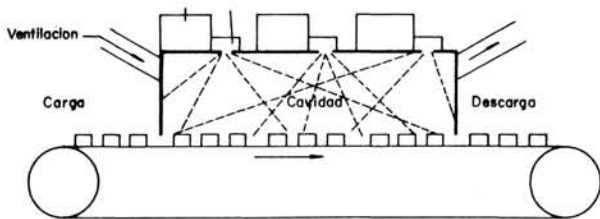


Figura 8.

3 generadores de alta frecuencia (magnetrones) dispuestos en diagonal, de 1 Kw cada uno, consume una potencia total de 5Kw/hora. Su funcionamiento es automático, con una producción de 600 tazas por hora. La evacuación del vapor se realiza mediante aire forzado.

c) Secado por atomización: Aunque no sea destinada al secado de piezas cerámicas antes de la cochura, parece necesario citar brevemente esta técnica de secado de pastas cerámicas que ha conseguido acelerar de un modo determinante los ciclos de producción.

El principio del secado por atomización está basado en realizar una elevada dispersión, una nebulización, de la barbotina (suspensión pasta/agua) de pasta cerámica, poco viscosa, en un ambiente caliente. Las pequeñas go-

tas de la suspensión obtenidas de modo que sean lanzadas con una distribución uniforme en una cámara cilíndrica, recorren en ésta un camino de una corriente de gas o de aire, calentada suficientemente como para ceder el calor necesario para la evaporación del agua, hasta llegar a la humedad residual deseada en el producto para poder aplicarle sin más la técnica de moldeo apropiada (extrusión, prensado, etc.).

Existen varios dispositivos para lograr la nebulización de la barbotina: Toberas con pulverización a alta presión, discos centrífugos a alta velocidad, toberas con pulverización de aire comprimido, etc. Para nebulizar barbotinas de pastas cerámicas tradicionales, es mejor emplear toberas con pulverización a presión de aire caliente en contracorriente porque se obtiene una distribución granulométrica amplia (partículas de 60 a 500  $\mu$ , con la mayor concentración en los tamaños de 300-400 $\mu$ ), que permite realizar el diagrama granulométrico más conveniente, regulable en función del tipo de pasta y del sistema de moldeo a seguir posteriormente.

La acción de un secadero por atomización comprende tres fases fundamentales: 1) Atomización, 2) mezcla niebla-gas, 3) secado de las gotas de barbotina.

La transferencia de calor está asegurada por el contacto directo del gas caliente con las partículas de barbotina dispersas en el cilindro del atomizador. El calor del aire caliente en la fase de cambio es casi totalmente absorbido por la rápida evaporación del agua y el polvo atomizado queda relativamente frío. Los gases de combustión mezclados con el vapor proveniente de la suspensión cerámica, se expulsan al exterior por medio de un ventilador, manteniéndose constantemente un equilibrio térmico entre el gas de combustión y el vapor.

El atomizador (figura 9) está constituido esencialmente por una cámara cilíndrica de secado (c), una fuente de gas caliente (a), un medio para atomizar la barbotina y un dispositivo para separar el producto seco del gas caliente (válvula de descarga).

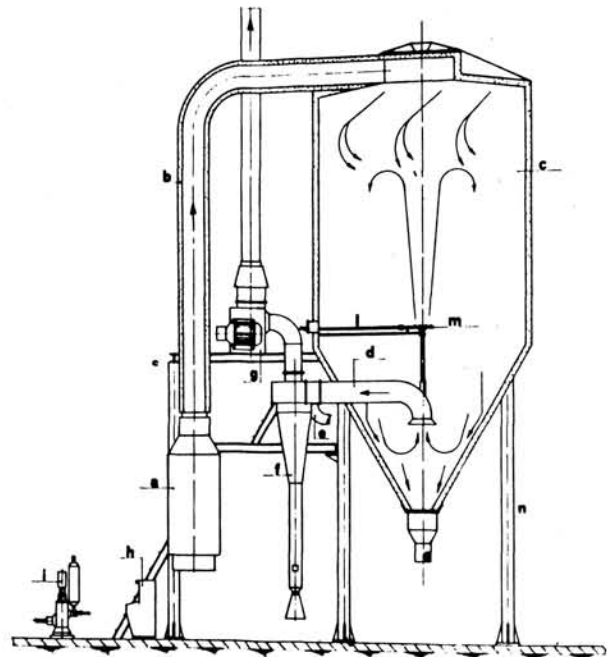


Figura 9.

d) Secado por aire caliente: Esta técnica es la que se aplica generalmente en la industria cerámica para secar las piezas recién moldeadas, por sus ventajas económicas, tanto en el coste de instalación como en su rendimiento y menores dificultades de realización, comparativamente con las de secado por infrarrojos y por alta frecuencia, que solamente se emplean en algunas producciones determinadas de poco espesor, p.e. en porcelanas de mesa.

Los secaderos corrientemente utilizados hasta hoy son principalmente secaderos túnel. Se trata de secaderos en contracorriente en los cuales el aire secante circula en contracorriente con el material a secar. La mayor parte del aire caliente y seco se introduce al secadero en las proximidades de la puerta de salida del material seco, bien por tiro natural o forzado a la entrada del mismo secadero. A lo largo del secadero y en puntos convenientes (punto crítico), se puede meter más cantidad de aire caliente para regular su marcha.

El fluido secante del que se puede disponer económicamente y por tanto industrialmente hablando, es el aire caliente recuperado del enfriamiento indirecto del horno túnel en que se cocerá el material a secar. Durante el proceso de secado, el aire caliente y seco se enfría en su recorrido, cediendo calor al material y aumenta su humedad relativa absorbiendo la que se desprende del material que está secando. De este modo, el material húmedo al entrar en el secadero se encuentra en contacto con aire a la menor temperatura y al mayor grado higrométrico y, consecuentemente, a la menor velocidad, y la velocidad de evaporación superficial se reduce al mínimo, según requiere el proceso de secado descrito antes.

Avanzando en el secadero el material tiende a calentarse y al contacto con aire siempre más caliente, a mayor velocidad y con menor humedad relativa, la velocidad de evaporación superficial crece al mismo tiempo que la velocidad de difusión interna, de modo que se evita el peligroso secado superficial.

En la última fase del secado, el material, ya caliente al contacto con el aire a la máxima temperatura y al mínimo grado higrométrico, puede llevar su humedad a valores bastante bajos, inferiores normalmente al 0,5 - 1% y alcanzar una temperatura elevada, condición necesaria para un alto rendimiento cualitativo y cuantitativo de la cocción en horno túnel, que sigue al proceso de secado.

La determinación de la cantidad de aire necesario para el secado y de su temperatura, para corregir la dispersión térmica, lo que es esencial para proyectar y regular el secado, se establece mediante dos simples balances:

Un balance higrométrico y un balance térmico.

Aquí no vamos a considerar estos cálculos con detalle. No obstante diremos que, en base a las características del material a secar, se deben prefijar las condiciones del aire en el momento en que éste abandona el secadero y tales condiciones se escogen normalmente de modo que en el momento de la introducción del material, éste no sufra ninguna evaporación: Escogida una temperatura un poco superior a la temperatura ambiente (30°C) se deduce, por ejemplo, que el material a tratar está en equilibrio con una humedad relativa del 80%.

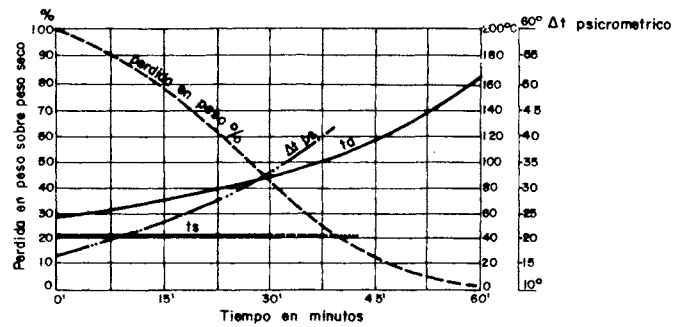


Figura 10.

Del diagrama higrométrico de Mollier (Fig.11) se deduce que en tales condiciones el contenido de humedad en el aire es próximo a 0'025 Kg por Kg de aire seco.

Admitiendo que el aire ambiente tenga una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 75%, se obtiene para él un contenido de agua próximo a 0'0114 Kg. de agua por Kg. de aire seco, y siendo tal aire el que precalentado se utiliza para el secado, la cantidad de agua que un Kg del mismo puede aportar es próximo a 0'0136 Kg.

Un balance higrométrico determina inmediatamente la cantidad de aire necesaria para transportar la humedad contenida en el material.

El sucesivo balance térmico obtenido **igualando** las calorías necesarias para calentar el material a secar y el material de carga, desde la temperatura de entrada a la de salida del secadero, sumadas a las calorías necesarias para evaporar el agua, a las cedidas por el aire secante y por el agua en él contenida en el salto térmico que sufren en el paso del secadero, queda como única incógnita la temperatura del aire caliente utilizado poniéndose prácticamente igual a ella la temperatura del material en la salida.

Se puede fácilmente deducir que a igualdad de calorías necesarias para obtener un secado completo, cuanto mayor sea la humedad relativa a la entrada del secadero, tanto mayor es la cantidad de agua contenida en un metro cúbico del aire que sale del secadero y, como consecuencia del balance higrométrico, tanto menores son los volúmenes de aire necesarios.

Habiendo tomado como base la igualdad de calorías necesarias (en la práctica para la cantidad de material a secar) del balance térmico resulta la necesidad de un mayor salto térmico para el fluido secante y en consecuencia una mayor temperatura del aire a su ingreso en el secadero.

La conclusión práctica es que el secadero de un material difícil de secar, debe hacerse con bajos volúmenes de aire a alta temperatura; viceversa, un material de no difícil secado puede soportar fuertes volúmenes de aire a baja temperatura.

Con bajo volumen de aire a alta temperatura la pérdida de humedad del material es más lenta y empieza cuando ya la velocidad de migración interna ha tomado un cierto valor continuando por toda la longitud del secadero, mientras que en condiciones de fuertes volúmenes de aire a baja temperatura la velocidad de secado es muy alta ya inicialmente

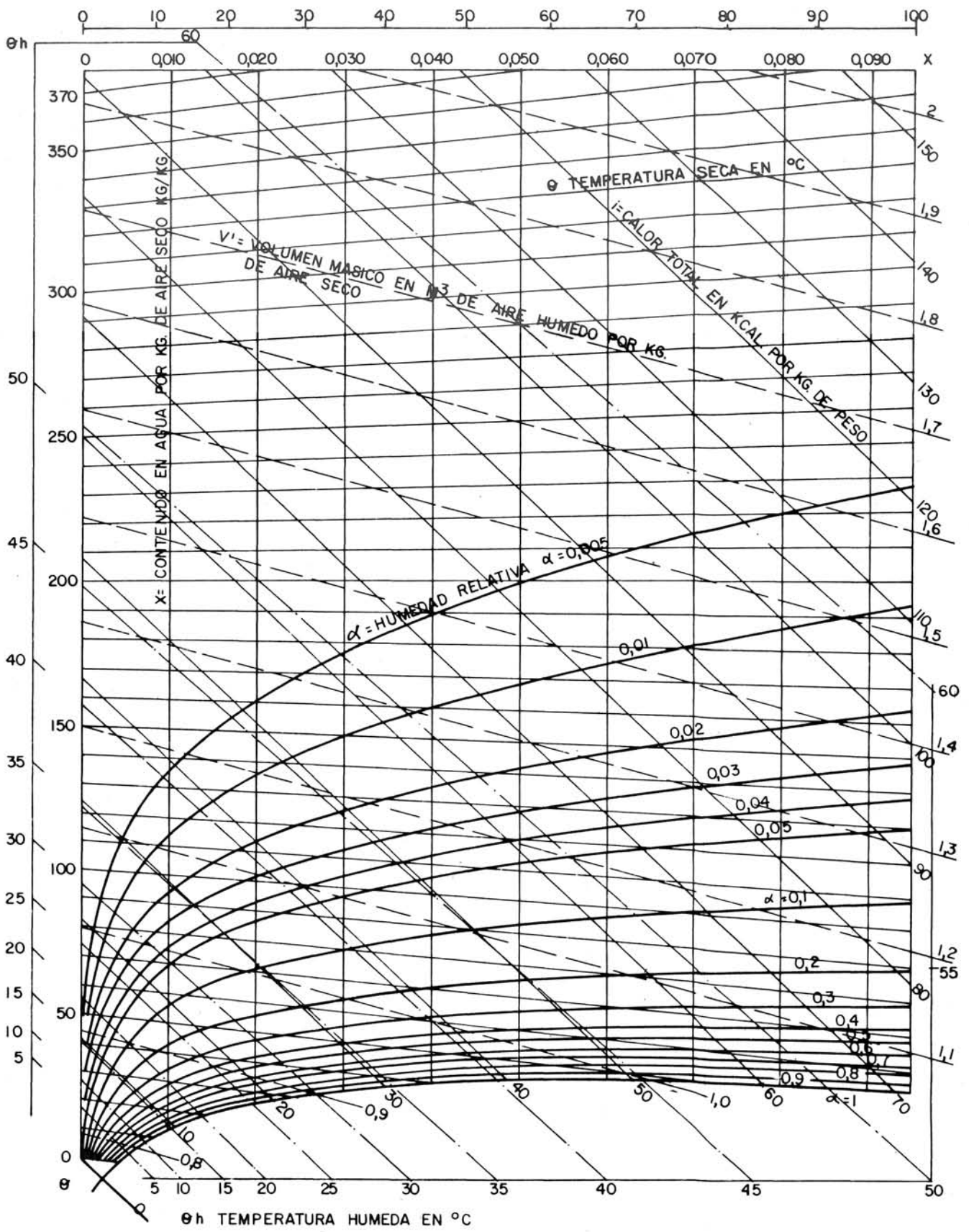


Figura 11.

y el secado termina cuando aún el material no ha alcanzado la última posición del secadero. En la práctica esta última condición del funcionamiento provoca notables porcentajes de roturas en el producto. Sin embargo, algunas veces es mejor operar con grandes volúmenes a baja temperatura, esto depende del producto a secar.

Para evitar estratificaciones de aire dentro del secadero, se prevén **reciclados del aire**, bien de abajo a arriba o al revés según la construcción. Si los reciclados son en una misma sección si varían volúmenes, temperatura y condiciones higrométricas del aire, el único efecto además de la homogeneización de la atmósfera, es un aumento de la turbulencia y en consecuencia de la velocidad de evaporación superficial. Si el reciclado se hace de unas secciones a otras, varían sensiblemente las condiciones de funcionamiento del secadero. Se puede decir que los reciclados pueden utilizarse para aumentar o reducir la velocidad de secado en las distintas zonas del secadero. Todo esto se aplicó en los últimos años en el campo del secado de **materiales de revestimiento y de pavimentación** con resultado indudablemente satisfactorios, tanto en cuanto a las características del producto como al porcentaje de rechazos obtenido en aquellas condiciones industriales del proceso.

Las relaciones analíticas que ligán las distintas magnitudes en juego con la velocidad de evaporación  $V_e$ , dada en Kg de agua/Kg de aire seco, para piezas cerámicas en verde con dos dimensiones muy superiores a la tercera (que es el caso más corriente), son las siguientes:

$$V_{e1} = \frac{A_{c+i}(t_a - t_s)}{K_1 \cdot e} = \frac{A_c(h_s - h_n)}{K_2 \cdot e} = \text{constante (1)}$$

$$V_{e2} = \frac{A_{c+i}(t_a - t_p) - C_p(t_p - t_s)}{K_1 \cdot e} = \frac{K_3 D (H - H_{eq})}{e^2} \quad (2)$$

en las cuales:

$V_{e1}$  = velocidad de evaporación en Kg agua/Kg aire seco, durante el primer período.

$V_{e2}$  = ídem. durante el segundo período.

$A_{c+i}$  = coeficiente de transmisión del calor  $\left\{ \begin{array}{l} c = \text{convección} \\ i = \text{irradiación} \end{array} \right.$

$e$  = espesor de la pieza.

$h_n$  = contenido de vapor de agua en el aire normal.

$h_s$  = contenido de vapor de agua en el aire saturado.

$t_a$  = temperatura del aire normal (termómetro seco).

$t_s$  = temperatura del aire saturado (termómetro húmedo).

$t_p$  = temperatura de la superficie de la pieza cuando  $t_p \neq t_s$ .

$H$  = contenido de humedad genérico en el material.

$H_{eq}$  = contenido de humedad de equilibrio con el ambiente, en el material (humedad residual).

$C_p$  = calor específico del material seco.

$D$  = coeficiente de difusividad del agua en la pasta.

$K_1, K_2$  y  $K_3$  = constantes.

La relación (1) regula la evaporación en el primer período; la (2) en el segundo período. Los segundo miembros de estas expresiones, nos dicen lo siguiente:

— En el primer período la velocidad de evaporación es constante y no depende de la pasta cerámica ni de su humedad. En un determinado ambiente es inversamente proporcional al espesor. Es función únicamente de las condiciones ambientales, es decir, de la temperatura, velocidad y estado higrométrico del aire.

— En el segundo período la velocidad de evaporación es decreciente y depende de la calidad de la arcilla y de la humedad residual, siendo inversamente proporcional al cuadrado del espesor. En la práctica esta expresión no es exacta pero sirve también para demostrar la dependencia entre la velocidad de evaporación y el espesor de la pieza que es mucho más grande que en el primer período. En este caso la potencia de  $e$  puede variar entre 1 y 2 pero siempre es más próxima a dos. Por lo tanto, en este segundo período la velocidad de migración del agua del corazón a la superficie de la pieza es inferior a la velocidad de evaporación superficial. Por ello, la velocidad de secado, decrece proporcionalmente a la reducción de la velocidad de migración interna, que a su vez es función de la humedad misma de la pieza, entre otros factores.

En cuanto a los primeros miembros de las relaciones (1) y (2), nos indican la importancia de los siguientes elementos, para los dos períodos:

— La diferencia de temperatura entre el aire y la superficie de la pieza.

— El coeficiente de transmisión por convección,  $A_c$ . La contribución por irradiación debida a los eventuales elementos internos del secadero, que se calientan por encima de la temperatura de saturación del aire (y de la temperatura de las piezas) y que por lo tanto, a su vuelta, transmiten a éste último. El aporte de la irradiación para que sea válida la relación (1) no debe superar del 15 al 25% del valor de  $A_c$ , cosa que en los casos prácticos se verifica siempre plenamente.

Es oportuno recordar que el coeficiente de transmisión por convección ( $A_c$ ) depende de la velocidad de aire, por lo que a mayor velocidad de la corriente gaseosa le corresponde mayor velocidad de evaporación. De todo lo expuesto, podemos ya deducir los puntos prácticos siguientes, de notable interés para la técnica del secado:

1) La fase más delicada corresponde al intervalo en que ocurre la contracción del material, que prácticamente coincide con el primer período, y que a groso modo termina cuando se ha eliminado la mitad del agua de amasado. Si se considera la inevitable falta de uniformidad y la necesidad de controlar la evaporación en las piezas que no han alcanzado aún el punto crítico, se puede afirmar que en la práctica industrial el primer período termina generalmente después de eliminar entre el 60 y el 65% del agua total. Para hacernos una idea más concreta, diremos que en una arcilla medianamente plástica y de granulometría fina, refiriéndonos a materia seca, el agua de amasado está entre 22 y 28%, el punto crítico se presenta entre 8 y 13% de agua residual y después de secar a 120°C queda un residuo de agua en equilibrio con el ambiente comprendido entre 2 y 2,5%.

2) En el segundo período, una vez terminada la contracción, es posible realizar un secado más rápido con poca posibilidad de que se presenten grietas o roturas. Este hecho



está confirmado por la práctica, salvo en casos muy particulares. Esto ayuda notablemente a reducir el tiempo total de secado, que en otro caso sería mucho más largo debido al ritmo decreciente de la evaporación. En este período el material se calienta siempre más sensiblemente, porque el mayor calor cedido al producto por el aire mucho más caliente, normalmente usado, sirve en parte para la evaporación y en parte para su calentamiento (ver en la fórmula (2),  $C_p(t_p - t_s)$ ).

3) De lo expuesto en los puntos anteriores y considerando que para un determinado producto (de espesor constante) y para una velocidad constante de la corriente del aire de secado, la evaporación depende sólo de la diferencia,  $t_a - t_s$ , que es la diferencia psicrométrica ( $\Delta t$ ) del aire, se deduce que se puede sin más llevar la regulación del secado con el único empleo del instrumento psicrométrico.

4) En el campo del secado rápido toma importancia preponderante el espesor de las piezas a secar. En la práctica industrial, se efectúan ciclos de 40 a 50 minutos con piezas de espesor entre 5 a 6 mm., dejando en este espesor un sensible gradiente de humedad. A groso modo, se puede considerar que el primero período dura el 60% del tiempo total, o sea, de 24 a 30 minutos, y el segundo período de 16 a 20 minutos.

A igualdad de pasta cerámica, de forma de pieza y de condiciones de secado, piezas macizas de 30 y 60 mm. de espesor, se pueden secar respectivamente en menos de:

$T_1$  (e = 30 mm) = 2,5 horas (1<sup>er</sup> período) + 9,5 horas (2<sup>o</sup> período) = 12 horas.

$T_2$  (e = 60 mm) 5,0 horas (1<sup>er</sup> período) + 36 horas (2<sup>o</sup> período) = 41 horas.

En la figura 10 podemos ver las curvas de las temperaturas psicrométricas ( $t_a$  = termómetro seco y  $t_s$  = termómetro húmedo) y la curva de pérdida de peso del material en % del peso seco, en un tiempo de 1 hora para piezas de 5 mm. de espesor. De la curva de pérdida de peso en función del tiempo se deduce fácilmente la velocidad de evaporación.

Ya se ha puesto de manifiesto la importancia de la velocidad del aire como factor principal de influencia sobre el coeficiente de transmisión. Pero la uniformidad de su distribución constituye un aspecto aún más interesante. Durante su recorrido por el interior de los espacios vacíos, el aire se reparte en función de la mayor o menor resistencia que encuentra, por esto es de la mayor importancia que el material a secar sea distribuido uniformemente, dejando canales libres de forma que las corrientes de aire impulsadas por los ventiladores del secadero puedan distribuirse con la máxima homogeneidad posible para conseguir un buen contacto con todas las superficies de las piezas a secar. Desde luego, siempre habrá falta de uniformidad total, por muchas precauciones que se tomen, pero en la práctica esto no constituye un gran inconveniente dado el largo recorrido del aire a través de las piezas.

Un hecho importante que hay que tener en cuenta es la pérdida de carga que sufre el aire al pasar por los canales. Esta pérdida de carga, que disminuye la velocidad del aire, se debe a dos causas principales: Una a la resistencia de los diversos canales transversales al sentido de ventilación que deben quedar entre la piezas, para que el aire se ponga en contacto con todas ellas distribuyéndose de una manera uniforme, la cual depende de la forma geométrica de las

secciones. La otra, llamada "pérdida de carga accidental" se origina cuando la corriente de aire emboca o desemboca en los canales que deja la carga para mezclarse con el aire del mismo ambiente, y está causada por los cambios de sección, dependiendo de las diversas secciones que recorre luego el curso de la corriente, por lo tanto está directamente influenciada por la densidad de carga de la sección transversal del secadero. La suma de estos dos pérdidas nos da la "pérdida de carga total" del aire a su paso a través del material, frenando la velocidad del mismo.

Ahora bien, como sabemos, la velocidad de evaporación del agua,  $V_e$ , es función directa del coeficiente de transmisión según la relación:

$$A_c = 4 \frac{V_o^{0,75}}{D_{eq}^{0,25}}$$

Donde:

$A_c$  = Coeficiente de transmisión del calor por convección.

$V_o$  = Velocidad que tendría el aire en condiciones normales de presión y temperatura (760 mm Hg y 0°C).

$D_{eq}$  = Diámetro equivalente del canal en mm.

(Para agujeros no circulares  $D_{eq} = 4 s/p$  (s = sección) (p = perímetro)

y por lo tanto está estrechamente ligado, según ya dijimos, a la velocidad del aire y a la forma geométrica de las secciones ( $D_{eq}$  = diámetro equivalente). Es por lo tanto importante que la pérdida total de carga no sea elevada. Por otro lado, una pérdida de carga elevada, introduce en el secadero fuertes depresiones que exigen la entrada de grandes cantidades de aire parásito. Para darnos una idea de esto, basta pensar que una depresión de 90 mm. obliga a hacer pasar de 150 a 300 m<sup>3</sup>/h por cada m<sup>2</sup> de superficie externa de construcción normal.

Hasta aquí, se ha examinado la influencia de la temperatura, de la humedad del aire y de su velocidad de paso en el secadero, sobre la velocidad de evaporación. Todos estos factores están estrechamente ligados entre sí, a la cantidad de calor que se necesita para la evaporación y a la que inevitablemente se dispersa. A igualdad de calor, si aumenta la cantidad de aire de alimentación del secadero disminuye su temperatura y viceversa.

La descarga de ingentes cantidades de aire del secadero a temperatura más elevada que la del ambiente externo, con humedad relativa distinta de la de saturación, comporta una pérdida de calor necesaria pero no estrictamente útil para la evaporación. El estudio de las relaciones entre estos elementos se realiza y se sigue fácilmente, como vimos antes, sobre el diagrama de Mollier (fig. 11) para el aire húmedo. Este diagrama incluye todos los estados posibles de la mezcla aire-vapor a diversas temperaturas, humedades relativas, humedades absolutas y contenidos de calor.

El consumo térmico de un secadero merece una consideración particular, pues debe ser, racionalmente, el menor posible. El mismo procedimiento que se sigue para el cálculo térmico que aquí no podemos aplicar, se emplea con algunas otras consideraciones para valorar el posible rendimiento térmico: Teóricamente para evaporar un Kg de agua son necesarias (en un medio a la temperatura normal) cerca de 600 Kilocalorías. En las mismas condiciones ambienta-

les, en un secadero, el consumo de calor resulta notablemente superior, del orden de las 850 Kilocalorías/Kg de agua evaporada. La relación entre el consumo teórico y el consumo efectivo nos da el valor del rendimiento.

El rendimiento térmico del proceso de secado puede quedar definido por las siguientes magnitudes:

- Rendimiento térmico teórico del proceso de secado: Para cualquier tipo de secadero las mejores condiciones que se pueden obtener teóricamente son:
  - Descarga del aire al estado de máxima saturación.
  - Ningún cambio de aire fuera de la mezcla aire-vapor.
- Pérdida por incompleta saturación del aire de secado: La diferencia psicrométrica  $\Delta t = t_a - t_s$ , es la que nos dice las condiciones de humedad de la mezcla aire-agua. La media de sus valores para secaderos bien construidos debe estar comprendida entre 2,5 y 10°C. Cuanto más alto sea su valor medio a la salida, mayor es el coeficiente de corrección del consumo teórico y menor es el rendimiento del secadero.
- Pérdida debida al calentamiento del ambiente del secadero. Para un secadero estático, de ladrillos entre 1 y 10 Kcal/Kg de agua.

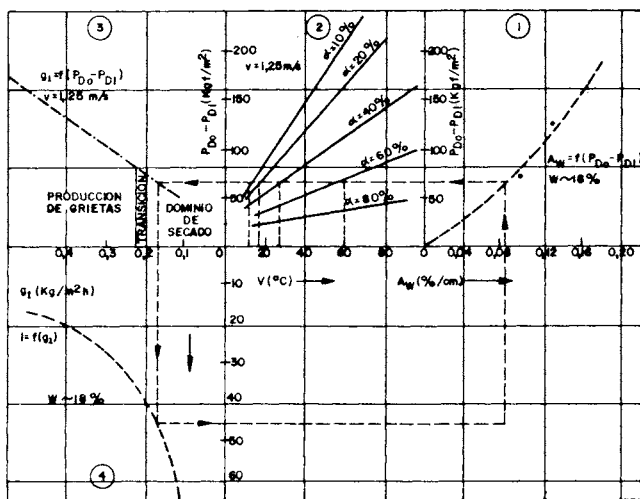


Figura 12.

- Pérdidas debidas al calentamiento del material a secar y de los accesorios: de 30 a 70 Kcal/Kg de agua.
- Pérdida debida a la fuga de aire caliente y a la entrada de aire frío: de 15 a 30 Kcal/Kg de agua.
- Pérdida por transmisión de calor al exterior a través de las paredes: de 50 a 100 Kcal/Kg de agua.
- Pérdida por evaporación de agua eventualmente contenida en el material accesorio: de 60 a 70 Kcal/Kg de agua.
- Rendimiento térmico de la fuente de calor y de las tuberías de conducción del aire caliente: de 220 a 230 Kcal/Kg de agua.

Las pérdidas de los apartados c a la h, pueden estimarse como mucho, en un secadero bien calculado, en unas 500 Kcal/Kg de agua evaporada.

La figura 12 reproduce un diagrama de trabajo mostrando para la primera etapa del secado (hasta llegar al punto crítico), las relaciones entre las magnitudes más importantes. Examinemos, por ejemplo, el secado de tochos, para producir cerámica fina (longitud 600 mm., diámetro 240 mm., contenido en humedad de la pasta  $W \approx 18\%$ ).

La gráfica 1 de la figura muestra el gradiente de humedad en el interior de los tochos, en vía de secado, en función del gradiente de la presión de vapor entre la superficie de los productos ( $P_{D0}$ ) y el aire de secado ( $P_{D1}$ ), para una velocidad constante del aire.

La gráfica 2 indica la humedad relativa del aire, en función de la temperatura del aire y del gradiente de presión de vapor.

La gráfica 3 reproduce la curva de velocidad de secado; en ella se encuentra también el dominio de transición que conduce a la formación de grietas.

Por último, la gráfica 4 representa la curva de duración del secado en función de la velocidad de secado.

Cuando se dispone de un diagrama de trabajo como éste para una pasta dada, se pueden determinar las condiciones de su secado. En lo que concierne a los tochos considerados, la figura 12 permite constatar que con un gradiente de humedad de la pasta  $\Delta W = 0,085\%$  no habrá aún formación de grietas durante la primera etapa del secado. La relación entre las gráficas 1 y 3 pone en evidencia que este gradiente de humedad puede ser obtenido con aire de secado a 60°C, conteniendo un 60% de humedad relativa, o aún con aire a 17°C conteniendo un 20% de humedad relativa (admitiendo una velocidad constante de aire de  $V = 1,25$  m/s). En estas condiciones se llega a una velocidad de secado de  $g_1 = 0,18$  Kg/m<sup>2</sup> h y a una duración de secado de 45 horas.

## DEFECTOS DE SECADO

El secado de productos cerámicos, puede dar lugar a algunos defectos, más o menos pronunciados, que siempre se pondrán luego plenamente de manifiesto durante la cocción. Vamos a considerar los principales y su forma de evitarlos:

- Deformaciones, grietas y rotura de piezas, incluso con explosión originadas por presiones de vapor que se presentan cuando no se llevan correctamente los controles de la curva térmica y de la humedad del ambiente. La primera debe tener una subida lenta y regular hasta llegar al punto crítico. La segunda debe llevarse rápidamente a un máximo y disminuir gradualmente hasta el secado total, como podemos ver, por ejemplo, en las curvas de la figura 13.

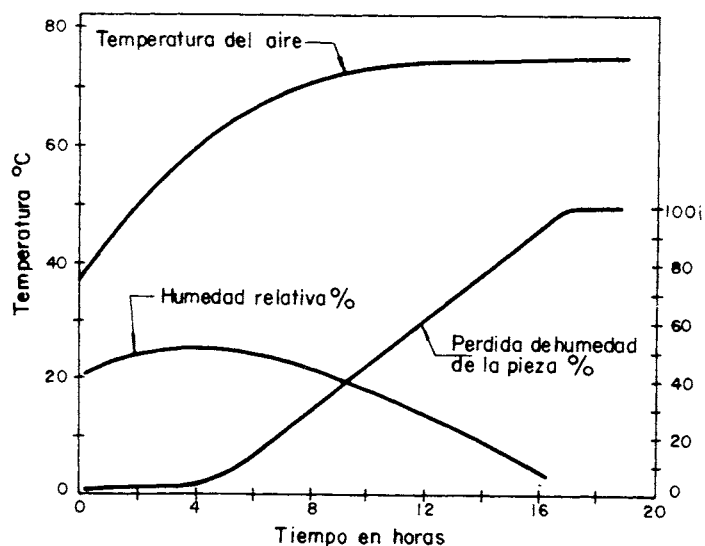


Figura 13.

## CLASIFICACION GENERAL DE LOS SECADEROS

Secado de barbotinas {  
 ( Por filtro prensa  
 ( Por atomización.

### Secado de piezas:

- a) Secaderos de infrarrojos — color pastas, anilinas oscuras.
- b) Secaderos electromagnéticos de alta frecuencia (30<sup>o</sup>/o menos tiempo).
- c) Secaderos de aire caliente:
  - 1) De cámaras o periódicos. ) Calor directo del canal de cocción (azufre, vanadio).
  - ( De corriente paralela )
  - 2) Contínuos ( )
  - ( De contracorriente ) Calor indirecto con cambiadores de calor.
  - ) Calor de refrigeración del horno.

Ventajas de los secaderos contínuos {  
 ( Mejor rendimiento térmico  
 ( Menos mano de obra  
 ( Mayor uniformidad de secado  
 ( Mayor rendimiento económico  
 ( Mejor control de temperatura y humedad  
 ( Mejor coordinación con los procesos contínuos

b) Debe tenerse muy en cuenta la forma de la pieza a secar, pues siendo el secado un fenómeno de superficie, cuanto más grande es la relación superficie/volumen, tanto más rápido es el secado. Por tanto, cuando se trata de piezas de espesor no uniforme, secan más rápidamente las partes delgadas y las aristas, creándose contracciones diferenciales que dan lugar a tensiones que producen grietas y roturas. Esto se evita retrasando el secado de las partes delgadas, bien protegiéndolas contra la evaporación o por humectación adecuada.

c) Independientemente del hecho térmico, es necesario tener en cuenta otros fenómenos que pueden originar defectos durante el secado, como son los siguientes:

- 1) Tensiones originadas por torsión durante el moldeado
- 2) Efecto de la presión (piezas grandes o apiladas).
- 3) Acción del soporte.

Está comprobado que las presiones ejercidas sobre los productos cerámicos hacen aumentar la velocidad de secado y además determinan variaciones en la marcha de la contracción de secado. Esto puede dar lugar a tensiones que son origen de fisuras y deformaciones.

El soporte tiene una acción retardadora sobre la velocidad de secado y sobre la contracción de la base de apoyo, con las consiguientes grietas y deformaciones en la misma. Para piezas grandes es necesario, pues, reducir al mínimo la superficie de contacto con el soporte y la resistencia al des-

plazamiento ofrecida por dicha superficie. Esto se consigue poniendo debajo arena de cuarzo o papel no satinado (papel de estraza, de filtro, etc.), que facilitan la salida del agua y el deslizamiento de contracción de las piezas.

### BIBLIOGRAFIA

- A. Bigot, "Retrait au sechage des kaolines et argiles". Comptes rendus de l'Academie des Sciences, 1921.
- P. Munier y G. Hirne, Bull.Soc. Franc. Ceram., 25 (1954), 3.
- M. Guerga, Ceramurgia, 1 (1971), 151.
- J.H. Perry, "Chemical Engineers Handbook". McGraw-Hill, 1950.
- Ceramic Data Book, Cahners Publishing Co., Chicago, 1971.
- A.F. Greaves-Walker, "Drying Ceramic Products". Industrial Publications, Inc. Chicago, 1948.
- A. Dascalescu, "Le séchage et ses applications industrielles". Dunod, 1969.
- F. e S. Singer, "Industrial Ceramics". Chapman and Hall Ltd. London, 1963.
- A.J. Dale, "Modern Ceramic Practice". Maclaren and Sons Ltd. London, 1964.
- M. Poppi, Ceramurgia, 1 (1972), 56.
- E. Krause, "Le séchage en céramique. Principes et techniques". L'Ind. Céram.— Septima, Paris, 1977.
- M. Haillier, L'Ind. Céram. N<sup>o</sup> 684 (1975), 327.
- J. Rigaud, L'Ind. Céram. N<sup>o</sup> 684 (1975), 321.
- J. Coudamy, L'Ind. Céram. N<sup>o</sup> 662 (1973), 343.
- M. Murray et col, L'Ind. Céram. N<sup>o</sup> 681 (1975), 93.
- M. Roget, L'Ind. Céram. N<sup>o</sup> 691 (1976), 17.

# EL COLOR Y LA REACTIVIDAD DE LOS SÓLIDOS EN CERÁMICA Y VIDRIO.

Dos interesantes monografías en las que se recogen todas las comunicaciones y conferencias presentadas en las 1.<sup>as</sup> y 2.<sup>as</sup> "Jornadas Científicas sobre Cerámica y Vidrio".

Dos trabajos — uno sobre el color y otro sobre la reactividad de los sólidos en cerámica y vidrio — que son fruto de la estrecha colaboración mantenida entre los especialistas de la Sección de Ciencia Básica de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio y los investigadores científicos de las Universidades de Sevilla y Valencia y del C. S. I. C., y que pretenden ser un nexo de unión con los técnicos de la industria que comparten inquietudes comunes.

PRECIO  
DEL EJEMPLAR  
600 PTAS.



Solicite su ejemplar a la  
**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO**  
Carretera de Valencia, Km. 24,300  
ARGANDA DEL REY (Madrid) — Telf.: 871 18 00