

Ensayos de materiales en atmósferas simuladas

III. Evaluación de un sistema de simulación

J. VALE y A. MARTIN - Departamento de Química de la E. S. de Ingenieros Industriales de Sevilla

RESUMEN

El paso final de la creación de todo sistema de simulación de atmósferas contaminadas es la evaluación de su respuesta cuando se intentan producir con él unas determinadas condiciones. En este artículo se recogen los diversos aspectos a tener en cuenta en dicha evaluación: eficacia del secado y depuración del aire, rendimiento en la generación de los diversos contaminantes, autonomía de las secciones, reproducción, estabilidad, homogeneidad y evolución de las condiciones simuladas, etc.

Se aborda un estudio más profundo sobre la técnica de generación de uno de los contaminantes introducidos, el FH, que plantea unos problemas específicos. También se dedica especial atención a los resultados obtenidos en una serie de experiencias de aplicación, que constituyen la prueba definitiva para un sistema de simulación. Se efectúan, por último, una serie de consideraciones sobre estos sistemas y sobre las experiencias de alteración.

SUMMARY

The final step in the creation of a system of simulation of the drying and purification of the air, yield answer when we attempt to produce determined conditions with it. In this article are gathered the different aspects to be borne in mind in such an evaluation: efficiency of the drying and purification of the air, yield in the generation of the different pollutants, autonomy of the sections, reproduction, stability, homogeneousness and evolution of the simulated conditions, etc.

It comprises a deeper study on the technique of generation of one of the pollutants introduced, the FH, which presents some specific problems. Special attention is also devoted to the results obtained in a series of experiments of application, which constitute the definitive proof for a system of simulation. Finally, there are carried out a series of considerations on these systems and on the alteration experiments.

1. INTRODUCCION

En publicaciones anteriores los autores revisan los criterios que deben guiar el diseño de un sistema de simulación (1) y desarrollan uno concreto (2) cuya evaluación se considera aquí. El desarrollo de una instalación de simulación ambiental requiere en todo caso una serie de estudios previos, con el fin de evaluar el comportamiento de las distintas secciones que lo van a integrar, hasta alcanzar la configuración definitiva. Características tales como rendimiento en la generación de contaminantes, autonomía, estabilidad, reproducibilidad, etc., deben ser consideradas para ir mejorando la respuesta del sistema hasta alcanzar la solución más satisfactoria. Llegados a este punto, la instalación estará dispuesta para comenzar su período de funcionamiento normal con las experiencias que se vayan programando. En el sistema de simulación propuesto (2), antes de acometer las experiencias de aplicación, ha sido preciso realizar numerosas pruebas e ir introduciendo modificaciones hasta llegar a la configuración descrita. No procede hacer una relación de todos los cambios y pruebas, pero sí puede resultar de interés la descripción de los métodos utilizados para evaluar la respuesta del sistema definitivo, ya que, por su carácter general, forman parte de un proceso con el que debe concluir el desarrollo de toda nueva instalación de simulación de atmósferas.

La evaluación de la instalación se va a hacer, en la mayoría de los casos, considerando por separado cada una de las secciones en las que se divide la misma. Es preciso recordar que todos los resultados se refieren, a menos que se indique lo contrario, a la configuración definitiva del sistema, ya que algunos se obtienen con el funcionamiento conjunto de varias secciones. Así, el

rendimiento de la dosificación de los contaminantes está referido a las concentraciones medidas en el interior del recinto de exposición, que son las que realmente interesan, e incluyen tanto el rendimiento de la generación, en su caso, como el rendimiento de la cámara.

2. ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE

Como se ha indicado, el aire se introduce en el sistema por medio de un compresor que mantiene en el tanque-pulmón de alimentación una presión variable entre 3,5 y 5 bars absolutos. Aunque se ha dispuesto un reductor a la entrada de la instalación con la misión de mantener una presión constante en cabeza, en realidad las oscilaciones del tanque-pulmón afectan en alguna medida al sistema, si bien no llegan a suponer una variación del caudal del $\pm 2\%$ en torno al valor medio.

La propia compresión del aire supone un eficaz secado, pero se alcanza un grado de humedad que es muy variable en función de la temperatura ambiente. La figura 1 representa la humedad específica del aire después de la compresión en función de la temperatura, suponiendo que se alcanzan 3,5 bars absolutos. Una variación de la temperatura ambiente de 10 a 35°C supone que la humedad específica pasará de 2 a 10 g de agua/kg de aire seco, o del 4 al 20% de humedad relativa cuando ese aire se lleve a 40°C, que es la temperatura programada en las experiencias de alteración. Con el fin de aumentar la versatilidad del sistema y la constancia de las condiciones a la entrada del mismo, se ha instalado la sección de secado con ácido sulfúrico. Hasta concentraciones del ácido del orden del 80% las presiones del vapor de agua en equilibrio con la solución se mantienen inferiores a 0,2 mm de Hg y, posteriormente, van aumentando de forma cada vez más acentuada, al irse diluyendo el ácido, como consecuencia del agua que retiene del aire que borbotea a su través. Dependiendo de la aplicación, la carga del ácido se repondrá cuando la dilución haya alcanzado un determinado valor. El cambio de color del gel de sílice, utilizado como alarma para indicar la dilución del ácido, se produce cuando la concentración de éste es del orden del 65%, lo que supone que, teóricamente, el aire no saldrá nunca de la sección de secado con una humedad específica superior a 3,6 g de agua/kg de aire seco o que a 40°C la humedad relativa será siempre inferior al 8%. Si se parte de un ácido del 96%, las condiciones medias a la salida durante la vida de la carga son las correspondientes a una solución del 70% aproximadamente, que a 25°C tiene un aire en equilibrio con 1 g de agua/kg de aire seco, cuya humedad relativa a 40°C es del 2%.

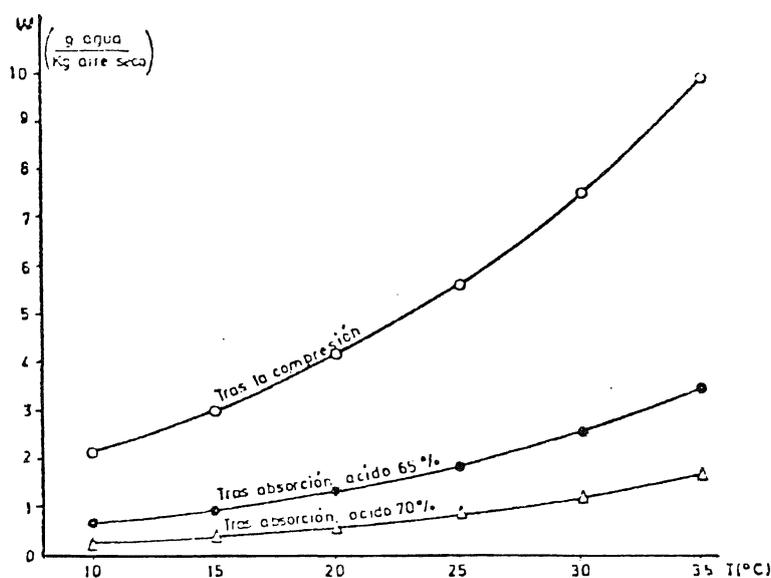


Fig. 1.—Humedad específica teórica del aire en la sección de secado.

Cada uno de los borboteadores dispuestos en la *sección de secado* contiene inicialmente 0,9 litros de SO_4H_2 del 96 %; cuando su concentración se haya reducido hasta el 65 % se habrán incorporado 790 g de agua. Si se supone que en la instalación entra aire saturado a la temperatura ambiente y a 3,5 bars se obtiene la figura 2 que representa la autonomía de esta sección para temperaturas comprendidas entre 10 y 35° C. Con una temperatura media de 25° C y operando en la instalación con 25 l/min de aire, las cargas de ácido permiten funcionar ininterrumpidamente durante unos 9 días. Estos valores teóricos son conservadores y los reales, obtenidos experimentalmente, son, aproximadamente, superiores en un 50 % debido a una serie de razones:

- Por la sección de secado el caudal volumétrico de gases es menor que el que atraviesa la cámara, a causa de que entre ambas se produce un calentamiento y se efectúan aportes de agua.
- Los cálculos están efectuados suponiendo saturación a la presión mínima del tanque de alimentación que opera entre 3,5 y 5 bars, correspondiéndole a este último valor, lógicamente, un menor contenido de agua del aire saturado.
- La cantidad de agua retenida en el borboteo es inferior a la teórica, ya que la eficacia de la absorción es menor del 100 %.

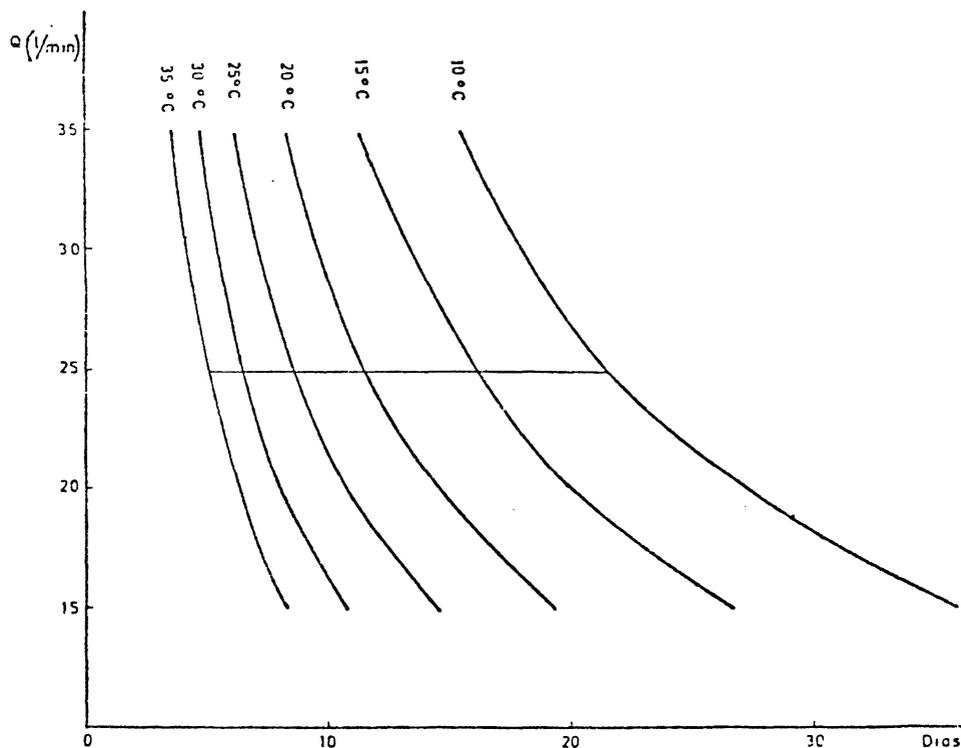


Fig. 2.-Tiempo de funcionamiento ininterrumpido de la *sección de secado* en función de la temperatura ambiente media.

Los valores experimentales obtenidos a la salida de la sección van desde un mínimo de 0,7 g de agua/kg de aire seco (1,5 % de humedad relativa a 40° C) hasta un máximo de 3,6, que corresponde al agotamiento de la carga de ácido y supone a 40° C una humedad relativa aproximada del 8 %. En resumen, la sección de secado con ácido sulfúrico permite obtener en el recinto de exposición humedades relativas inferiores al 10 % sin necesidad de cambiar los borboteadores en un periodo cuya duración está en torno a las 2 semanas, dependiendo de la temperatura ambiente.

La *sección de depuración* está proyectada para retener, fundamentalmente, partículas sólidas o líquidas, compuestos orgánicos y gases contaminantes ácidos. Estos componentes no se han detectado con los métodos de análisis utilizados en el seguimiento de las experiencias de alteración acelerada de materiales en las que se opera con parámetros cuya intensidad es muy superior a la normal en el ambiente. Hay que hacer notar, sin embargo, que aunque no se ha estimado necesaria una depuración más completa del aire para el sistema de simulación que se propone, es preciso ser conscientes de las limitaciones de la mencionada sección para experiencias de imitación de las condiciones ambientales, en las que habrá que efectuar un control más riguroso de la corriente de salida.

3. GENERACION DE LA ATMOSFERA SIMULADA

3.1. Medida de caudales

Con la lectura de las variables que aparecen en la parte frontal del panel de la unidad de medida y regulación de caudales y la temperatura de la cámara de ensayos, se pueden determinar todas las condiciones reinantes en el interior de dicha cámara, es decir, caudal de gases a través de la misma, humedad relativa y concentraciones de contaminantes, a excepción del NO_2 , cuya dosificación viene indicada por la posición del micrómetro incorporado a la válvula de aguja dispuesta para regular el caudal de este compuesto. Las condiciones así determinadas son las teóricas y es preciso corregirlas en función de los correspondientes rendimientos para obtener las reales en el recinto de exposición. En los estudios previos de evaluación del sistema, las condiciones teóricas permiten determinar, precisamente, dichos rendimientos al relacionarlas con los valores medios experimentales.

El primer paso, una vez elegidos los elementos medidores de caudal, orificios o capilares en nuestro caso, es proceder a la calibración de dichos medidores; de la precisión que se alcance en esta calibración dependerá la capacidad de la unidad para fijar unas condiciones predeterminadas.

La calibración se ha efectuado con medidores de burbuja, elementos primarios de medida de caudales, y a partir de los datos obtenidos se ha encontrado que los orificios medidores de las distintas corrientes del componente mayoritario satisfacen ecuaciones del tipo

$$Q = \sqrt{L} (A + B p)$$

donde Q es el caudal de aire (l/min), L , caída de presión en el orificio (cm de agua), p , presión manométrica a la salida del orificio (mm de Hg) y A y B , constantes que se determinan con valores experimentales.

Una vez determinadas las constantes A y B , se ha encontrado que las desviaciones observadas entre los datos experimentales de calibración y los valores resultantes de la ecuación son en todo caso inferiores al 1 %.

Para poder obtener directamente una lectura del caudal en la unidad de medida y regulación, se ha dotado a los indicadores de las caídas de presión en los orificios de una escala resultante de la aplicación de las ecuaciones correspondientes supuesta una presión p de 120 mm de Hg. Cuando dicha presión sea distinta el caudal deberá corregirse por un factor que se ha tabulado, si bien esto normalmente no es necesario ya que la presión elegida es la normal de operación o muy próxima a ella.

En relación con los capilares para la dosificación de contaminantes, el proceso seguido ha sido similar, encontrándose que satisfacen ecuaciones análogas a la descrita anteriormente o del tipo

$$Q = A + B p$$

según el rango de caudales para el que es utilizable.

La calibración de los medidores de caudales de muestreo, también orificios, se ha llevado a cabo de forma análoga, si bien en este caso, con el fin de simplificar los cálculos necesarios, los muestreos se efectúan siempre a la misma presión, con lo que esta variable queda incluida en las constantes de las ecuaciones que permiten determinar el caudal.

Se ha indicado anteriormente que la presión de los orificios medidores del aire puede ser variable, aunque siempre se opera prácticamente con el mismo valor. Esta presión está condicionada fundamentalmente por la existente en cabeza de la instalación de simulación y por las pérdidas de presión a través de los distintos elementos de la misma, que son función, esencialmente, del caudal de aire. De cualquier modo, se puede ejercer un control sobre esta presión con las correspondientes válvulas de regulación establecidas en la propia unidad de medida. También, con el fin de estimar la presión necesaria en cabeza del sistema en distintas condiciones de operación se ha efectuado un estudio de las pérdidas de carga a través de las distintas líneas, habiéndose obtenido una serie de ecuaciones empíricas que permiten establecer, con bastante aproximación, la pérdida de carga en cualquier situación y, por lo tanto, la mínima presión necesaria a la entrada de todo el sistema. En general, se opera con una presión de 0,5 bars manométricos, suficiente para superar todas las pérdidas de carga y relativamente baja por razones de seguridad.

El caudal de gases a través de la cámara no es, normalmente, el obtenido en la unidad de medida por los aportes posteriores de agua y por el calentamiento de la corriente gaseosa; mediante un sencillo cálculo se llega a la ecuación

$$Q_c = \frac{0,622 + w_c}{0,622 + w_m} \cdot \frac{T_c}{T_m} \cdot Q_m$$

donde Q_c es el caudal de gases por la cámara (l/min), Q_m , caudal en los medidores (l/min), T_c , temperatura en la cámara (°K), T_m , temperatura en los medidores (°K), w_c , humedad específica en la cámara (g de agua/kg de aire seco) y w_m , idem en los medidores.

La humedad de los gases que entran en la cámara, por otra parte, es resultante de la mezcla de tres corrientes. Normalmente tanto el aire que sale de la sección de humidificación como el de adición de FH están saturados, de forma que sus caudales pueden sumarse a efectos del cálculo de la humedad resultante, w , que puede obtenerse entonces a partir de

$$w = \frac{m_s w_s + m_h w_h}{m_s + m_h}$$

donde w son humedades específicas, m masas de aire seco y los subíndices s y h se refieren, respectivamente, a las corrientes de aire seco y aire húmedo. Es importante también la determinación del punto de rocío de la mezcla de corrientes para conocer a partir de qué temperatura empiezan a producirse condensaciones.

La concentración teórica de contaminantes en la cámara se obtiene por la relación entre el caudal dosificado del contaminante y el caudal total de gases por el recinto.

Con el fin de simplificar el control, las relaciones que se han descrito pueden tabularse o representarse gráficamente, y, así, la obtención de las distintas condiciones es prácticamente inmediata.

3.2. Humidificación

La masa de aire seco que circula por la sección de humidificación puede obtenerse a partir de la fórmula

$$m_a = \frac{R_a \cdot 219,7}{(0,622 + w)} T_m Q_m$$

donde m_a es el flujo de aire seco (g/min), R_a , constante del aire (atm · l/°K · g), T_m , temperatura en el medidor (°K) y Q_m , caudal en el medidor (l/min); y el consumo diario de agua (l) por:

$$G = 1,44 m_a (w_s - w_e)$$

siendo w_s y w_e las humedades específicas del aire a la salida y a la entrada de la sección, respectivamente.

Si se considera que la humidificación se produce a partir del agua contenida en dos borbotadores de dos litros de capacidad cada uno, se puede calcular el tiempo de funcionamiento ininterrumpido sin necesidad de reposición de agua. Los resultados se representan en la figura 3 para tres temperaturas en el medidor (10, 20 y 30° C), que es la ambiente, caudales de 6 a 18 l/min y aire a la salida con un contenido de agua correspondiente a la saturación a 40° C.

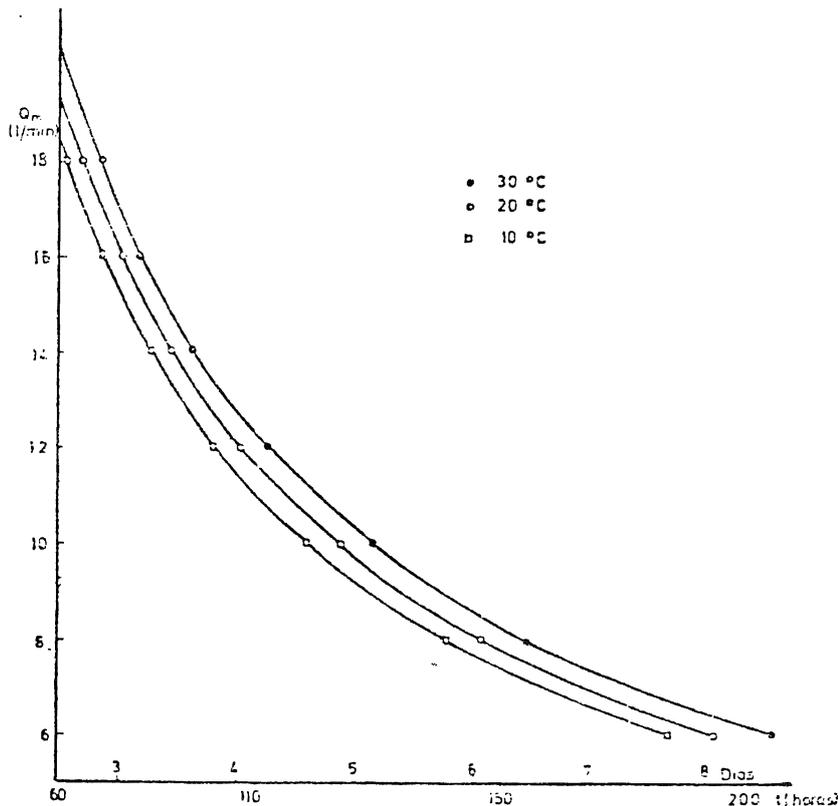


Fig. 3.-Autonomía de la sección de humidificación.

El caudal normal por la sección de humidificación puede ser del orden de 16 l/min, lo que supone una autonomía de unos tres días. Cuando la atmósfera simulada no contiene FH, la

sección de adición de este compuesto puede usarse como apoyo a la de humidificación, aumentándose así la autonomía. De todos modos, estos intervalos de autonomía se han considerado suficientes teniendo en cuenta que la reposición puede efectuarse sin necesidad de detener el flujo de gases y, en cualquier caso, serían muy fáciles de aumentar recurriendo a borboteadores de mayor capacidad.

Con los caudales citados, el rendimiento es, aproximadamente, del 80 %, habiéndose comprobado que es necesario mantener el agua a 44° C para obtener aire saturado en las condiciones de la cámara (40° C).

3.3. Dosificación de FH

En un sistema de simulación de atmósferas contaminadas con FH, procedente del que nos ocupa y desarrollado también en el Departamento (3), se obtuvieron rendimientos en la dosificación de FH del orden del 10 %. Aunque los rendimientos citados por otros autores que han simulado este tipo de atmósferas suele ser del mismo orden (4), hecho que se achaca a la gran reactividad del fluorhídrico, los datos disponibles no nos permitían esclarecer si el problema era consecuencia de la técnica de generación empleada o de efectos superficiales con los materiales de las conducciones, cámara, muestras, etc. Por ello se ha llevado a cabo un estudio que permitiera establecer las cualidades de la técnica de generación. Al mismo tiempo, se ha investigado también la controversia existente (5) acerca de la validez del agua como sustancia absorbidora del FH con vistas a su muestreo y posterior análisis.

Para realizar dicho estudio se ha diseñado y construido una instalación que elimina, en lo posible, las pérdidas de contaminante por adsorción, condensaciones, difusión, reacción, etc., efectuando el muestreo de la corriente generada prácticamente a la salida del borboteador.

En la mencionada instalación, todo el sistema de generación y muestreo está introducido en una cámara de acero inoxidable termostalizada, con objeto de evitar condensaciones. Una bomba aspira aire atmosférico que pasa a través de todo el sistema.

El aire pasa, en primer lugar, por un serpentín donde alcanza la temperatura de la cámara, fluye, posteriormente, por un borboteador con agua destilada para ser humidificado y, a continuación, borbotea en la solución de ácido fluorhídrico, contenida en un recipiente dotado de una sonda para la extracción de muestras y de un elemento medidor de presión, que permiten conocer en todo momento la concentración de FH en el aire en equilibrio con la solución.

La sección de muestreo va precedida de un recipiente en el que se expande el gas y que asegura que no lleguen posibles arrastres de solución a los recipientes captadores, consistentes en sendos borboteadores con agua, dispuestos en serie, necesarios ambos para evaluar la eficacia de la absorción.

Completan la instalación un recipiente para recogida de condensados, un serpentín que mantiene temperatura constante a la entrada del medidor de caudal y elimina el exceso de agua, medidores de presión y temperatura para corregir las lecturas del orificio calibrado situado a continuación de un contador seco de gases y una válvula de regulación de caudal.

Con este sistema se han realizado, con caudales de aire de 0,75, 3, 6 y 9 l/min, sendas experiencias absorbiendo de forma continua el FH contenido en la mezcla generada. En todos los casos la temperatura del sistema se ha mantenido a 40° C. El cambio de los borboteadores de agua se ha efectuado periódicamente y su contenido se ha analizado por separado. También periódicamente se ha determinado la concentración de la solución.

Las concentraciones teóricas se calculan a partir de unas ecuaciones empíricas, determinadas por Brosheer et al (6) para cuatro temperaturas distintas (25, 40, 60 y 75° C). Son expresiones del tipo

$$\log (p_{\text{FH}} + A) = B + C_w$$

donde p_{FH} es la presión de FH sobre la solución (mm de Hg), w , concentración de la solución (% en peso) y A , B y C son constantes. Dichas ecuaciones son válidas para concentraciones comprendidas entre el 2 y el 30 % en peso.

Para ampliar el ámbito de aplicación de las fórmulas anteriores a temperaturas intermedias, con vistas a su utilización posterior en el sistema de simulación, se ha calculado la variación de las constantes en función de la temperatura, habiéndose verificado que, para temperaturas comprendidas entre 25 y 75° C y el rango de concentraciones ya citado, la desviación media en relación con los datos experimentales es del orden del 2 %.

La evolución de las concentraciones de FH generadas en las cuatro experiencias citadas se puede observar en la figura 4. A pesar de producirse una ligera disminución de la concentración de la solución de FH conforme avanza la prueba, las fluctuaciones que se observan en la concentración de este compuesto en la corriente gaseosa no superan en ningún caso una variación del 5 % en torno al valor medio. De este resultado se deduce la gran estabilidad del sistema de generación, y más si se compara con los valores encontrados en la bibliografía, en ocasiones de hasta el 20 % (7).

El sistema no sólo es estable, sino también eficaz. En la figura 5 se representa el rendimiento (concentración determinada experimentalmente en la corriente generada/concentración teórica) frente a los distintos caudales de aire. Como era de esperar el rendimiento disminuye conforme aumenta el caudal, pero para valores de unos 6 l/min, utilizados en la instalación de experiencias de alteración, se mantiene por encima del 90 %.

La eficacia del agua, K (%), como elemento absorbedor del ácido fluorhídrico puede comprobarse en la figura 6, en la que se representa frente a la concentración en el líquido del primer borboteador (L'_1 , ppm). La eficacia se ha definido como

$$K = 100 L'_1 / (L'_1 + L'_2)$$

donde L'_2 es la concentración en el líquido del segundo borboteador utilizado para la absorción. Esta eficacia indica el porcentaje de los fluoruros que han quedado retenidos en el primero de los borboteadores y es, por tanto, una medida de la capacidad absorbente del agua para este compuesto. Los resultados experimentales obtenidos indican que la eficacia de retención es superior al 99 %, incluso con caudales de 6 l/min, siempre que el periodo de captación no sea demasiado largo o que la concentración de ácido fluorhídrico en el primer borboteador no alcance valores elevados; en caso contrario, la propia solución de muestreo puede actuar como sistema de generación de FH, evaporándose una parte del que se ha retenido. Este aspecto se revela en la mencionada figura 6.

Las tomas de muestra que se han llevado a cabo en la instalación de simulación de atmósferas no suele tener una duración superior a 30 minutos y el caudal es de 1,2 l/min., de forma que las eficacias de captación serán muy buenas.

Las experiencias descritas ponen de manifiesto tanto la eficacia del agua como sustancia absorbidora como la validez del sistema de evaporación para ser utilizado como técnica de generación de atmósferas con FH en la instalación de simulación. Los rendimientos son elevados y la estabilidad es buena ya que, con caudales normales de operación, la concentración de la

solución de FH apenas varía un 10 % a lo largo de una semana. Concretamente, el rendimiento de la adición de FH en la instalación de simulación es del orden del 95 % en las experiencias de aplicación que se han efectuado, con caudales de 3-4 l/min, circulando por cada uno de los borboteadores. Este rendimiento se refiere a la generación, mientras que el rendimiento global, definido como la relación entre la concentración de FH en el interior de la cámara y la teórica de equilibrio con la solución utilizada, no es tan fácil de precisar. En las experiencias de aplicación se han determinado rendimientos globales variables, dependiendo de las condiciones de operación y, fundamentalmente, de la humedad en el interior del recinto de exposición.

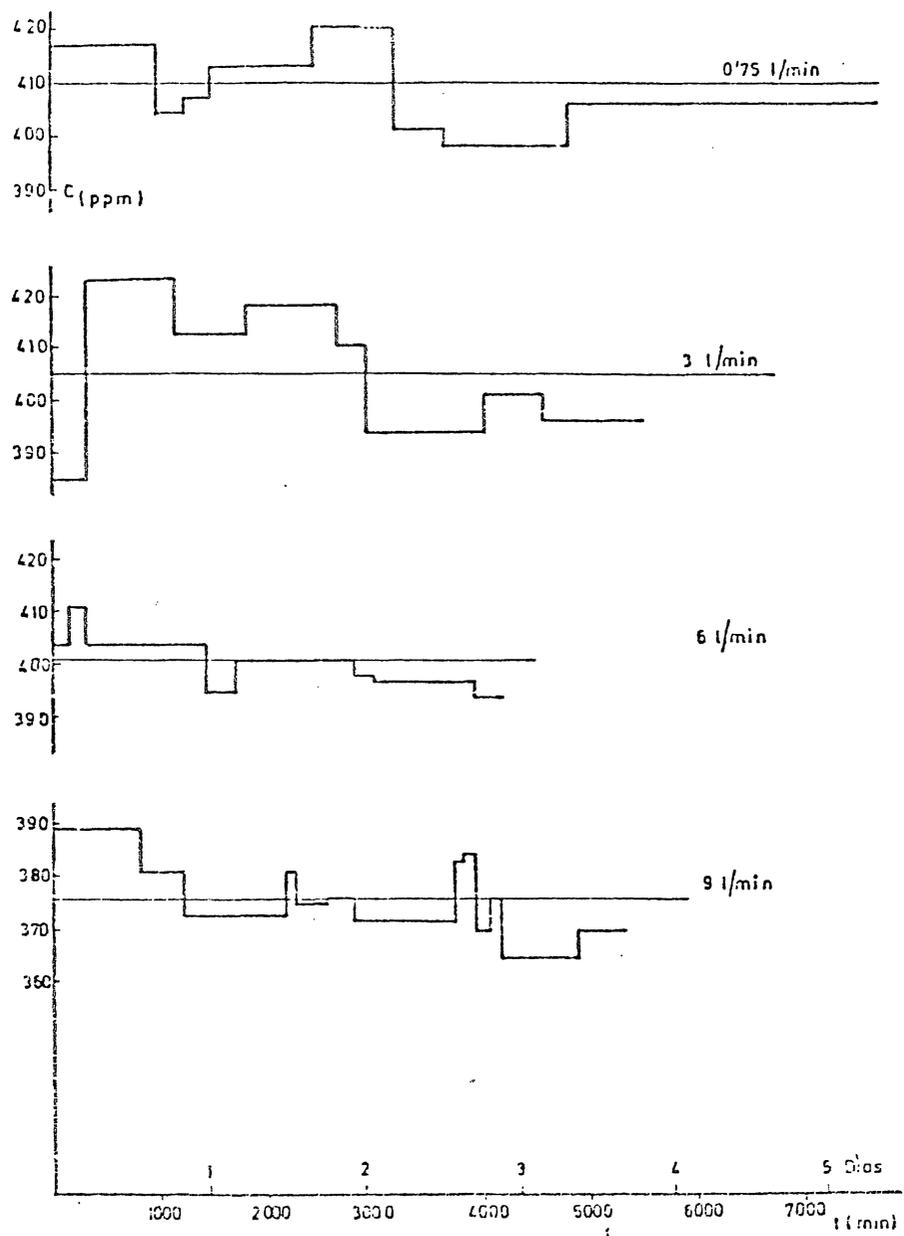


Fig. 4.-Evolución de concentraciones de FH en diversas experiencias.

Si se opera con una atmósfera prácticamente saturada, evitando condensados en la instalación, se alcanza un rendimiento global próximo al 30 %, siempre que no se introduzcan muestras en la cámara. Este valor puede llegar al 50 % si las humedades relativas son inferiores al 60 %. Las cifras citadas corresponden a caudales de renovación de 25 l/min, y una temperatura de 40° C.

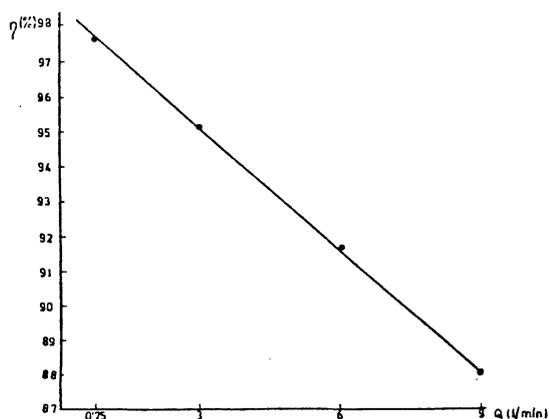


Fig. 5.—Rendimientos medios obtenidos en la generación de mezclas aire-FH.

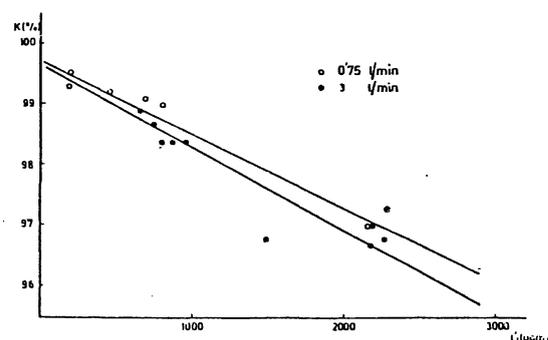


Fig. 6.—Eficacia del agua como absorbente del ácido fluorhídrico.

Cuando se efectúa un secado del recinto de exposición, es necesario extremar las precauciones para evitar que las concentraciones de FH alcancen valores muy elevados. La retención de este compuesto en las paredes del recinto aumenta con la humedad relativa, como se deduce de los valores citados anteriormente, pero, cuando aparece agua líquida, como consecuencia de condensaciones o introducida por los atomizadores, las gotas formadas absorben cantidades importantes de fluoruro de hidrógeno. El descenso de la humedad relativa provoca, en consecuencia, un doble efecto: favorece la desorción de las paredes y, lo que es más importante, produce la evaporación del líquido, con lo que se desprenden grandes cantidades de FH. En las experiencias de aplicación desarrolladas se ha operado con presencia continua de agua líquida para asegurar condiciones de saturación y extremar las condiciones de exposición, de modo que el efecto de la evaporación es decisivo. La figura 7 muestra la evolución de la concentración de FH y de la humedad relativa a lo largo de una de estas experiencias en la que se han simulado, además, períodos de lluvia, nebulizando agua en el interior del recinto.

Los períodos de atomización, como puede observarse en la figura 7, suponen una caída instantánea de la concentración de FH a, aproximadamente, el 40 % de la que existía previamente, debido a la gran tendencia del FH a absorberse en el agua líquida. Con posterioridad hay que proceder a la restauración del valor programado, 100 ppm en este caso, teniendo en cuenta la absorción en la fase líquida, que no llega a eliminarse totalmente ya que quedan pequeñas gotas en las paredes del recinto. Incrementando temporalmente la concentración de FH en la corriente de entrada se ha logrado compensar en parte los efectos de la absorción y que el período de recuperación se acorte considerablemente. Las gotas, no obstante, podrían eliminarse con una programación diferente de la experimentada, introduciendo aire seco y/o aumentando la temperatura.

Los secados han de llevarse a cabo progresivamente sin aportes de FH, ya proporcionado por la evaporación, y sin intentar alcanzar humedades relativas excesivamente bajas, a menos que se emplee el tiempo suficiente. En el desarrollo de la experiencia que recoge la figura 7 se han efectuado dos secados, uno intermedio hasta un 40 % de humedad relativa y otro final, más duradero, hasta alcanzar un 10 %; aun así se superan las concentraciones de FH programadas en los primeros instantes del secado.

Tanto en la experiencia mencionada como en otra realizada prácticamente en las mismas condiciones, pero introduciendo SO_2 como segundo contaminante y 20 probetas en el recinto, se ha obtenido un rendimiento medio en la cámara para la adición de FH del 21 %, valor bajo si se compara con los de otros contaminantes, pero similar o superior a los otros autores que utilizan este compuesto. La estabilidad de las concentraciones de FH en la cámara puede

considerarse buena, teniendo en cuenta los aspectos ya mencionados y la reactividad de este contaminante, ya que la mayor parte de las medidas, exceptuando los periodos transitorios, están dentro del $\pm 10\%$ del valor de consigna. Los valores medios a lo largo de las dos experiencias citadas, en las que se programaron 100 ppm de FH, han sido 99,1 y 101,3 ppm lo que asegura la reproducibilidad de concentraciones del compuesto que nos ocupa. La presencia simultánea de SO_2 no afecta a la dosificación de FH.

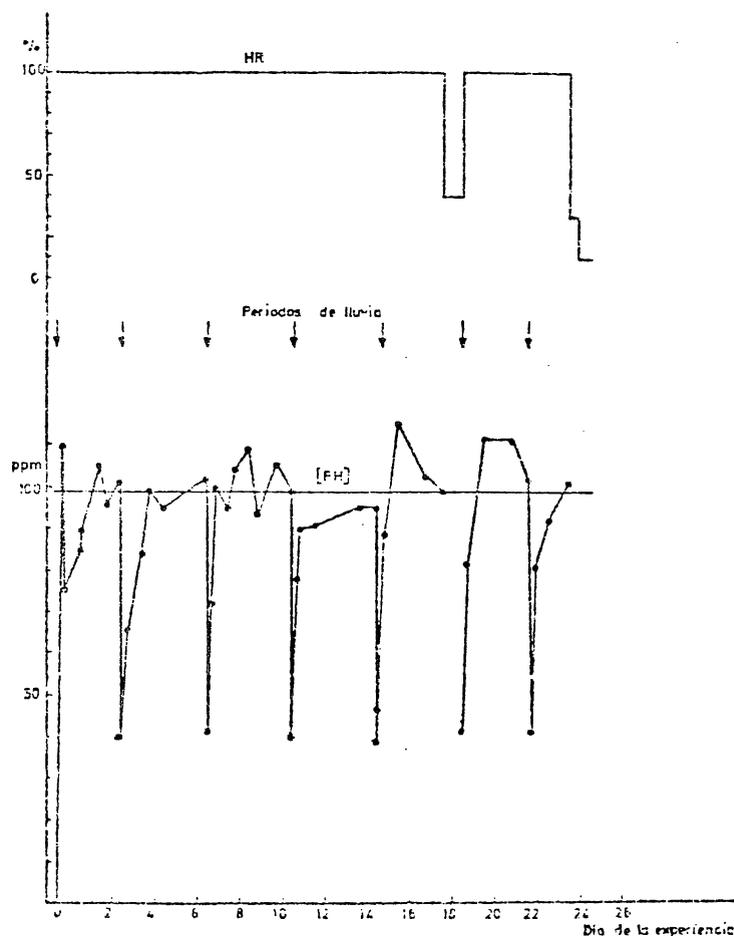


Fig. 7.—Experiencia de aplicació con atmósfera de FH.

El rendimiento de la sección de adición de FH en relación con la humidificación de la corriente es del orden del 90 %, superior al de la sección de humidificación, como era de esperar, ya que en este caso existen dos borboteadores en serie en cada una de las líneas. Con objeto de alcanzar la saturación de humedad, se sitúa la temperatura del baño termostático de esta sección a 42° C. Los borboteadores utilizados en la humidificación previa son idénticos a los de la sección de humidificación y por tanto la autonomía de los mismos puede obtenerse a partir de la figura 3; como en este caso los caudales son inferiores, el tiempo de funcionamiento sin reposición de agua es del orden de una semana.

Para el cálculo de la concentración teórica de FH se recurre a las ecuaciones de Brosheer et al (6), para 42° C. A partir de ella se calcula la presión de vapor de FH en equilibrio con la solución y en función de la concentración de ésta.

Conocido el valor teórico, la concentración en el interior de la cámara, en las dos experiencias

de aplicación que se han citado , en las que sólo se introduce aire saturado de humedad, vendrá dada por:

$$C = \frac{p_{FH}}{760} \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_3}{Q_3 + Q_4} \cdot \eta_G \cdot \eta_C$$

donde p_{FH} es la presión de vapor de FH en equilibrio con la solución (mm de Hg), C la concentración de FH (ppm), Q_3 el caudal por la sección de FH (de 2,75 a 11 l/min), Q_4 el caudal por la sección de humidificación (l/min), η_G el rendimiento en la generación de FH (0,95) y η_C el rendimiento de FH en la cámara, (0,21).

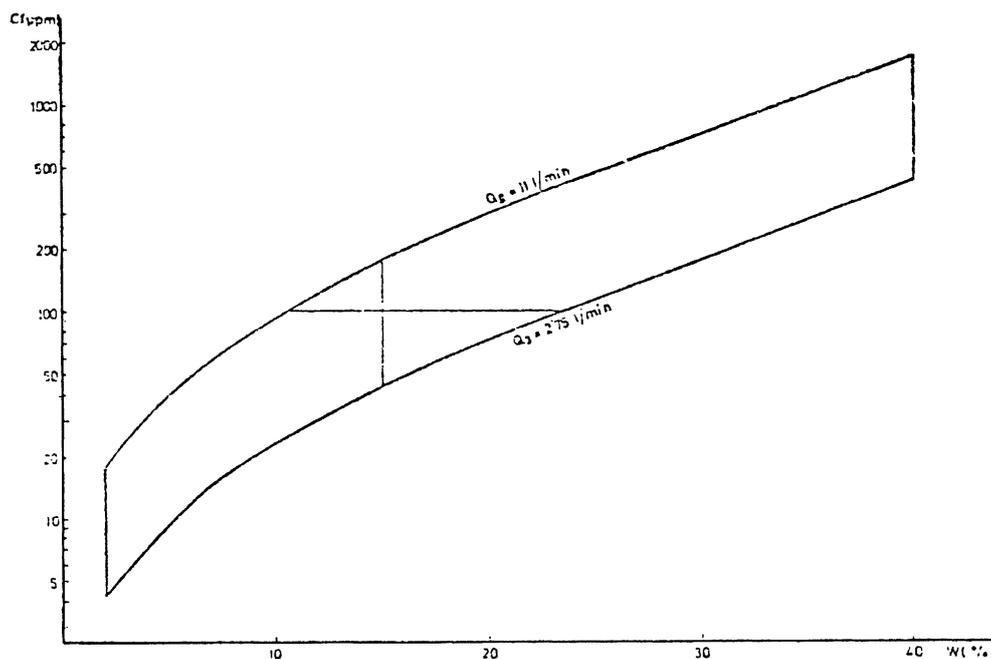


Fig. 8.—Rango de concentraciones en el interior de la cámara con soluciones de FH del 2 al 40 % en peso. (Temperatura de la cámara 40° C, idem del baño de adición de FH 42° C y caudal total de aire 25 l/min).

La figura 8 proporciona las concentraciones que se pueden alcanzar en el interior de la cámara con soluciones comprendidas entre el 2 y el 40 % en peso, caudales de 2,75 a 11 l/min por la sección de adición de FH y las condiciones ya especificadas. Las concentraciones vienen determinadas por el área encerrada por las líneas correspondientes a los caudales extremos citados y las verticales para soluciones del 2 al 40 %. Se observa que para alcanzar la concentración programada de 100 ppm en la cámara pueden utilizarse soluciones con concentraciones desde el 11 hasta el 23 %.

La figura 9 representa, para este intervalo de concentraciones, la autonomía de los borboteadores con la solución de FH y el caudal de aire que debe circular por la sección para obtener 100 ppm en la cámara, supuestos los rendimientos anteriormente indicados. Evidentemente, la autonomía es mayor cuanto más concentrada sea la solución utilizada, pero, por otra parte, hay que operar con caudales más bajos con los que la precisión del medidor es menor y las posibilidades de control peores. Se ha optado por una solución del 15 % de FH, que supone un caudal de 6,6 l/min a través de la sección y un periodo de funcionamiento de 15 días sin necesidad de reponer la solución. Hay que señalar, sin embargo, que, al menos semanalmente, conviene hacer un reajuste de concentraciones para compensar las variaciones.

Con la solución del 15 % se pueden alcanzar, como se observa en la figura 8, hasta unas 170 ppm en cámara aumentando el caudal hasta 11 l/min, lo que es aprovechado para alcanzar más rápidamente la concentración programada cuando se comienzan las experiencias y después de los periodos de lluvia.

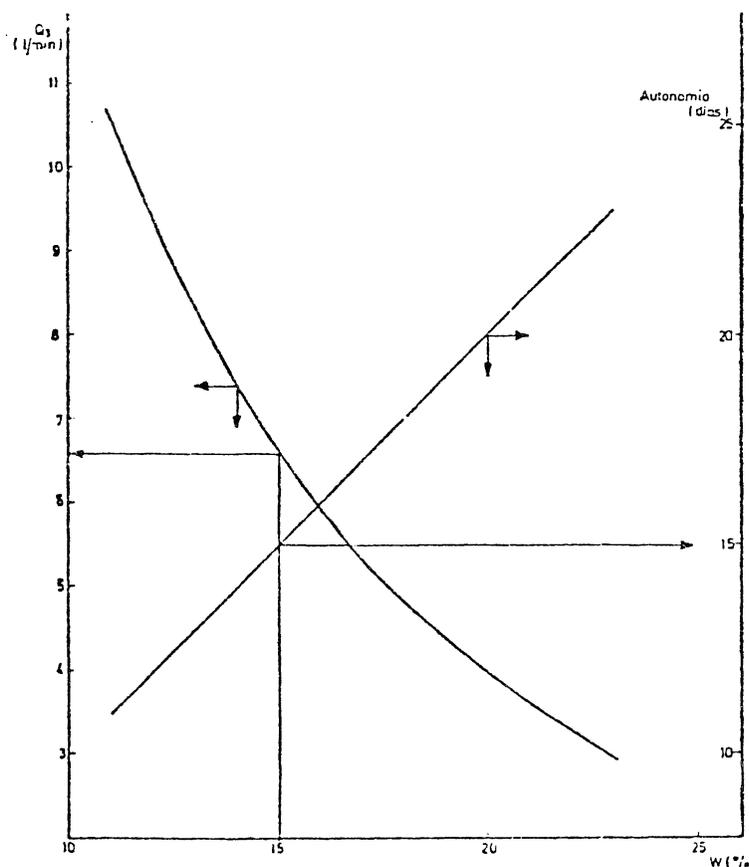


Fig. 9.—Autonomía y caudales de la sección de FH para obtener 100 ppm en el interior de la cámara a partir de soluciones de distinta concentración.

3.4. Dosificación de otros contaminantes

Se considera, a continuación, la dosificación de anhídrido sulfuroso, amoníaco, propileno y dióxido de nitrógeno; las conclusiones a que se llega, en el caso de los tres primeros, pueden hacerse extensivas a todos aquellos gases que a temperatura ambiente tengan una presión de vapor más de dos o tres veces superior a la atmosférica y no posean una especial reactividad, ni modifiquen su composición química. El sistema de dosificación por capilares a partir de botellas que contengan al compuesto licuado debe permitir un caudal reproducible y estable, obteniéndose valores de ml/min, e incluso inferiores, que se mantienen con una variación inferior al 10 % en torno al punto de consigna, sin necesidad de control de temperatura.

La figura 10 representa la variación de las concentraciones de anhídrido sulfuroso en el interior de la cámara en una experiencia programada para obtener 500 ppm de este gas, en condiciones de saturación de humedad la mayor parte del tiempo, con dos secados, uno intermedio y otro final y simulación periódica de lluvia. Las variaciones de concentración se mantienen inferiores al 10 % del valor programado si se exceptúan los periodos posteriores a la atomización de agua y el transitorio del comienzo.

La figura 11 muestra la evolución de concentraciones en otra experiencia programada con

500 ppm de SO_2 también, pero con ciclos de humidificación-secado, en la que se siguen manteniendo los valores dentro del intervalo indicado. En otras experiencias con este contaminante y FH, en un caso, o NO_2 y C_3H_6 , en otro, los resultados han sido similares. Como consecuencia de todo ello, se puede afirmar que en los periodos de lluvia ni las variaciones de la humedad de la atmósfera simulada afectan drásticamente a la concentración de SO_2 , en contra de lo que ocurría con el FH. Inmediatamente después de un periodo de atomización de agua, la concentración de SO_2 se reduce en apenas un 20 % y la recuperación, a pesar de la presencia de fase líquida, es rápida, incluso sin necesidad de modificar las condiciones de dosificación del anhídrido sulfuroso. En el caso de la experiencia con ciclos de humedad, se observa en los ciclos iniciales una variación de concentración de SO_2 , dentro del intervalo citado, siguiendo las oscilaciones de la humedad relativa; este fenómeno, al igual que ocurría con el FH, denota una distinta magnitud de los efectos superficiales según las condiciones de humedad reinantes. En los últimos ciclos esto ya aparece corregido, modificando ligeramente las condiciones de dosificación simultáneamente con el cambio de las condiciones de humedad.

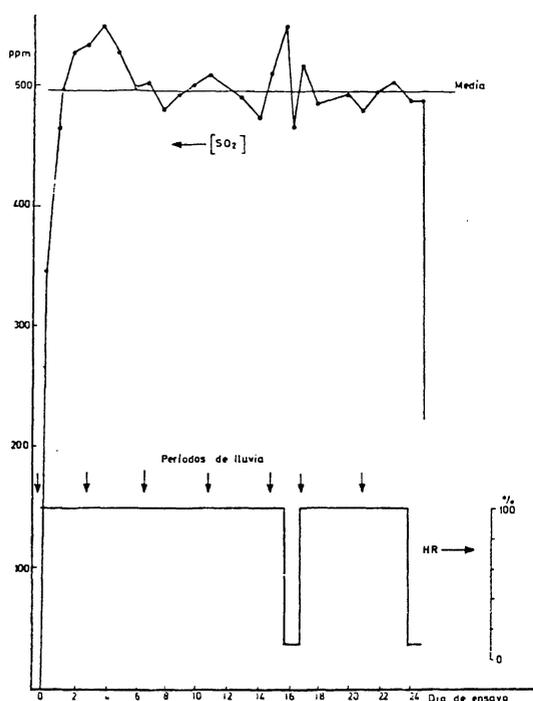


Fig. 10.—Evolución de la experiencia con atmósfera de SO_2 en condiciones de saturación.

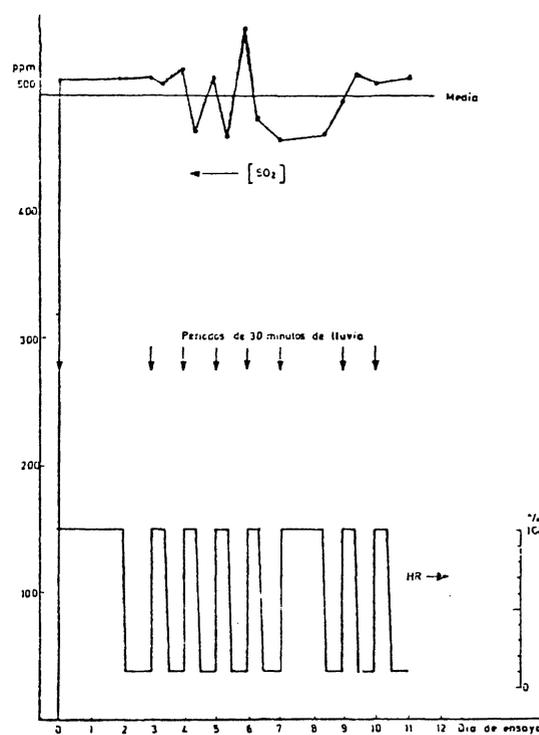


Fig. 11.—Evolución de la experiencia con atmósfera de SO_2 y ciclos de humedad.

En cualquier caso, el rendimiento de la dosificación se mantiene superior al 90 % y las medias de las concentraciones obtenidas, siempre en experiencias programadas para lograr 500 ppm de SO_2 , han sido de 501, 496, 495 y 504 ppm.

Las consideraciones hechas para el anhídrido sulfuroso son aplicables a propileno y amoníaco, según se ha verificado en nuestra instalación en diversos estudios, y a otros gases de características similares, según es previsible.

El dióxido de nitrógeno presenta algunos problemas específicos ya considerados con anterioridad (2). Se trata de un compuesto cuya significación, a efectos de alteración de materiales, reside más en consecuencias indirectas que directas. El NO_2 absorbe determinadas longitudes de onda del espectro solar y desencadena, junto con las olefinas y otros hidrocarburos presentes en la atmósfera, una serie de procesos fotoquímicos que se traducen en la formación de oxidantes, aerosoles ácidos y

compuestos intermedios extraordinariamente activos (8, 9); por ello, su inclusión en una atmósfera simulada cobra más importancia cuando está acompañado por los mencionados hidrocarburos, la correspondiente radiación y, más aún, por el anhídrido sulfuroso (10, 11), circunstancia relativamente frecuente en ambientes contaminados. En estas condiciones, en la atmósfera generada se simulan no sólo unas determinadas concentraciones de ciertos contaminantes sino también los procesos de transformación, contemplando así el aspecto dinámico de la atmósfera no tenido en cuenta normalmente.

Las figuras 12 y 13 muestran la evolución de la concentración de ciertos contaminantes a lo largo del desarrollo de esta experiencia de simulación de smog fotoquímico, concebida como un primer esbozo de este tipo de estudios que requerirá posteriores ensayos con el fin de lograr unas determinadas condiciones en el recinto de exposición que puedan ser reproducibles. Este carácter de tentativa justifica el que la experiencia se haya desarrollado en tres fases distintas, con concentraciones de dióxido de nitrógeno de 0, 300 y 50 ppm, respectivamente. Las otras condiciones programadas han sido 500 ppm de SO_2 , 1.000 ppm de C_3H_6 , saturación de humedad a lo largo de toda la prueba, períodos de radiación de 8 h/día, temperatura de 40°C y caudal de renovación de 25 l/min. Es preciso hacer notar que en esta experiencia de simulación de smog, el control de las concentraciones programadas se ha efectuado en la entrada del recinto de exposición, inmediatamente después de efectuar la mezcla de contaminantes y antes de que pudieran tener lugar las reacciones de transformación en una proporción apreciable. Esta práctica sólo puede admitirse en una experiencia que, como la que se describe, únicamente pretende abrir el camino a una nueva filosofía relativa al ensayo de materiales. En experiencias de alteración acelerada las condiciones controladas deben ser siempre aquéllas a las que está expuesto el material, es decir, las reinantes en el interior de la cámara.

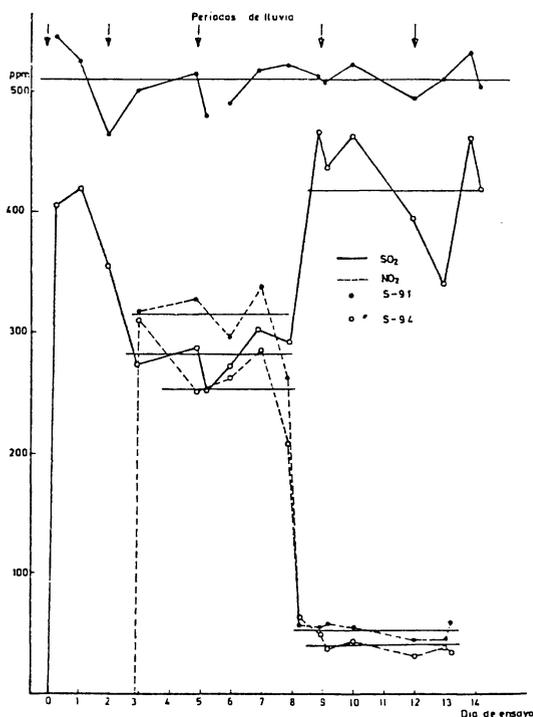


Fig. 12.—Evolución de la concentración de dióxido de nitrógeno y anhídrido sulfuroso, durante la experiencia de simulación de smog, en la corriente de entrada (S-91) y en la cámara (S-94).

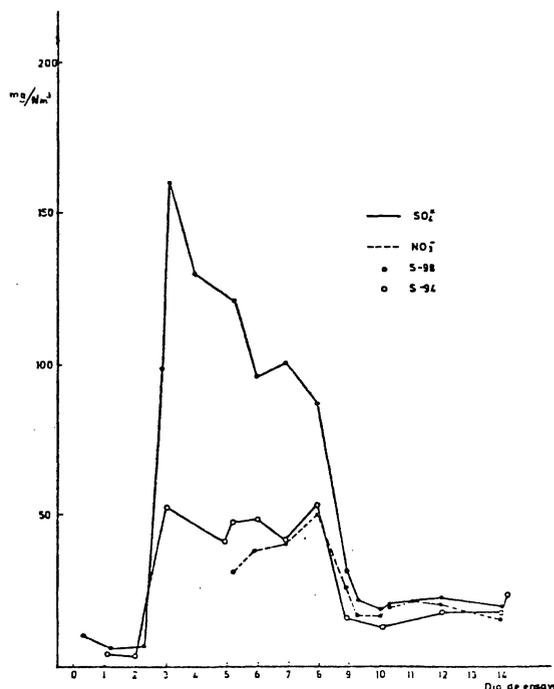


Fig. 13.—Evolución de la concentración de sulfatos y nitratos, durante la experiencia de simulación de smog en la cámara (S-94) y en los condensados de la corriente de salida (S-98).

El empleo de una válvula micrométrica, que permite reducir la presión de operación, y la calefacción del sistema de dosificación del NO_2 , que eleva la temperatura, persiguen el mismo

objetivo de evitar condensaciones en los elementos de control y medida de caudal de este compuesto. No obstante, hay que tener en cuenta que se mide una mezcla de dióxido y tetróxido de nitrógeno que, posteriormente, al disminuir su presión parcial, se convertirá totalmente en el primero. Manteniendo constantes las condiciones de operación, 1,2 bars y 50° C, aproximadamente el 48 % en volumen del gas medido está compuesto por N₂O₄; esto significa que 100 moles medidos se transforman en 148. Como consecuencia de estos fenómenos, la variación de concentraciones es aproximadamente del ± 20 % en torno al valor programado, valor aceptable tomando en consideración las dificultades mencionadas y difícilmente mejorable sin recurrir a sistemas más complejos y costosos, si se exceptúan los tubos de permeación, reservados para simular concentraciones más bajas que las utilizadas en estos estudios. Los valores medios, a la entrada de la cámara, obtenidos en la segunda y tercera fases de la experiencia de simulación de smog, con concentraciones programadas de NO₂ de 300 y 50 ppm, han sido de 315 y 53,5 ppm, respectivamente.

Durante la primera fase, sólo con anhídrido sulfuroso y propileno, la proporción transformada del primero es pequeña, aunque apreciable. En la segunda, la producción de smog es muy importante, como se demuestra a partir de la disminución de SO₂ en la cámara (concentración media de 282 ppm) y de la relativamente más pequeña de NO₂ (media de 253 ppm). Las cantidades de sulfatos y nitratos formadas que se han detectado, tanto en el interior de la cámara como en los condensados de la corriente de salida son también notables. A lo largo de la tercera fase, por último, se detecta también una transformación de los contaminantes introducidos, si bien en una proporción menor. Esta afirmación, que tal vez no pudiera hacerse en función de la disminución de la concentración de los contaminantes primarios SO₂ y NO₂, ya que las diferencias podrían ser explicables a partir de los valores de rendimientos, si parece clara en base a la existencia de cantidades apreciables de sulfatos y nitratos.

Es necesario señalar que durante esta experiencia se han producido abundantes condensaciones de los ácidos nítrico y sulfúrico en el interior de la cámara, y que la formación de un aerosol líquido a lo largo de un ensayo acelerado requiere cuidadosos estudios que permitan asegurar la reproducibilidad del mismo.

Como resumen, puede establecerse que los resultados obtenidos reflejan un importante desarrollo de procesos que conducen a la formación de contaminantes secundarios. Aunque serán necesarios estudios posteriores, parece claro que con un sistema relativamente sencillo como el propuesto, en el que sólo se introducen tres componentes gaseosos que se someten a radiación, es posible la simulación de smog, abriéndose así un interesante campo para una futura evolución de los ensayos acelerados de materiales hacia el uso de atmósferas reactivas, más similares a las naturales.

Como las fuentes de todos los contaminantes gaseosos considerados en este apartado son botellas que los contienen licuados en estado puro, la autonomía de las instalaciones es muy elevada, del orden de varios meses de funcionamiento ininterrumpido con concentraciones generadas del orden de las utilizadas en las experiencias que se han descrito. Los rendimientos son en todos los casos del orden del 90 % o superiores.

4. CAMARA DE ENSAYOS

El diseño de la cámara, así como la programación de las experiencias, están orientados a ensayos de varios días de duración, buscándose la estabilidad de las variables, frente a la rapidez en los cambios, sin perder de vista que la duración de los períodos transitorios nunca deben suponer sino una pequeña fracción de la duración total de las experiencias. Para cambios más rápidos de la concentración de los contaminantes o de la humedad se puede acudir a caudales de renovación más elevados sin necesidad de modificar el diseño de la cámara. La

variación de la temperatura, por el contrario, viene condicionada en gran medida por las dimensiones del baño termostático de agua, en este caso grande para lograr buena estabilidad e inercia frente a la modificación de las condiciones ambientales externas. En consecuencia la elevación o descenso de temperatura se hace lentamente, de modo que los gradientes en el interior del recinto no superen 1° C ni aún en los períodos transitorios y sin calentamiento en el baño de fondos; en régimen estacionario la homogeneidad de temperaturas en la cámara es excelente, hasta el punto de que el baño termostático de fondos sólo es necesario cuando en la parte inferior del recinto se quiere obtener una temperatura mayor que en la superior, a fin de provocar condensaciones. El tiempo necesario para elevar la temperatura de la cámara hasta unos 40° C es del orden de tres horas, que se puede reducir utilizando elementos de calefacción de apoyo para estos períodos transitorios. El enfriamiento puede acelerarse renovando el agua del baño.

La modificación de la concentración de cualquier compuesto, vapor de agua incluido, en el interior de la cámara se lleva a cabo introduciendo una corriente que contenga dicho compuesto en el recinto. La corriente entra en la parte superior, se mezcla con la atmósfera existente y se extrae por las conducciones del fondo. La evolución teórica de la concentración, supuesta mezcla instantánea de la corriente entrante con la atmósfera interior, se puede obtener mediante un balance de masas, llegándose a la expresión (12):

$$\frac{C - C_i}{C_0 - C_i} = 1 - e^{-Qt/V}$$

donde t es el tiempo transcurrido desde que se inicia el cambio (min), Q , caudal de renovación (l/min), C_i , concentración en la cámara en el instante $t = 0$, C_0 , concentración en la corriente de entrada, C , concentración en la cámara en el instante t y V , volumen del recinto (1).

Con vistas a seguir la evolución de las distintas variables y determinar la distribución topográfica de las mismas en el interior del recinto, se han efectuado una serie de experiencias modificando las condiciones, tomando muestras en diversos puntos del interior y comparando los valores experimentales con los correspondientes a una evolución teórica determinada por la fórmula ya citada.

Así, por ejemplo, se ha dedicado una especial atención al estudio de las condiciones de humedad en el interior de la cámara, por la gran importancia que pueden tener pequeñas variaciones en el valor de esta variable en relación con la velocidad de alteración de los materiales ensayados. En las figuras 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos en dos de una amplia serie de experiencias de humidificación (se parte de aire seco en el interior de la cámara y se introduce aire húmedo para seguir la evolución de la humedad) y de secado (al revés). El caudal de renovación es de 25 l/min. La línea discontinua corresponde a la evolución teórica; las líneas continuas representan las evoluciones en el centro del recinto (S-97) y a la salida (S-92). Se incluye también la humedad de la corriente introducida (S-91), línea horizontal, a la que se tiende en el equilibrio.

En la experiencia de humidificación recogida en la figura 14 se parte de una humedad relativa en la cámara del orden de 3 % ($w = 0,0013$), a 40° C, y se introduce una corriente con el 94 % ($w = 0,0457$); las densidades correspondientes a estas condiciones son 1,12 y 1,05 kg/m³, respectivamente. Esta diferencia de densidades se traduce en una cierta estratificación del aire en el interior del recinto, de forma que el aire húmedo tiende a quedarse en la parte superior, que es por donde se introduce, y se establece un gradiente vertical de humedades. La figura 14 pone de manifiesto la diferencia del contenido de agua en la atmósfera de la parte central e inferior de la cámara, si bien al cabo de una hora después del comienzo de la experiencia, apenas supone una desviación del 5 % en torno al valor medio; al cabo de unas doce horas la homogeneidad es completa. Otras consecuencias de este fenómeno son que en la zona inferior no repercute la

introducción de la corriente humidificada prácticamente hasta pasados unos diez minutos, desde el comienzo de la experiencia, y que en la zona media la evolución es más rápida que la teórica durante la primera hora.

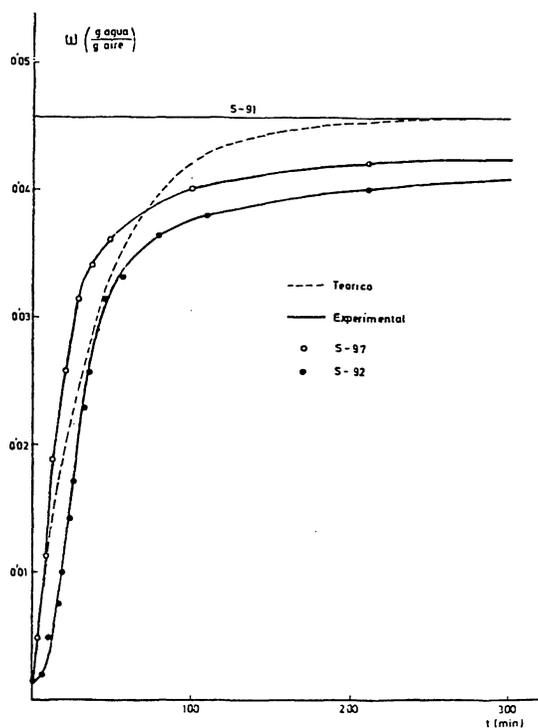


Fig. 14.-Evolución de humedad en la cámara. Humidificación.

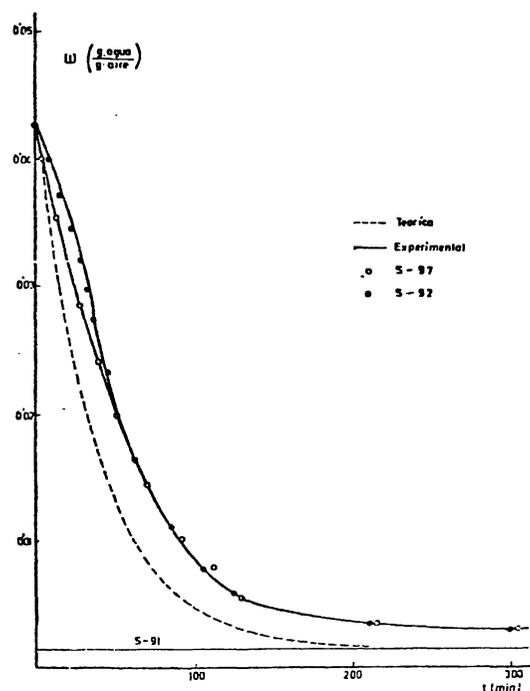


Fig. 15.-Evolución de humedad en la cámara. Secado.

Las paredes, que han quedado en contacto durante cierto tiempo con una atmósfera seca, adsorben en las primeras horas parte del agua introducida, de forma que la evolución es más lenta de lo previsto, particularmente a partir de humedades relativas del orden del 80 %.

En la figura 15 se representan los valores correspondientes a la experiencia de secado. Se parte de una atmósfera en el interior de la cámara con un 90 % de humedad relativa ($w = 0,043$) y se introduce una corriente con un 3 % ($w = 0,014$). En este caso, los gradientes de humedad son menores y se alcanza la homogeneidad en un intervalo de tiempo más corto, del orden de una hora, gracias a que la corriente introducida es ahora más densa y favorece la mezcla. La evolución es también más lenta de lo previsto, debido, muy posiblemente, a la desorción del agua retenida en las paredes del recinto.

Se puede pasar, con un caudal de renovación de 25 l/min de una humedad relativa del 10 % a otra del 80 % en unas dos horas. Para una variación del 50 al 80 %, por debajo y por encima, respectivamente, de la humedad crítica en la mayoría de los casos, se necesitan unos 40 minutos y 30 para el proceso inverso, lo que supone un tiempo aceptable. Por otra parte, dichos intervalos pueden acortarse recurriendo a condiciones de funcionamiento relativamente especiales. El secado se puede hacer más rápido introduciendo un caudal mayor de aire seco y para la humidificación lo inmediato es atomizar agua en el interior del recinto.

Exceptuando el caso de la humedad, los estudios topográficos de concentraciones presentan desviaciones inferiores, normalmente, al 5 % del valor medio obtenido en diversos puntos del interior, demostrándose así que el sistema de introducción y extracción de la corriente gaseosa es adecuado, no siendo, pues, necesaria la instalación de elementos de agitación. La figura 16

muestra la evolución de la concentración de un contaminante, NH_3 en este caso, en dos puntos interiores, correspondientes a la zona central (S-97) e inferior (S-93) y en la salida del recinto de exposición (S-92), habiéndose partido de aire libre de este compuesto; la concentración de la corriente de entrada (S-91) es de 325 ppm y la línea de trazos representa la evolución teórica. En este caso, y en los del resto de contaminantes, no existen problemas de diferencia de densidades y la distribución topográfica de concentraciones es uniforme desde los primeros instantes. También se produce una cierta adsorción de contaminantes, más importante en un periodo inicial de cuatro horas, que provoca un retraso de la evolución experimental en relación con la teórica. Transcurrido esta especie de "curado" de las paredes, la concentración alcanza el equilibrio en un valor que supone del 90 al 95 % del de entrada, siempre con caudales de renovación de 25 l/min. Este rendimiento, para todos los contaminantes introducidos a excepción del fluoruro de hidrógeno por los problemas ya comentados, confirma la resistencia química del poliéster empleado para la construcción de la cámara. En relación con el fluoruro de hidrógeno, ya se ha señalado que los valores de rendimiento obtenidos, aunque bajos, son del mismo orden o superiores que los alcanzados en estudios de otros investigadores.

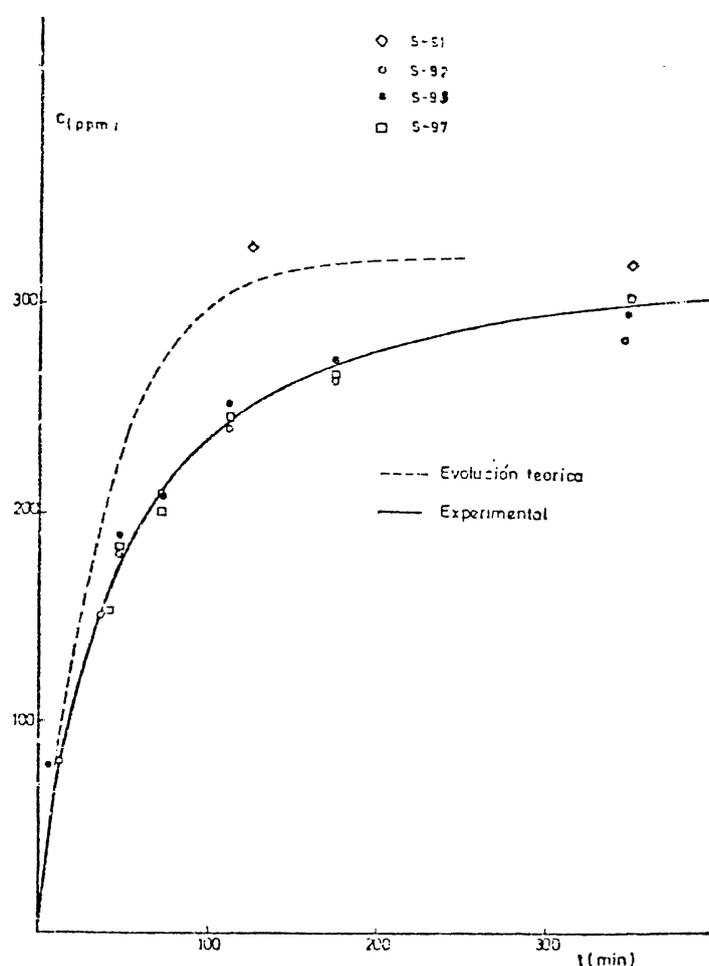


Fig. 16.-Evolución de la concentración de NH_3 en la cámara de ensayos.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Es un hecho que la simulación de atmósferas no es un problema sencillo, aunque las dificultades no deben conducir a posturas negativas o, en el otro extremo, excesivamente simplificadoras.

La utilidad de las experiencias de alteración de materiales en atmósferas simuladas ha sido

aceptada de forma prácticamente general. La aleatoriedad de los cambios de las condiciones ambientales y la necesidad de disponer de datos abundantes en un periodo corto de tiempo, con el fin de establecer el mecanismo de las alteraciones, muestran la conveniencia de desarrollar este tipo de investigaciones, que deben suponer un complemento, nunca una sustitución, de los estudios efectuados a la intemperie. Los que critican estas experiencias aceleradas argumentan principalmente que no se reproducen convenientemente el comportamiento en el exterior, pero aun en el caso de que fuera cierto, la solución estaría en un mayor esfuerzo de investigación de los sistemas de simulación. Por otra parte, esta disparidad de resultados entre experiencias aceleradas y a la intemperie no siempre es acusada y se puede afirmar que, en la actualidad, existen instalaciones, particularmente las dedicadas al estudio de los mecanismos de transformación de los contaminantes en la atmósfera, que logran una aproximación muy notable a las condiciones de la atmósfera natural.

Desgraciadamente, la mayor parte de los sistemas existentes en la actualidad para el ensayo de diversos materiales en atmósferas controladas simplifican excesivamente el problema de la simulación. Esta tendencia, opuesta a la reseñada anteriormente, conduce a la proliferación de ensayos que difícilmente podrán aportar datos fiables sobre el comportamiento de los materiales. La única excepción, prácticamente, de esta excesiva simplificación, son los sistemas para el estudio de la transformación de los contaminantes primarios, que, por otra parte, son demasiado sofisticados y complejos para ser utilizados en experiencias de alteración de materiales, que en muchos casos deben acabar adquiriendo un carácter repetitivo y ser desarrolladas por un personal no excesivamente cualificado. No obstante, estos sistemas suponen el estado más avanzado en el campo de la simulación ambiental y, por ello, se puede obtener de los mismos una valiosa información con vistas al desarrollo de sistemas más sencillos y, al mismo tiempo, más completos que los utilizados hasta el momento. Aportan, además, una nueva concepción de la simulación ambiental, al considerar el medio simulado como un sistema dinámico en el que tienen lugar continuas transformaciones, con formación de nuevos productos y disminución de la concentración de otros.

Un sistema diseñado para abordar el estudio de las alteraciones que la atmósfera provoca en los materiales, debe ser, necesariamente, muy versátil; la influencia de los distintos parámetros no puede ser valorada a priori y mucho menos despreciada y, además, no basta con la consideración por separado de las distintas variables sino que es preciso tener en cuenta posibles efectos sinérgicos. Los contaminantes secundarios deben ser considerados asimismo, y no sólo aquellos que puedan ejercer una acción directa sobre el material, sino también los que actúan como compuestos intermedios en la transformación de otros, esencialmente radicales libres cuya dosificación a la atmósfera simulada supondría considerables problemas y que, por lo tanto, es preferible generar simulando también los mecanismos de transformación en la cámara de exposición.

Estas directrices, que han guiado la construcción del sistema de simulación ambiental propuesto, son, en general, válidas para cualquier sistema con el que se pretenda abordar un estudio completo de los mecanismos de alteración. Sólo después de este estudio se podrán suprimir o fijar determinados parámetros con el fin de conseguir ensayos repetitivos y al mismo tiempo fiables, que podrán efectuarse en este mismo sistema o bien en otro más simplificado si el número de ensayos a realizar justifica su construcción.

Evidentemente, el sistema desarrollado en nuestro Departamento, es una solución particular a los diferentes problemas que plantea el diseño de una instalación de este tipo; sus logros y aplicaciones han sido ya comentados a raíz de una serie de experiencias y estudios previos que han permitido establecer los mismos. Tan importante como el propio sistema, es la metodología seguida para abordar el diseño de las distintas secciones que lo integran y para evaluar su respuesta. Como principal consecuencia de lo expuesto, se puede considerar que el sistema de simulación propuesto es una instalación sencilla y versátil al mismo tiempo, con un amplio

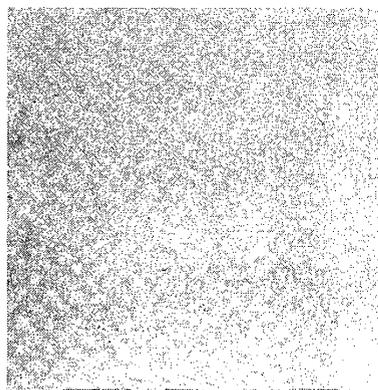
campo de aplicaciones y que, en nuestra opinión, futuras experiencias podrán modificar aspectos particulares del diseño o suponer una mayor sofisticación, por ejemplo introduciendo el análisis automático de las condiciones de operación, pero no afectarán a la concepción básica del mismo.

BIBLIOGRAFIA

- (1) VALE, J.; MARTIN, A.: Ensayos de materiales en atmósferas simuladas. I. Criterios para el diseño de sistemas de simulación.
- (2) VALE, J.; CORTES, V.; MARTIN, A.: Ensayos de materiales en atmósferas simuladas. II. Diseño de un sistema de simulación.
- (3) CORTES, V.: Efecto de los fluoruros procedentes de la contaminación atmosférica sobre los materiales pétreos empleados en la construcción de obras arquitectónicas monumentales. Tesis Doctoral. E. S. Ing. Industriales, Univ. Sevilla, 1978.
- (4) HILL, A. C. et al.: Facilities and techniques for maintaining a controlled fluoride environment in vegetation studies. J. Air Poll. Contr. Assoc., 9 (1959), 22-27.
- (5) PACK, M. R. et al.: Determination of gaseous and particulate inorganic fluorides in the atmosphere. ASTM Spec. Techn. Publ. 281, 1958, 27-44.
- (6) BROSHEER, J. C. et al.: Vapor pressure of hydrofluoric acid solutions. Ind. Eng. Chem., 39 (1947), 423-427.
- (7) LEED, J. M.; SUCH, T. E.: Industrial atmosphere test for contacts and connectors: Some design parameters. Trans. Inst. Metal Finish, 49 (1971), 131-140.
- (8) ALTSHULLER, A. P.; BUFALINI, J. J.: Photochemical aspects of air pollution: A review. Env. Sci. Technol., 5 (1971), 39-64.
- (9) GELINAS, R. J.; SKEWES-COX, P. D.: Tropospheric photochemical mechanisms. J. Phys. Chem., 81 (1977), 2.468-2.479.
- (10) BOULAUD, D.: Contribution à l'étude des réactions en phase gazeuse de l'anhydride sulfureux. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 1977.
- (11) WILSON, W. E. et al.: A study of SO₂ in photochemical smog. II. Effect of SO₂ on oxidant formation in photochemical smog. J. Air Poll. Contr. Assoc., 22 (1972), 27-32.
- (12) SILVER, S. D.: Constant flow gasing chambers. Principles influencing design and operation. J. Lab. Clin. Med., 31 (1946), 1.153-1.161.

* * *

publicación del i.e.t.c.c.



**código modelo ceb-fip
para las estructuras de hormigón**

El Instituto Eduardo Torroja, miembro activo tanto del Comité Eurointernacional del Hormigón (CEB), como de la Federación Internacional del Pretensado (FIP), ha tomado a su cargo la traducción y edición de esta importante normativa.

Aunque presentado con el título de «Código Modelo CEB/FIP 1978» este documento incorpora los dos primeros volúmenes de este «Sistema Unificado Internacional de Reglamentación Técnica de Ingeniería Civil». El primer volumen de este «Sistema Unificado» es el denominado «Reglas comunes Unificadas para los diferentes tipos de obras y materiales», donde se exponen los criterios y formatos de seguridad a que han de ajustarse los diferentes Códigos (estructuras de hormigón, estructuras metálicas, estructuras mixtas, estructuras de albañilería y estructuras de madera), que han de configurar la totalidad del antedicho sistema.

El segundo volumen es propiamente el Código Modelo para las Estructuras de Hormigón. Fruto de la colaboración de dos asociaciones del prestigio del CEB y la FIP, desde mediados de los 60, incorpora los avances científicos y tecnológicos producidos en los últimos años sin detrimento alguno de la claridad y operatividad que deben presidir un código que pretende ser, ante todo, un auxiliar práctico para los técnicos de la construcción.

El Código sigue en su estructura las reglas más o menos clásicas: una primera parte dedicada a los datos generales para el cálculo (propiedades de los materiales, datos relativos al pretensado, tolerancias); en segundo lugar se presentan las reglas de proyecto estructural (acciones, sollicitaciones, estados límites últimos y de utilización, reglas de detalle para el armado); y, por último, ejecución, mantenimiento y control de calidad.

También incluye reglas para estructuras con elementos prefabricados y estructuras de hormigón con áridos ligeros. Los Anejos del Código se refieren a: terminología, proyecto mediante la experimentación, resistencia al fuego, tecnología del hormigón, comportamiento en el tiempo del hormigón y fatiga.

Un volumen encuadernado en cartóné, de 21 x 30 cm, compuesto de 340 páginas, Madrid, mayo 1982.

Precios España 2.500 ptas. Extranjero 50 \$USA