



AIDICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE LA CONSTRUCCIÓN

Avda. Benjamín Franklin, 17
46980 - Paterna – Valencia
+34 96 131 82 78
+34 96 131 80 33

INFORME DE RESULTADOS IT11/0101

INFORME DE RESULTADOS IT11/0101

Descripción:

Determinación de la actividad de degradación de óxidos de nitrógeno en aire mediante fotocatalisis.

Normativa de referencia:

ISO 22197-1:2007 - Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials. Part 1: Removal of nitric oxide.

Peticionario:

PREFABRICADOS RODA, S.L.
Puerta de Cuenca, 51
02630 La Roda (Albacete)
Tel. 630926255

 **AIDICO**
Registro de Salida
PATERNA

Fecha 07 NOV. 2011
N.º 48679



CONTENIDO

1. Identificación de la muestra ensayada	3
2. Objeto y campo de aplicación	3
3. Normativa	3
4. Preparación de las muestras.....	5
5. Equipos empleados	5
6. Resultados.....	15

1. Identificación de la muestra ensayada

Tabla 1.- Identificación de la muestra ensayada.

Albarán	Identificación según peticionario	Dimensiones, mm	Nº piezas
61482	Muestra G. Acabado: Textura lisa. Cemento gris. Color pizarra Fecha de fabricación: 09/09/2011	100x50x10	2

El muestreo fue realizado por la empresa peticionaria.

2. Objeto y campo de aplicación

Esta parte de la norma ISO 22197 especifica un método para la determinación de la actividad descontaminante de materiales que contienen un fotocatalizador o que presentan una capa descontaminante en la superficie, normalmente preparada a partir de óxidos de metales semiconductores como el dióxido de titanio, mediante la exposición continua de una muestra a un gas contaminante modelo (óxido nítrico) bajo radiación ultravioleta. Esta parte de la ISO 22197 pretende ser utilizada con diferentes tipos de materiales, como pueden ser los materiales de construcción.

3. Normativa

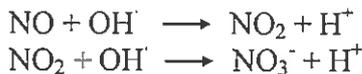
El procedimiento experimental seguido ha sido el correspondiente a la Norma “ISO 22197-1:2007 - Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials. Part 1: Removal of nitric oxide”. Debido a cuestiones operativas, algunos aspectos del procedimiento experimental y, por tanto, de los cálculos realizados, han sido tomados de la norma italiana “UNI 11247 – Determinazione dell’attività di degradazione di ossidi di azoto in aria de parte di materiali inorganici fotocatalitici”.

Principio

El método se basa en la medida de la actividad descontaminante de materiales cerámicos y de base cemento, mediante la degradación fotocatalítica de óxido nítrico (NO) mediante una metodología analítica basada en la quimioluminiscencia. Las pruebas de fotoactividad se llevan a cabo con aire que contiene NO. La cantidad de NO alimentado se fija en el valor de 1 ± 0.05 ppm (1000 ± 50 ppb). La degradación de NO se lleva a cabo sobre un flujo continuo del gas así obtenido, por parte de la muestra ensayada, al ser irradiada con luz ultravioleta.



La degradación de los NO_x, también conocida como proceso DeNO_x, proporciona un modelo adecuado para establecer la capacidad de una superficie fotocatalítica para la purificación del aire. El proceso DeNO_x puede ser descrito, de forma aproximada, como una reacción en dos etapas que tiene lugar en la superficie del fotocatalizador:



Donde los radicales libres hidroxilo (OH[·]) son originados en la superficie del TiO₂ - anatasa en presencia de agua por la acción de la luz ultravioleta. Estos radicales OH[·] tienen un gran poder oxidante y, consecuentemente, oxidan el NO a NO₂ en una primera etapa. El NO₂ formado es posteriormente oxidado a ion nitrato (NO₃⁻), el cual puede unirse a álcalis disueltas en la matriz cementante o, más probablemente, pueden ser eliminados de la superficie del hormigón como ácido nítrico débil. El análisis cuantitativo de los productos de reacción, considerando la concentración inicial de contaminante, permite la evaluación de la capacidad descontaminante de la muestra a estudiar.

Desviaciones respecto a la norma:

Se han añadido el cálculo de la conversión de NO y NO_x según se indica en la norma italiana “UNI 11247 – Determinazione dell’attività di degradazione di ossidi di azoto in aria de parte di materiali inorganici fotocatalitici”.

Desviaciones respecto a la norma ISO 22197-1:

- El tipo de luz empleada ha sido la proporcionada por una lámpara OSRAM Vitalux de 300W.
- Para medir la irradiancia en el UV-A se ha empleado un radiómetro que mide en el rango 315 – 400 nm en lugar de los 300 – 400 nm que estipula la norma. Además de medir a un caudal total de 3 L/m, se han llevado a cabo otras dos medidas de la actividad fotocatalítica, a 2 y a 1 L/min respectivamente.
- Al finalizar el experimento (apagado de la luz UV) el caudal de gas vuelve a la concentración inicial, en lugar de cerrar la alimentación de NO. Con esto nos aseguramos de que la concentración de entrada de NO es la misma antes y después de iniciar la irradiación de la muestra.
- Por tanto, no se ha calculado la cantidad de NO_x desorbida, ya que no se cierra la alimentación de NO_x al finalizar la medida, ni los moles de nitrógeno eluidos de la muestra.



4. Preparación de las muestras

Preparación de las muestras:

Las muestras tienen unas medidas de $(10 \pm 0.3) \times (5 \pm 0.3) \times (1 \pm 0.2) \text{ cm}^3$. Han sido tomadas a partir de las muestras proporcionadas por el fabricante, de manera que quede expuesta la cara que contiene el recubrimiento a ensayar (Figura 1). Una vez cortadas las muestras, se han lavado con agua desionizada y secado durante 24h en estufa a 60°C .



Figura 1.- Muestras preparadas para la medida de la actividad fotocatalítica.

5. Equipos empleados

El equipo experimental, que debe proporcionar un caudal estable de gas contaminante y la fotoirradiación necesaria para activar el fotocatalizador, está formado por los siguientes componentes (Figura 2):

- 1) Compresor, fuente de aire.
- 2) Sistema de purificación y secado del aire comprimido.
- 3) Bala de NO en nitrógeno. Valor certificado de 100 ppmv con incertidumbre de medida de $\pm 5\%$.
- 4) Controladores de flujo másico Bronkhorst F211-CV. Se puede controlar la concentración de NO_x (NO y/o NO_2), aire seco y aire húmedo.
- 5) Caudal de aire para el control de humedad.
- 6) Humidificador del caudal de aire indicado en el punto anterior. La humedad relativa se mantiene constante e igual al $50 \pm 10 \%$ y es monitorizada mediante un termohigrómetro HOB0 U23 002.
- 7) Caudal de NO y aire.
- 8) Caudalímetro, verificación del caudal total.
- 9) Muestra.
- 10) Reactor.
- 11) Fuente de luz.

- 12) By-pass.
- 13) Detector de NO_x (NO y NO₂) mediante quimioluminiscencia.
- 14) Bomba.
- 15) PC.
- 16) Borboteador que contiene una disolución saturada de NaOH, para capturar los óxidos de nitrógeno antes de su salida a la atmósfera.
- 17) Salida de gases.

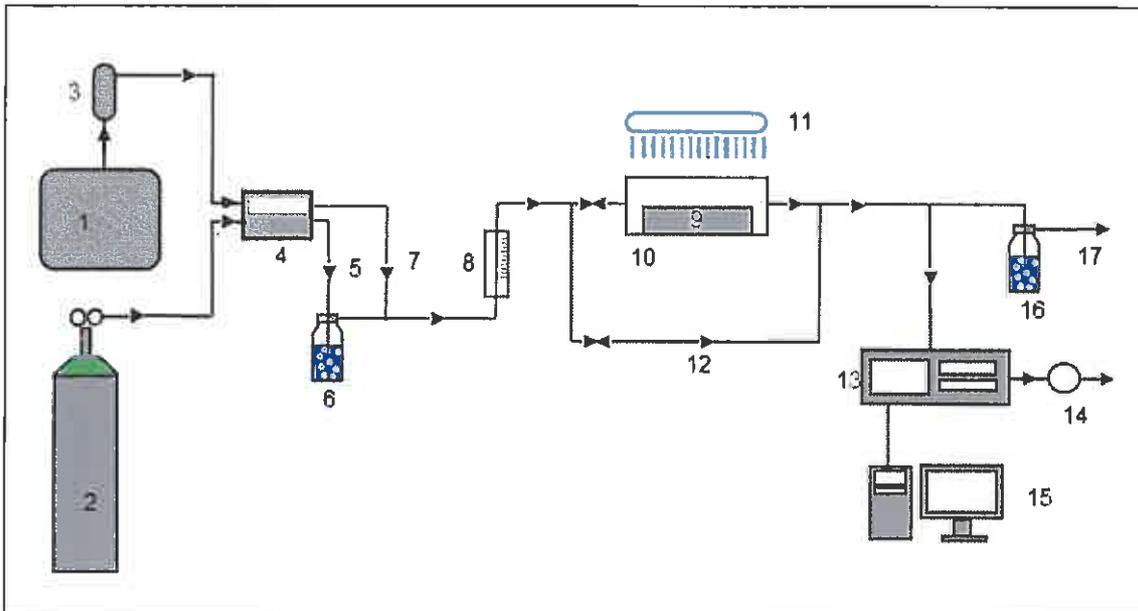


Figura 2. Equipo experimental.

Características del reactor

El reactor (Figura 3), de acero inoxidable, contiene una muestra de 50 mm de ancho, con la superficie paralela a la ventana óptica de irradiación, de cuarzo borosilicatado. La muestra se encuentra separada de la ventana por una distancia de 5 mm, de manera que el gas pasa únicamente a través del espacio comprendido por la superficie de la muestra y la ventana.

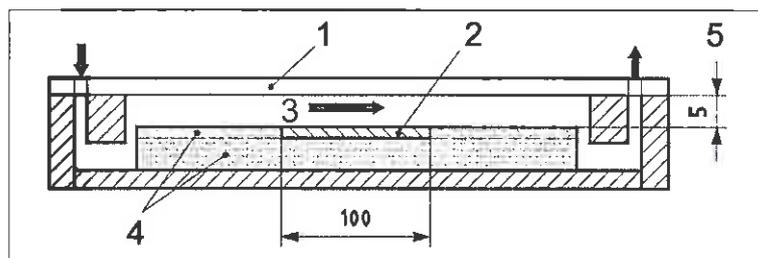


Figura 3. Sección del reactor. Distancias en milímetros. 1) Ventana óptica, 2) muestra, 3) flujo de gas, 4) ajuste del compartimento para la muestra, 5) anchura del caudal de gas.



La temperatura del caudal de gas se mantiene constante en 25 ± 2 °C, medida con el termohigrómetro mencionado anteriormente, modelo HOBO U23 002.



Figura 4.- Izquierda, lámpara OSRAM Vitalux y fotoreactor. Derecha, detalle del fotoreactor.

Características de la lámpara

La fuente de iluminación consiste en una lámpara Osram Vitalux, con una potencia de 300 W y emisión de luz en el rango del ultravioleta, visible e infrarrojo (Figura 4).

La distancia de la lámpara a la superficie del reactor se regula de tal forma que el flujo radiante integrado entre 315 y 400 nm es de 10 ± 1 W/m². Este valor ha sido medido con un radiómetro Delta Ohm HD2102.1, colocado detrás del vidrio de la ventana del reactor, a la misma distancia de la fuente de luz que la superficie de la muestra a ensayar.



Analizador de NO_x (NO/NO₂)

La medida de la concentración de NO y NO₂ se lleva a cabo por quimioluminiscencia, mediante el empleo de un analizador de óxidos de nitrógeno modelo SIRSA S-5012 colocado a la salida del reactor. Este analizador mide simultáneamente la concentración de ambos gases.



Figura 5.- Imagen del mezclador de gases que contiene los controladores de flujo másico y del detector de óxidos de nitrógeno.

Símbolos y unidades

C_{in}	Concentración de NO, NO ₂ o NO _x a la entrada del reactor (ppbv ¹).
C_{out}	Concentración de NO, NO ₂ o NO _x a la salida del reactor (ppbv).
t	Tiempo (s o min).
T	T (°C o K).
X	Conversión (%).
S	Superficie (cm ² o m ²)
I	Irradiancia (W/m ² o mW/cm ²)
V	Volumen (L)
P	Potencia (W)
Q	Caudal (L/min)
n	Moles
ζ	Eficiencia fotónica (%)

¹ 1 ppbv = 1 ppb = 10⁻³ ppm = 10⁻³ μL/L.



Procedimiento de medida de la degradación fotocatalítica del NO

El flujo del gas, así como la concentración de NO y humedad relativa se mantienen constantes en la cámara de reacción, y dentro del rango estipulado por la norma a lo largo de todo el ensayo. La temperatura y la humedad relativa del gas se miden a la salida del reactor. En cada ensayo se han realizado las siguientes medidas:

- La concentración inicial de NO, NO₂ y NO_x (NO + NO₂) antes de entrar en el reactor (C₀), es decir, sin pasar por él.
- La concentración a la salida del reactor en la oscuridad (C_{in}).
- La concentración a la salida del reactor bajo iluminación (C_{out}).

El procedimiento llevado a cabo en cada medida es el siguiente. Se ha llevado a cabo una medida al caudal total indicado en la norma (3 L/m) y a otros dos caudales totales, 2 y 1 L/m respectivamente, siempre para una concentración nominal de NO de 1 ppm:

- Se enciende la lámpara y se ajusta a la irradiancia deseada ($10 \pm 1 \text{ W/m}^2$).
- Se enciende el detector de NO_x y la bomba.
- Se ajustan los flujos de NO, aire seco y aire húmedo para obtener, para cada caudal, una concentración de NO igual a $1000 \pm 50 \text{ ppbv}$ y una humedad relativa del $50 \pm 10 \%$ a $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Se coloca la muestra en el reactor y se cierra el mismo, asegurándose que se encuentra convenientemente sellado para evitar fugas.
- Se inicia el ensayo con el by-pass abierto ($t_0 = 0$). A los 2 minutos se cierra el by-pass para permitir el paso del gas por el reactor, durante 3 minutos. A los 5 minutos del inicio del ensayo (t_1) se irradia la muestra durante 60 minutos (t_2). El valor inicial de la concentración de cada gas (C_{in}) se calcula tomando la lectura obtenida inmediatamente antes de iniciar la irradiación.
- Transcurrido ese tiempo, se vuelve a proteger el reactor de la luz, con lo que la concentración de NO vuelve al valor inicial.

En la Figura 6 se puede observar un ejemplo de la curva típica que se obtiene mediante el presente ensayo.

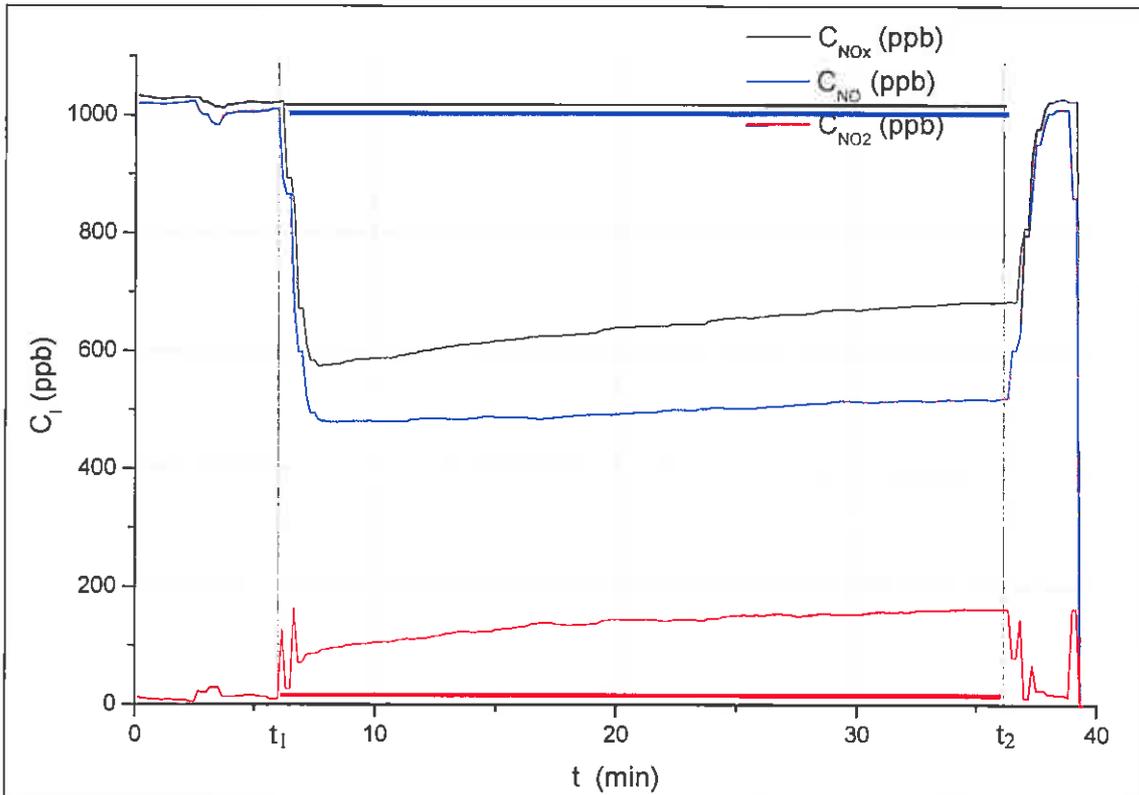


Figura 6.- Curva típica del valor de NO, NO₂ y NO_x a lo largo del procedimiento experimental. Las líneas horizontales se corresponden con el valor calculado inicial para cada gas.

Expresión de los resultados

a) *Cálculo de la conversión de NO, NO₂ y NO_x*

La conversión X de cada gas alimentado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$X(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde

$$C_{in} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C(t_1) \cdot dt}{t_2 - t_1} = C(t_1) \quad (2) \quad \text{y} \quad C_{out} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot dt}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

El valor de la conversión puede ser corregido teniendo en cuenta la superficie expuesta de la probeta y la irradiancia experimentales (S' , I'), frente a los valores ideales ($S = 50 \text{ cm}^2$ e $I = 10 \text{ W/m}^2$, respectivamente):

$$X_{corr}(\%) = X \cdot \frac{S}{S'} \cdot \frac{I}{I'} \quad (4)$$

b) Cálculo de la eficiencia fotónica

Definamos el flujo fotónico como el cociente de la potencia total ($P = I \cdot S$) y la energía de 1 mol de fotones ($E = \frac{N_a \cdot h \cdot c}{\lambda}$), así:

$$\phi_{fotónico} = \frac{I \cdot S \cdot \lambda}{N_a \cdot h \cdot c} \quad (5)$$

Donde:

$\phi_{fotónico}$ es el flujo fotónico (mol de fotones/s)

I es la intensidad de la iluminación UV-A empleada, (mW/cm²)

S es el área de muestra iluminada (cm²)

λ es la longitud de onda media de la iluminación (m)

Reemplazando las constantes:

$$\lambda = 350 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$N_a = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tenemos:

$$\phi_{fotónico} = 2.925 \cdot 10^{-9} \cdot I \cdot S \quad (6)$$

Por otra parte, el gas circula a un caudal de Q L/min, y 1 mol ocupa, idealmente, un volumen $V = \frac{RT}{p} = 0.082 \frac{T}{p}$, donde T es la temperatura en Kelvin y p , la presión en atmósferas. Si trabajamos en unidades de presión de mmHg y de temperatura de °C, la expresión anterior se puede escribir como sigue:

$$V = 0.082 \frac{T + 273}{p / 760} = \frac{62.32 \cdot (T + 273)}{p} \quad (7)$$

Por tanto, el gas tarda V/Q minutos en recorrer el volumen iluminado del reactor. Si la concentración de NO en el gas es de $C_{NO,in}$ ppm = $C_{NO,in} \cdot 1000$ ppb, en V/Q minutos pasan $C_{NO,in} \cdot 10^{-9}$ moles de NO. En ese tiempo, la muestra es iluminada con:



$$\begin{aligned} n_{\text{fotones}} &= 2.925 \cdot 10^9 \cdot I \cdot S \text{ (moles de fotones/s)} \cdot 60 \text{ (s/min)} \cdot \frac{V}{Q} \text{ min} = \\ &= 2.925 \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot I \cdot S \cdot \frac{62.32 \cdot (T + 273)}{pQ} = \\ &= 1.09 \cdot 10^5 \frac{I \cdot S \cdot (T + 273)}{p \cdot Q} \text{ moles de fotones} \end{aligned}$$

La eficiencia fotónica (ξ) máxima que se puede observar se daría cuando todo el NO alimentado fuera degradado por la muestra, es decir, cuando $C_{NO, out} = C_{NO, in}$. Si definimos la eficiencia fotónica como el cociente de los moles de NO eliminados entre los moles de fotones incidentes, tenemos que:

$$\xi_{\max} = \frac{\text{moles de NO eliminados}}{\text{moles de fotones incidentes}} \cdot 100 = \frac{C_{NO, in} \cdot 10^7}{1.09 \cdot 10^5 \cdot \frac{I \cdot S \cdot (T + 273)}{p \cdot Q}};$$

$$\xi_{\max} = 9.143 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{C_{NO, in} \cdot p \cdot Q}{I \cdot S \cdot (T + 273)} \quad (8)$$

$$\text{Donde } C_{NO, in} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C_{NO, in}(t) \cdot dt}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

Finalmente, la eficiencia fotónica observada se puede escribir como:

$$\xi = C_{NO, degradado} \text{ (ppm)} \cdot \xi_{\max} \text{ (\% / ppm)} = \frac{C_{NO, degradado}}{1000 \text{ (ppb / ppm)}} \text{ (ppb)} \cdot \xi_{\max} \text{ (\% / ppm)} \quad (10)$$

$$\xi \text{ (\%)} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C_{NO, in}(t) \cdot dt - \int_{t_1}^{t_2} C_{NO, out}(t) \cdot dt}{1000 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \xi_{\max} \quad (11)$$

Donde

ξ_{\max} es la eficiencia fotónica máxima, (% mol NO/mol de fotones).

$C_{NO, in}$ es la concentración de entrada de NO, (ppb).

$C_{NO, out}$ es la concentración de salida del NO, durante la reacción fotocatalítica (ppb)

I es la intensidad de la iluminación UV-A empleada, (mW/cm²).

S es el área de muestra iluminada (cm²).

Q es el caudal total en L/min.

p es la presión en mmHg.

T es la temperatura en °C.

c) Cálculo de la cantidad de NO_x adsorbida por la muestra

La cantidad de óxidos de nitrógeno ($NO + NO_2$) adsorbida por la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$n_{ads} = \left(\frac{Q \cdot (p / 760)}{R \cdot (T + 273)} \right) \cdot \left[\int_0^{t_1} (C_{NO,m} - C_{NO}) \cdot dt - \int_0^{t_1} C_{NO_2} \cdot dt \right] \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Donde

n_{ads} es la cantidad, en μ moles, de NO_x adsorbidos por la muestra.

Q es el caudal total de gas, en L/min.

p es la presión atmosférica, en mmHg.

T es la temperatura, en °C.

$C_{NO,m}$ es la concentración alimentada de NO, es decir, $C_{NO}(t_0)$, en ppb.

C_{NO} es la concentración de NO a la salida del reactor, en ppb.

C_{NO_2} es la concentración de NO_2 a la salida del reactor, en ppb.

Los límites de integración han sido tomados en el tiempo, en minutos, en que el gas puede ser adsorbido por la muestra, es decir, entre t_0 (0) y t_1 (alrededor de 2 minutos).

d) Cálculo de la cantidad de NO eliminado por la muestra

La cantidad de óxido nítrico eliminado por la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$n_{ads} = \left(\frac{Q \cdot (p / 760)}{R \cdot (T + 273)} \right) \cdot \left[\int_{t_1}^{t_2} (C_{NO,m} - C_{NO}) \cdot dt \right] \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

Donde n_{NO} es la cantidad de NO eliminada por la muestra, en μ moles. El resto de símbolos está definido en c). Los límites de integración se corresponden al período de tiempo, en minutos, en el que la muestra es iluminada.

e) Cálculo de la cantidad de NO_2 formado por la muestra

La cantidad de dióxido de nitrógeno formado durante el proceso por la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$n_{ads} = \left(\frac{Q \cdot (p / 760)}{R \cdot (T + 273)} \right) \cdot \left[\int_{t_1}^{t_2} (C_{NO_2}) \cdot dt \right] \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

Donde n_{NO_2} es la cantidad de NO_2 formado por la muestra, en μ moles. El resto de símbolos está definido en *c*). Los límites de integración se corresponden al período de tiempo, en minutos, en el que la muestra es iluminada.

f) Cálculo de la cantidad neta de NO_x eliminado por la muestra

La cantidad neta de óxidos de nitrógeno eliminada durante el proceso por la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$n_{NO_x} = n_{ads} + n_{NO} - n_{NO_2} \quad (15)$$

Donde n_{NO_x} es la cantidad de NO_x total eliminado por la muestra, en μ moles. El resto de símbolos está definido en *c*). Los límites de integración se corresponden al período de tiempo, en minutos, en el que la muestra es iluminada.

6. Resultados

6.1. Caudal $Q = 3\text{L/min}$

Los datos referentes a la muestra y a las condiciones del ensayo se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 2.- Condiciones del ensayo, $Q = 3\text{ L/min}$.

Área (cm ²):	47	p (Torr)	761.2
Q (L/min):	3	T (°C)	23.98
I (mW/cm ²)	1	%HR	49.15

El resultado del ensayo para este caudal de entrada se puede observar en la Figura 7.

Para realizar los cálculos indicados en el apartado anterior, se ha procedido inicialmente al cálculo del área bajo la curva de las concentraciones de cada gas, es decir, el valor de las integrales entre t_0 y t_1 y entre t_1 y t_2 (Tabla 3). Los valores correspondientes al NO_2 han sido obtenidos por diferencia entre el valor de NO_x total y el de NO , ya que son estos los parámetros medidos por el detector.

Tabla 3.- Integrales calculadas.

Límites (min)	NO_{in}	NO	$\text{NO}_{2\ in}$	NO_2	$\text{NO}_{x\ in}$	NO_x
0 - 5.67 (35)	5735.55	5701.00	85.58	48.04	5821.13	5749.04
5.67 - 65.67 (393)	60620.40	55496.36	489.60	1557.73	61110.00	57054.09

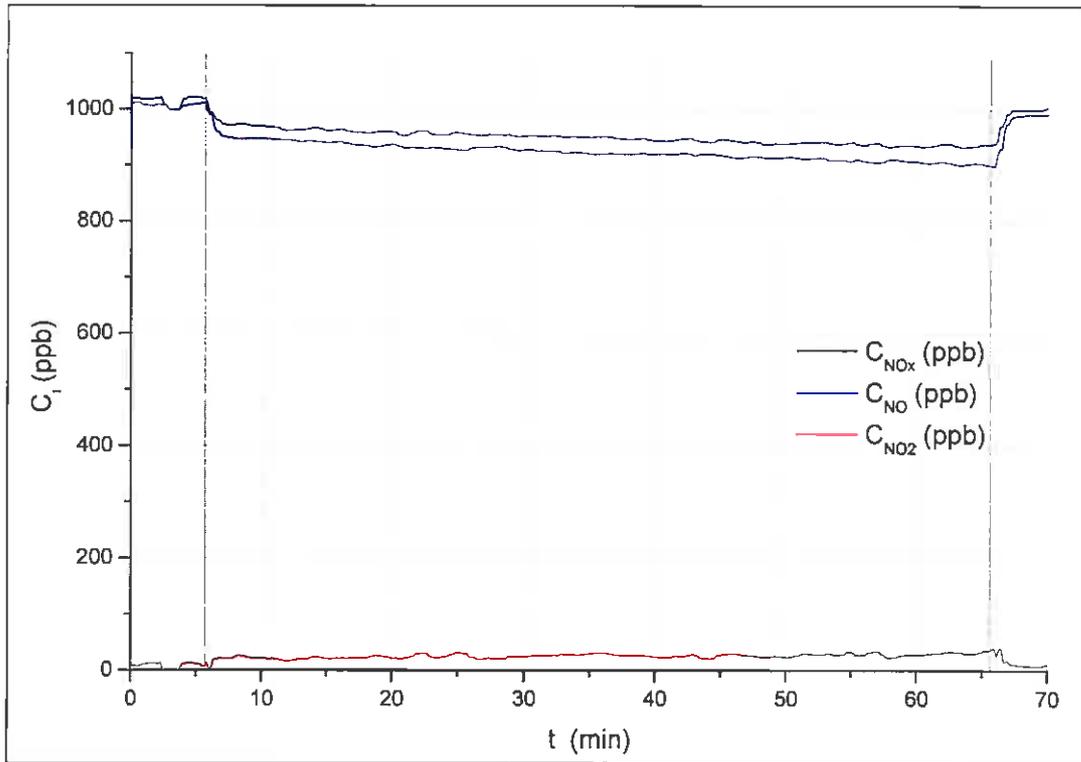


Figura 7.- Degradación de óxidos de nitrógeno para un caudal de 3 L/min.

Los resultados obtenidos se han resumido en la tabla siguiente:

Tabla 4.- Resultados obtenidos para un caudal de 3 L/min.

	NO	NO ₂	NO _x
X (%)	8.45	-218.16	6.64
X (%) _{corr}	9.08	-234.28	7.13
ξ (%) _{max}	1.53	0.01	1.44
ξ (%)	0.13	0.00	0.10
ξ (%) / ξ (%) _{max}	0.09	-0.02	0.07

Es decir, la conversión del NO, teniendo en cuenta la superficie real expuesta y la irradiancia en el ultravioleta empleada, ha sido del 9.08%. Teniendo en cuenta que parte del NO permanece en el sistema en forma de NO₂, ya que éste es un intermedio de la reacción, el resultado negativo de la conversión del NO₂ ha de entenderse como “NO₂ generado” durante el proceso. La degradación de los NO_x totales tiene en cuenta tanto el NO eliminado como el NO₂ formado. En este caso, la conversión de NO_x corregida ha sido del 7.13 %.

A continuación se presentan los cálculos indicados en la norma ISO 22197-1:

Tabla 5.- Cantidades de NO y NO_x eliminados y de NO₂ formado.

n_{ads}	-0.002	μmol	$n_{ads, corr}$	$-3.58 \cdot 10^{-5}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	$V_{ads, corr}$	-0.09	$\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
n_{NO}	0.6	μmol	$n_{NO, corr}$	$1.36 \cdot 10^{-2}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	$V_{NO, corr}$	33.02	$\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
n_{NO_2}	0.2	μmol	$n_{NO_2, corr}$	$4.13 \cdot 10^{-3}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	$V_{NO_2, corr}$	10.04	$\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
n_{NO_x}	0.44	μmol	$n_{NO_x, corr}$	$9.42 \cdot 10^{-3}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	$V_{NO_x, corr}$	22.89	$\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

En la tabla anterior, se ha resaltado en negrita los valores correspondientes a la eliminación total de NO_x, y, en rojo, al volumen de NO_x degradado por la muestra, por unidad de superficie (m²) y de tiempo (hora). En este caso, para un caudal de 3 L/min, un m² de muestra es capaz de degradar unos 23 μL por hora de irradiación a una intensidad, en el rango del UV-A, de 10 W/m².

6.2. Caudal $Q = 2 \text{ L/min}$

Los datos referentes a la muestra y a las condiciones del ensayo se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 6.- Condiciones del ensayo, $Q = 2 \text{ L/min}$.

Área (cm^2):	47	p (Torr)	761.9
Q (L/min):	2	T ($^{\circ}\text{C}$)	26.085
I (mW/cm^2)	1	%HR	51.18

Los valores de las integrales calculadas se exponen a continuación:

Tabla 7.- Integrales calculadas.

Límites (min)	NO_{in}	NO	$\text{NO}_{2 \text{ in}}$	NO_2	$\text{NO}_{\text{x in}}$	NO_{x}
0 - 5.67 (35)	5785.50	5600.18	-43.09	74.59	5742.41	5674.77
5.67 - 65.67 (393)	58691.40	50847.91	1325.40	2616.89	60016.80	53464.80

En la figura siguiente se puede observar el resultado obtenido.

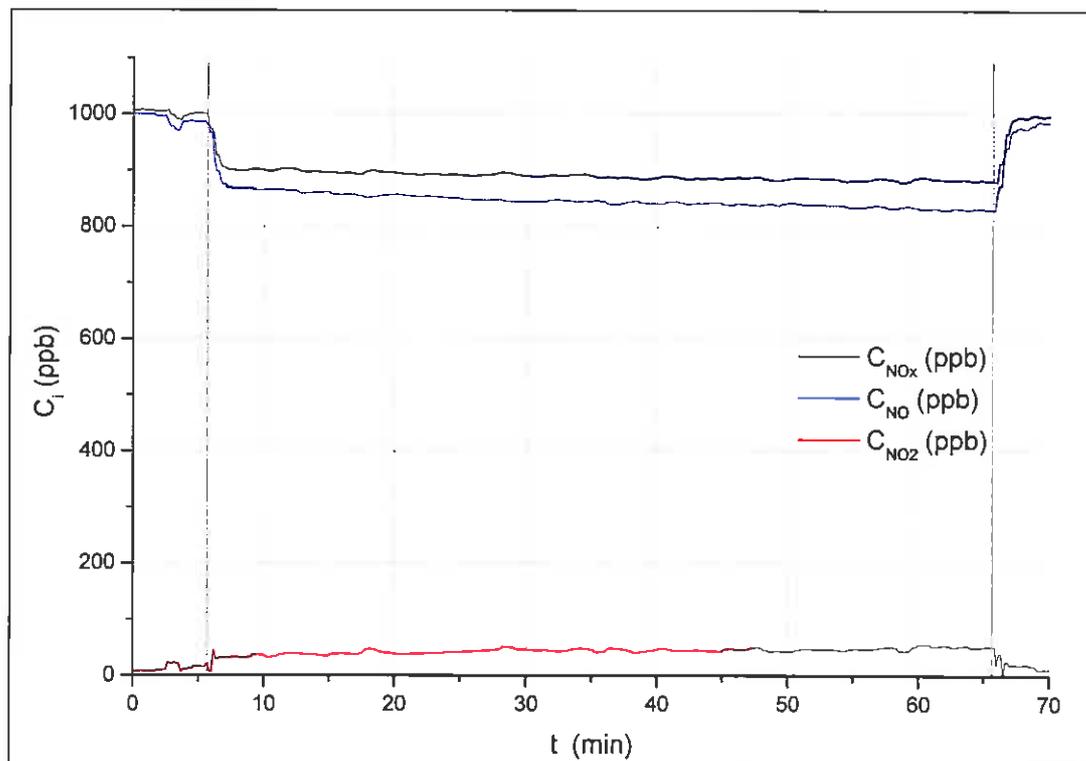


Figura 8.- Degradación de óxidos de nitrógeno para un caudal de 3 L/min.

Por último, en la tabla siguiente se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 8.- Resultados obtenidos para un caudal de 2 L/min.

	NO	NO ₂	NO _x
X (%)	13.36	-97.44	10.92
X (%) _{corr}	14.35	-104.64	11.72
ξ (%) _{max}	0.98	0.02	0.89
ξ (%)	0.13	0.00	0.10
ξ (%) / ξ (%) _{max}	0.13	-0.02	0.11

La conversión del NO corregida ha sido, para un caudal de 2 L/min, del 14.35%, y para los óxidos de nitrógeno totales (NO_x), del 11.72%. La relación entre la eficiencia fotónica y la eficiencia fotónica máxima también ha aumentado.

A continuación se presentan los cálculos indicados en la norma ISO 22197-1:

Tabla 9.- Cantidades de NO y NO_x eliminados y de NO₂ formado.

n _{ads}	0.01 μmol	n _{ads, corr}	1.94·10 ⁻⁴ μmol·cm ⁻²	V _{ads, corr}	0.48 μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NO}	0.6 μmol	n _{NO, corr}	1.38·10 ⁻² μmol·cm ⁻²	V _{NO, corr}	33.69 μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NO2}	0.2 μmol	n _{NO2, corr}	4.59·10 ⁻³ μmol·cm ⁻²	V _{NO2, corr}	11.24 μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NOx}	0.44 μmol	n _{NOx, corr}	9.37·10⁻³ μmol·cm⁻²	V_{NOx, corr}	22.93 μL·m⁻²·h⁻¹

En la tabla anterior, se ha resaltado en negrita los valores correspondientes a la eliminación total de NO_x, y, en rojo, al volumen de NO_x degradado por la muestra, por unidad de superficie (m²) y de tiempo (hora). De nuevo, para un caudal de 2 L/min, un m² de muestra es capaz de degradar unos 23 μL por hora de irradiación a una intensidad, en el rango del UV-A, de 10 W/m².



6.3. Caudal $Q = 1 \text{ L/min}$

Los datos referentes a la muestra y a las condiciones del ensayo se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 10.- Condiciones del ensayo, $Q = 2 \text{ L/min}$.

Área (cm^2):	47	p (Torr)	761.9
Q (L/min):	1	T ($^{\circ}\text{C}$)	26.085
I (mW/cm^2)	1	%HR	51.18

Los valores de las integrales calculadas se exponen a continuación:

Tabla 11.- Integrales calculadas.

Límites (min)	NO_{in}	NO	NO_2 in	NO_2	NO_x in	NO_x
0 - 5.67 (35)	5667.68	5557.95	101.07	50.74	5768.74	5608.69
5.67 - 65.67 (393)	58543.20	41698.87	748.20	4095.71	59291.40	45794.58

En la figura siguiente se puede observar el resultado obtenido.

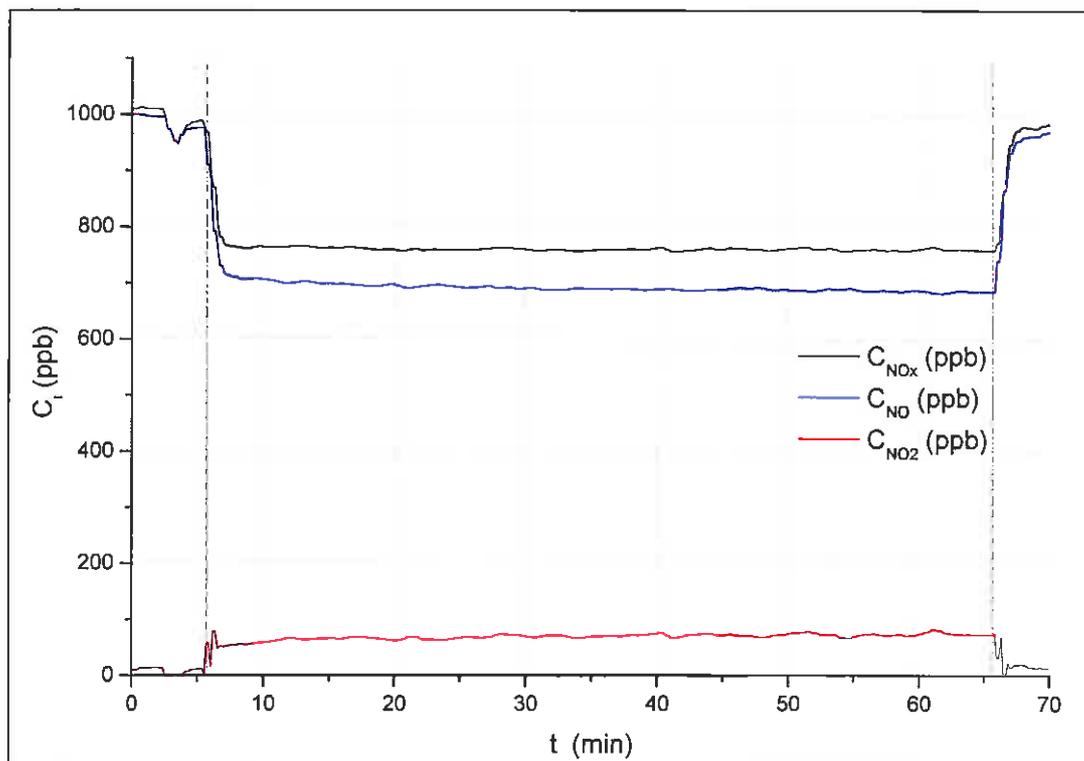


Figura 9.- Degradación de óxidos de nitrógeno para un caudal de 3 L/min.

Por último, en la tabla siguiente se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 12.- Resultados obtenidos para un caudal de 1 L/min.

	NO	NO ₂	NO _x
X (%)	28.77	-447.41	22.76
X (%) _{corr}	30.90	-480.46	24.45
ξ (%) _{max}	0.49	0.01	0.38
ξ (%)	0.14	0.00	0.09
ξ (%) / ξ (%) _{max}	0.28	-0.06	0.22

La conversión del NO corregida ha sido, para un caudal de 1 L/min, del 30.90%, y para los óxidos de nitrógeno totales (NO_x), del 24.45%. La relación entre la eficiencia fotónica y la eficiencia fotónica máxima también ha aumentado.

Tabla 13.- Cantidades de NO y NO_x eliminados y de NO₂ formado.

n _{ads}	0.002	μmol	n _{ads, corr}	5.15·10 ⁻⁵	μmol·cm ⁻²	V _{ads, corr}	0.13	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NO}	0.7	μmol	n _{NO, corr}	1.48·10 ⁻²	μmol·cm ⁻²	V _{NO, corr}	36.18	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NO2}	0.2	μmol	n _{NO2, corr}	3.60·10 ⁻³	μmol·cm ⁻²	V _{NO2, corr}	8.80	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
n _{NOx}	0.52	μmol	n _{NOx, corr}	1.12·10⁻²	μmol·cm ⁻²	V_{NOx, corr}	27.51	μL·m⁻²·h⁻¹

En la tabla anterior, se ha resaltado en negrita los valores correspondientes a la eliminación total de NO_x, y, en rojo, al volumen de NO_x degradado por la muestra, por unidad de superficie (m²) y de tiempo (hora). En este, para un caudal de 1 L/min, un m² de muestra es capaz de degradar unos 27.5 μL por hora de irradiación a una intensidad, en el rango del UV-A, de 10 W/m².



6.4.- Resumen de resultados

En las tablas siguientes se han resumido los resultados más relevantes para los tres caudales de trabajo.

Tabla 14.- Resumen de la conversión y eficiencia fotónica obtenidas para cada caudal de trabajo.

Q(L/min)	NO		NO ₂		NO _x	
	X(%) _{corr}	ξ(%) / ξ(%) _{max}	X(%) _{corr}	ξ(%) / ξ(%) _{max}	X(%) _{corr}	ξ(%) / ξ(%) _{max}
3	9.08	0.09	-234.28	-0.02	7.13	0.07
2	14.35	0.13	-104.64	-0.02	11.72	0.11
1	30.90	0.28	-480.46	-0.06	24.45	0.22

Tabla 15.- Resumen de la cantidad, en volumen por unidad de superficie y de tiempo, de óxidos de nitrógeno eliminados por la muestra.

Q	3	2	1	(L/min)
V _{ads, corr}	-0.09	0.48	0.13	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
V _{NO, corr}	33.02	33.69	36.18	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
V _{NO₂, corr}	10.04	11.24	8.80	μL·m ⁻² ·h ⁻¹
V _{NO_x, corr}	22.89	22.93	27.51	μL·m⁻²·h⁻¹

Por último, se ha incluido en el informe una comparación entre la degradación de NO y formación de NO₂ para cada caudal de trabajo. Esta comparación se puede observar en la Figura 10. Como se ha comentado anteriormente, cuando menor es el caudal y, por tanto, menor es la velocidad de paso del gas por la superficie de la probeta y mayor es el tiempo de contacto del gas con el fotocatalizador, la degradación del NO aumenta, pero también lo hace la formación del NO₂. Esto es debido a que el NO₂ es un producto intermedio de la reacción de degradación del NO. En la misma figura se puede observar de forma conjunta la degradación total de NO_x para los tres caudales de trabajo.

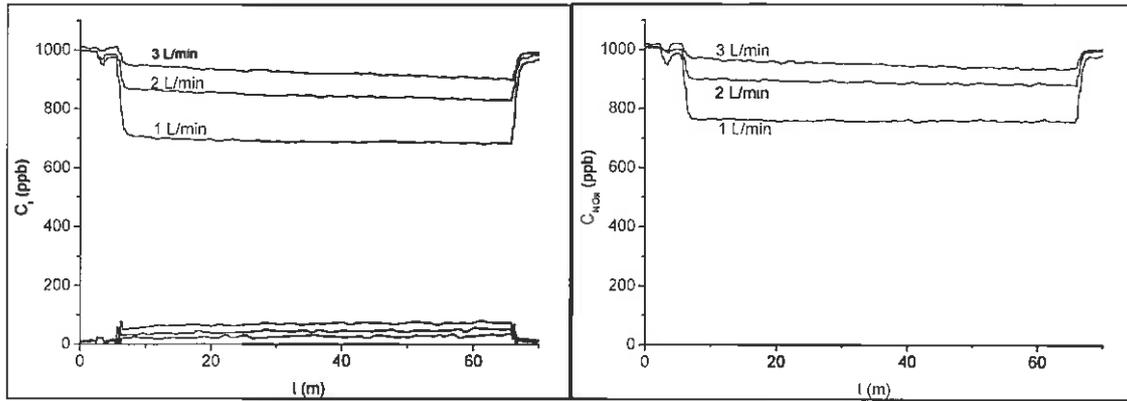


Figura 10.- Izquierda: comparación entre la degradación de NO (las tres series de la parte superior del gráfico) y la formación de NO₂ (las tres series de la parte inferior). Derecha: Comparación entre la diferente degradación de NO_x en función del caudal total.

Paterna, 4 de noviembre de 2011

Técnico Unidad Investigación de
Materiales:

Fdo.: Dr. Jaume Vila Gómez

Director Unidad Investigación de
Materiales:

Fdo.: Dr. Ángel López Buendía