# Caracterización de las propiedades de resistencia a la oxidación y desgaste de recubrimientos de proyección térmica de alta velocidad para la protección de incineradoras de residuos sólidos urbanos<sup>(•)</sup>

J.M. Guilermany\*, M. Torrel\*, S. Dosta\* y J.R. Miguel\*

#### Resumen

En el presente trabajo se muestra la obtención, mediante la proyección térmica de alta velocidad (HVOF), de recubrimientos que presentan buenas prestaciones para la protección contra los procesos de erosión y oxidación que ocurren en el interior de las plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos (IRSU). El artículo presenta la caracterización de recubrimientos HVOF optimizados para esta aplicación, así como un estudio detallado de su comportamiento bajo distintos ensayos de desgaste y corrosión que reproducen estos procesos. A través de la variación del gas combustible y las condiciones de proyección se han obtenido, sobre sustrato de acero al carbono, distintos recubrimientos a partir de un polvo del mismo material base níquel como materia prima. Se demuestra que con la variación de las relaciones de gas y las condiciones de proyección se obtienen pequeñas diferencias de comportamiento a la oxidación y a la erosión, de los recubrimientos. Los recubrimientos obtenidos a través de propileno como gas combustible muestran, con pequeñas diferencias, mejores resistencias a la erosión, mientras que los proyectados con hidrógeno presentan mejor resistencia a la corrosión estática. En ambos casos, los recubrimientos muestran las condiciones suficientes como para proteger un intercambiador de calor en una planta IRSU.

Palabras clave

Recubrimientos; HVOF; Corrosión; Incineración de residuos; Sales cloradas.

## Oxidation and wear behaviour of the high velocity thermal spray coatings for the municipal solid waste incineratior

**Abstract** 

High Velocity Oxy Fuel (HVOF) Thermal Spray Technology produces coatings with high erosion and corrosion resistance. These E-C processes are the most usual problems of municipal solid waste incinerators plants. This work shows the characterisation of the optimal coatings obtained and a further study of their behaviour under wear, erosion, corrosion and E-C tests. These tests reproduce the process that takes place inside this kind of plants. A Ni-based powder alloy was used as a feedstock material for this study. The results show that spraying gas (Hydrogen or Propylene) and different spray parameters give better corrosion or erosion properties. The coatings sprayed by Hydrogen shows better corrosion behaviour. The coatings sprayed by Propylene shows better mechanical and tribological properties. In both cases the Ni based HVOF coatings show good protection behaviour for the exchangers on the MSWI.

Keywords

Coatings; HVOF; Corrosion; Waste incineration; Chlorine salts.

### 1. INTRODUCCIÓN

La incineración es una de las alternativas más utilizadas para la gestión de los residuos sólidos urbanos. La energía generada por este proceso de combustión se transforma en energía eléctrica a través de un sistema de turbina de vapor. Los gases producidos durante los procesos de combustión son aspirados hacia la

zona del intercambiador de calor donde se transfiere la energía del gas de combustión al vapor. Estos gases arrastran las cenizas procedentes del proceso de combustión. El impacto y adhesión de éstas en los tubos del intercambiador son los responsables de los procesos de degradación producidos como consecuencia de los procesos de corrosión y erosión que desatan<sup>[1]</sup>. El estudio detallado de estas cenizas ha

<sup>(·)</sup> Trabajo recibido el día 20 de julio de 2007 y aceptado en su forma final el día 28 de marzo de 2008.

<sup>\*</sup> Centro deProyección Térmica (CPT). Dpt. Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universitat de Barcelona. C/Martí i Franqués, 1. 08028 Barcelona. Teléfono y Fax 00 34 9344021297. www.cptub.com / cpt-cmem@ub.edu.

permitido demostrar que uno de los agentes corrosivos más importantes son las sales cloradas que forman mezclas de bajo punto de fusión. Una de las mezclas encontradas en las cenizas de las incineradoras y recogidas como uno de los agentes corrosivos más agresivos es la mezcla eutéctica de sales cloradas KCl:ZnCl<sub>2</sub> <sup>[2 y 3]</sup>. Los fenómenos de corrosión y erosión que originan estas cenizas obligan a las plantas incineradoras a controlar periódicamente los espesores de los tubos y cambiar aquellos que se encuentren en rangos límites, que puedan llegar a ocasionar situaciones peligrosas y cuantiosas pérdidas.

Mediante procesos de proyección térmica de alta velocidad (HVOF) se pueden obtener recubrimientos con estructuras que presentan baja porosidad, baja oxidación y elevada adherencia, minimizando así los problemas ocasionados por los procesos de degradación que sufren los tubos del intercambiador [4 y 5]. La alternativa de la proyección térmica permite, combinada con nuevas composiciones de superaleaciones, obtener elevadas resistencias a la erosión y corrosión [6 y 7]. Por otra parte, la producción de recubrimientos de pocas décimas de milímetro economiza el proceso, en comparación con técnicas de recargue o extrusión de tubos de superaleación o compuestos [8].

En este trabajo se ha seleccionado un material comercial base níquel que presenta las mejores características para este tipo de aplicación. Para evaluar su comportamiento se ha caracterizado la estructura así como su comportamiento a erosión, corrosión y procesos combinados como los ocurridos en las IRSU <sup>[9]</sup>. Estos ensayos han sido realizados sobre recubrimientos proyectados a través de condiciones optimizadas para dos combustibles distintos (hidrógeno y propileno), partiendo de una misma composición y morfología del polvo utilizado como materia prima.

### 2. MÉTODO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales

El equipo de proyección utilizado en la obtención de los recubrimientos base níquel fue una pistola de polvo DJH 2700 con un montaje Sulzer-Metco que permite utilizar distintos gases combustibles. En este estudio se utilizaron hidrógeno y propileno. Se optimizaron las condiciones de proyección para dos sistemas de gases de combustión. El acero utilizado como sustrato fue el UNS 1055. La composición del material en polvo utilizado como alimentación se muestra en la tabla I.

**Tabla I.** Composición de los materiales de partida

Table I .Composition of the Feedstock material

% w	Ni	Fe	Cr	Мо	Nb	Al	Ti
	Bal.	5	21,2	8,26	1,21	0,13	0,01

### 2.2 Condiciones de proyección

Las condiciones de proyección para ambos casos fueron previamente optimizadas con el objetivo de minimizar la porosidad y la oxidación de los recubrimientos obtenidos. La baja porosidad y mínima oxidación son factores claves en la mejora de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos HVOF. La minimización de estos factores depende de la temperatura de llama de proyección así como de la interacción entre la misma y el polvo utilizado como materia prima. Las condiciones utilizadas se muestran en la tabla II con la relación entre combustible y comburente (R).

La proyección de A-1 con H $_2$  como gas combustible se rige a través de la reacción (1) que muestra una relación estequiométrica de 0,5. Las condiciones utilizadas se encuentran muy cerca de esta estequiometría pero con un ligero déficit de oxígeno (0,48). Esta reacción generará en la llama una temperatura teórica de unos 3.120 K  $^{[x]}$ .

$$2 H_2 + O_2 \leftrightarrow 2 H_2 0 \tag{1}$$

La reacción estequiométrica (2) es la que rige el caso de la proyección A–2 con propileno, mostrando una relación de 4,5. La relación utilizada (2,6) presenta un importante déficit de oxígeno comparado con la estequiométrica.

**Tabla II**. Condiciones de proyección de los recubrimientos generados con propileno y con hidrógeno

Table II. Hydrogen and Propylene spray parameters

Recubrimiento	Gas Combustible (I/min)	R (O <sub>2</sub> /Gas)	Distancia (mm)
A-1	635	0,48	250
A-2	87	2,62	250

$$C_3H_6 + 9/2 O_2 \leftrightarrow 3 CO_2 + 3 H_20$$
 (2)

De esta forma, se obtiene una temperatura de 3.080 K, inferior a la del hidrógeno. Los mayores caudales de gas utilizados en el caso de la proyección por hidrógeno hace que se deban obtener mayores velocidades de partícula y, por tanto, el tiempo de interacción será menor, haciendo equivalentes los tratamientos térmicos en ambos casos. Las velocidades de partícula obtenidas bajo estas condiciones son de unos 600 m/s en el caso del hidrógeno, pudiendo disminuir hasta un 10 % en las condiciones del propileno.

### 2.3. Ensayos realizados

### 2.3.1. Ensayo de microdureza Vickers

La determinación de la microdureza de los recubrimientos se realizó por microindentación Vickers en un microdurímetro MATSUZAWA MXT-·, que ofrece cargas variables entre 10 y 1.000 g, siguiendo la norma UNE-7-423/2. Se han realizado 20 medidas a cargas de 300 g en la sección transversal de cada uno de los recubrimientos.

### 2.3.2. Ensayo de resistencia a la abrasión, Rubber-Wheel

Cada uno de los recubrimientos se ensayó por triplicado bajo el ensayo normalizado de Rubber-Wheel (ASTM G65-91), evaluándose el desgaste que se produce por abrasión mediante la medida de la pérdida de peso o volumen. El ensayo consiste en hacer girar una rueda de caucho de clorobutilo vulcanizado de 22 cm de diámetro a velocidad constante (139 rpm) sobre el recubrimiento. La rueda se va alimentando por gravedad con un flujo de 300g/min de silica con un tamaño medio de 1 mm ± 0,2 como agente abrasivo entre los dos cuerpos. La probeta se ve presionada contra la rueda con una fuerza de 50 N.

### 2.3.3. Ensayo de resistencia a la fricción, Ball-on-Disk

El ensayo Ball on Disk (ASTM G99-90) consiste en una bola de cierto material sometida a una carga que fricciona con un disco del material a ensayar, pulido hasta  $Ra \le 0.8$  con papel de desbaste de granulometría 1200, bajo ciertas condiciones atmosféricas. En

este caso, se ha utilizado una bola de 11 mm de diámetro de WC-6Co, a una humedad relativa inferior al 20 % y temperatura ambiente. El equipo produce la fricción de la bola contra la superficie pulida del recubrimiento a estudiar y, a través de una célula de carga, recopila el esfuerzo tangencial del par friccionante. La velocidad de giro de la muestra es de 139 rpm, que equivale a una velocidad lineal de 0,11m/s. La longitud recorrida por la bola sobre la superficie del recubrimiento a estudiar debe ser de 1.000 m hasta el final del ensayo. El resultado directo de este ensayo es el coeficiente de fricción del par friccionante y se estudiaron los recubrimientos por triplicado bajo cargas de 5 y 15 N.

### 2.3.4. Ensayo de desgaste erosivo

Este ensayo se realizó utilizando una pistola de aire a presión alimentada con corindón de grado 24. Se fijó la presión de entrada de gases a 2 bar. La pieza proyectada se sitúa a 6 cm de la boquilla de salida y a 45° del flujo del corindón utilizado como agente erosivo. Se recogieron valores de pérdida de peso cada 30 s. Los resultados se exponen a través de la velocidad de pérdida de volumen del recubrimiento. Con el mismo objetivo se han representado las rectas de pérdida de peso en función del tiempo.

### 2.3.5. Ensayo electroquímico de corrosión en circuito abierto

Se define como potencial de circuito abierto aquel potencial que alcanza con el tiempo un material frente a la acción de un electrolito. La ecuación de Nernst pone de manifiesto como la magnitud E (potencial) está influenciada por el coeficiente de actividad iónico ( $\gamma$ +n) de un metal y la concentración de éste en la disolución, tal y como muestra la siguiente expresión (3):

$$E = E^{0} - \frac{RT}{nF} \ln \left( \gamma_{+n} [Me^{+n}] \right)$$
 (3)

donde, E es el potencial,  $E_0$  es el potencial estándar, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura, n es el número de electrones que intervienen en el proceso, F es la constante de Faraday,  $\gamma^{+n}$  es el coeficiente de actividad iónico y [Me<sup>+n</sup>] es la concentración de la especie metálica en disolución. Los valores de  $E_{oc}$  cambian con el tiempo cuando un material se expone a la acción de un

electrolito. Dicho electrolito interacciona con los elementos del material y lo transforma. La transformación que tiene lugar puede ser de tipo protectora (como, por ejemplo, la formación de una capa de pasivación), con lo que el valor de E aumenta con el tiempo o, si tiene lugar un proceso de degradación del material (como, por ejemplo, la formación de una capa de óxido porosa), el valor de E disminuye con el tiempo.

La medida del potencial de circuito abierto es uno de los principales parámetros de corrosión y permite conocer el potencial en estado estacionario de la muestra bajo circuito abierto. A través del valor del potencial se conoce la capacidad protectora del recubrimiento sobre el sustrato. El equipo utilizado es un potenciostato / galvanostato EG&G PRINCENTON RESEARCH 263 conectado a una celda electroquímica. Las probetas recubiertas forman el electrodo de trabajo. El área de trabajo es circular, con una superficie de 1 cm<sup>2</sup>. Además del electrodo de trabajo, la celda dispone de otros dos: un electrodo de referencia de Ag/AgCl, KCl saturado y una red de Pt como electrodo auxiliar. Como electrolito se utilizaron 80 ml de una disolución acuosa de NaCl al 3,4 %, aireada y sin agitar.

### 2.3.6. Ensayo erosivo-corrosivo

El dispositivo diseñado en el CPT consiste en un soplete capaz de expulsar una corriente de aire a 600 °C. El flujo de aire dirige una gota de disolución acuosa 0,05 M de la mezcla eutéctica KCl:ZnCl<sub>2</sub> (52:48 wt %) hacia el sustrato. Esta mezcla de sales cloradas ha sido descrita ya en la bibliografía como una de las causantes de corrosión y, también, ha sido identificada durante este estudio, por EDS, en las cenizas provenientes de la incineradora donde se han realizado los ensavos<sup>[1 y 7]</sup>. La temperatura de la corriente de aire es suficiente para que las sales lleguen fundidas a la superficie del sustrato perdiendo el agua de disolución. Estas partículas quedan adheridas a causa del impacto en la superficie del sustrato simulando el proceso de impacto de las cenizas a los tubos recubiertos en el interior de la incineradora<sup>[1, 7 y 11]</sup>.

El proceso descrito combina la erosión durante el impacto de la gota y la corrosión por las sales que quedan adheridas a la superficie. El ensayo se realiza durante 12 h y consume 1 l de la disolución salina. El esquema del dispositivo se muestra en la figura 1. La evaluación posterior del ensayo se realiza a través de las pérdidas de espesor del recubrimiento y el análisis de las posibles fases formadas a través de SEM y EDS.

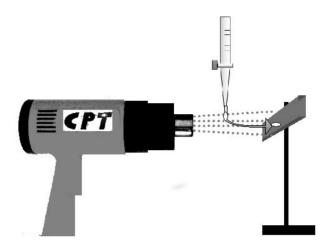


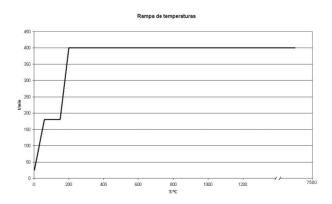
Figura 1. Esquema del dispositivo erosivo corrosivo.

Figure 1. Scheme of the erosion corrosion device.

### 2.3.7. Ensayo termogravimétrico de corrosión bajo sales fundidas

Para este ensayo se utilizó el equipo de termogravimetría Scanning Differential Thermogravimetric-analyzer SDT 2960 (TA instruments, New Castle, Delaware, EEUU).

El ensayo consiste en cubrir con la mezcla eutéctica de sales cloradas (KCl:ZnCl2 52:48 wt %) 20 mm² de recubrimiento previamente separado del sustrato sobre el que había sido proyectado. El perfil de temperaturas mostrado en la figura 2 se diseñó para generar una primera etapa de secado de las muestras y un posterior fundido de las sales seguido de 120 h de ataque a 400 °C. Se estudia la variación de peso de las muestras así como el flujo de calor.



**Figura 2.** Perfil de temperatura seguido por el ensayo termogravimétrico.

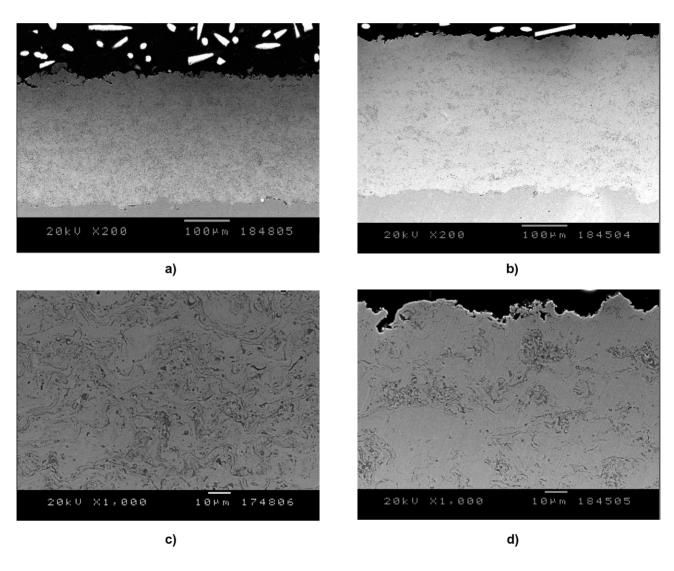
Figure 2. Temperature profile during the thermogravimetric test.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Caracterización de los recubrimientos

En las figuras 3 a) y 3 d) se observan las secciones transversales de los recubrimientos A–1 y A–2, respectivamente. La optimización experimental de las condiciones de proyección genera estructuras con baja porosidad y bajo nivel de oxidación de la matriz. El polvo de partida ha sido fundido para generar un recubrimiento compacto pero sin llegar a un tratamiento

térmico excesivo que pudiera provocar un alto grado de oxidación del mismo. Analizando las micrografías de las figuras 3 a) - d), se observa que el recubrimiento A-1 está levemente más oxidado que el A-2, posiblemente por la mayor temperatura alcanzada por la llama. Sin embargo, en ambos casos, la cantidad de oxido formado en la zona inter-lamelar como producto del proceso de proyección es relativamente baja. Intentar reducir más la oxidación llevaría a una menor fusión de las partículas y, por tanto, a una mayor porosidad. Estos óxidos están compuestos mayoritariamente por óxidos de cromo<sup>[12]</sup>, por lo que no ejercen funciones pasivantes bajo condiciones de temperaturas



**Figura 3.** a) Micrografía SEM del recubrimiento A-1 proyectado utilizando hidrógeno como combustible. b) Micrografía SEM del recubrimiento A-2 proyectado con propileno. c) Detalle de la micrografía SEM del recubrimiento A-1 proyectado con combustible hidrógeno. d) Detalle de la micrografía SEM del recubrimiento A-2 proyectado por propileno.

Figure 3. a) SEM micrograph of the A-1 coating sprayed by hydrogen.b) SEM micrograph of the A-2 coating sprayed by propylene. c) Detail of the A-1 coating SEM micrograph. d) Detail of the A-2 coating SEM micrograph.

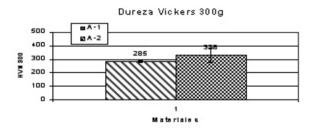
elevadas y ataque de cloruros. El óxido de cromo es atacado fácilmente por los cloruros, así como fragilizado por el vapor de agua.

### 3.2. Microdurezas Vickers

Los valores de microdureza Vickers para los dos recubrimientos se presentan en la figura 4. La dureza del recubrimiento no proporciona, al igual que los ensayos tribológicos, información directa de la capacidad de resistencia a la erosión y corrosión de los recubrimientos estudiados, aunque sí información sobre el estado y la homogeneidad del recubrimiento obtenido. La dureza del recubrimiento es un dato de gran importancia para la optimización de condiciones y parámetros de proyección, así como para comparativas entre los distintos recubrimientos generados.

### 3.3. Tribología de los recubrimientos estudiados

En la tabla III se muestran los resultados de los ensayos tribológicos realizados bajo norma, sobre los



**Figura 4.** Valores de dureza Vickers a 300 g y sus desviaciones para los recubrimientos estudiados.

Figure 4. Vickers microhardness at 300 g values and their standard deviation for the studied coatings.

**Tabla III**. Resultados de la caracterización tribológica de los recubrimientos. Coeficiente de fricción a 5 N y 15 N y coeficiente de abrasión

Table III. Obtained results of the coatings tribological characterisation. Friction coefficient at 5 N, 15 N and abrasion coefficient

Recubrimiento	μ <sub>5N</sub>	μ <sub>15N</sub>	K <sub>ab</sub> (cm <sup>3</sup> /N.m)
A-1	0,613	0,631	1,4·10 <sup>-4</sup>
A-2	0,405	0,499	1,2·10 <sup>-4</sup>

recubrimientos estudiados. Los valores del coeficiente de fricción obtenido en el ensayo de *Ball on Disk* caracterizan el comportamiento del material bajo fricción con un par friccionante de elevada dureza. Los resultados obtenidos permiten una comparación cuantitativa entre los recubrimientos obtenidos bajo ensayos normalizados.

Se observa una disminución en el coeficiente de fricción del recubrimiento A–2, directamente relacionado con los mayores valores de dureza del recubrimiento presentados en el apartado anterior. A mayores durezas se obtiene una menor interacción probeta-contraprobeta que lleva a unos coeficientes menores de fricción. Los resultados de abrasión muestran elevadas resistencias para materiales de su naturaleza y las diferencias entre ambos son poco importantes.

### 3.4. Ensayo de erosión

Los ensayos de erosión sobre ambos recubrimientos muestran las siguientes velocidades de pérdida de volumen para cada uno de ellos: A–1 presenta una pérdida de 5,9·10<sup>-3</sup> cm³/s, mientras que A–2 presenta una pérdida de 4,1·10<sup>-3</sup> cm³/s. Se puede concluir que la muestra proyectada con propileno (A–2) presenta un mejor comportamiento bajo estas condiciones. Las gráficas de la figura 5 muestran la relación de la masa perdida en función del tiempo para uno de los dos ensayos realizados, tanto para A–1 como para A–2. Se ha asimilado la pendiente de la gráfica a la velocidad de erosión, siendo ligeramente menor para el recubrimiento A–2.

### 3.5. Ensayo electroquímico de corrosión en circuito abierto

A través del ensayo de potencial en circuito abierto se puede evaluar la protección que ejerce el

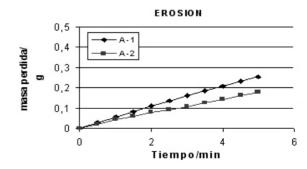


Figura 5. Pérdida de peso por erosión en función del tiempo de ensayo.

Figure 5. Erosion weight loss vs. time.

recubrimiento bajo corrosión electrolítica. La evaluación de la protección del recubrimiento puede cuantificarse en términos de capacidad de retención del avance de los electrolíticos. El papel de la porosidad interconectada y la formación de óxidos frente al ataque de los cloruros será clave en este aspecto. En la figura 6 se muestra el gráfico de la variación del potencial de saturación en el tiempo para los recubrimientos A-1 y A-2. Tanto en el ensayo realizado sobre A-1 como en el A-2 se observa que pasada una primera etapa de disminución del potencial hay un aumento del mismo producido por la aparición de capas de óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) que pretenden pasivar al material. Justo, después de la aparición de este pico, se observa una disminución aunque no muy acusada, debida a que estas capas de óxido no serán capaces de frenar de forma efectiva a los cloruros. Este fenómeno se puede extrapolar a lo que sucederá a temperaturas más elevadas. Los resultados de estos ensayos y la buena resistencia de los recubrimientos, que muestran potenciales elevados y estables en los dos casos, indican la compacidad, homogeneidad e inexistencia de porosidad interconectada<sup>[13]</sup>. A la vista de los resultados, cercanos a los -140 eV en ambos casos, se puede establecer que los dos recubrimientos ejercerán una buena protección al sustrato que muestra bajo las mismas condiciones valores de -650 eV.

#### 3.6. Ensayo erosivo-corrosivo

Los resultados de los ensayos E-C se valoraron a través de la pérdida de espesor absoluta de distintas

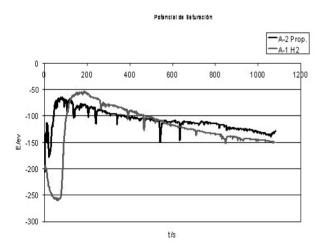


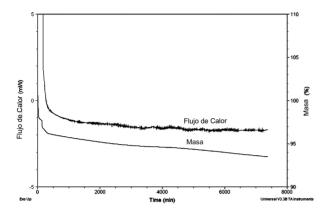
Figura 6. Ensayo electroquímico de circuito abierto bajo disolución aireada 3,4 % de NaCl.

Figure 6. Open circuit electrochemical test under 3,4 % NaCl dissolution.

secciones transversales de las muestras recubiertas sometidas al ensayo durante 12 h. La pérdida de espesor media del recubrimiento A-1 es de 35  $\pm$  5 mm. En el caso de A-2, se observan unas pérdidas de espesor de 12 ± 11 mm. Esta disminución de espesor se debe a la combinación de los dos efectos comentados con anterioridad. La oxidación de capas internas y externas del recubrimiento hace que este pierda adherencia entre sus capas, que son arrastradas por el proceso erosivo producido por el impacto de las partículas y, por otra parte, se decapan por el aumento de volumen que sufren la capas más internas al oxidarse<sup>[2 y 14]</sup>. Se demuestra, tras este ensayo, que el recubrimiento A-2 ofrece una mayor resistencia al ataque erosivo corrosivo. Esta mayor resistencia puede asociarse a una estructura más compacta, con menor cantidad de óxidos que puedan favorecer el desgaste del recubrimiento a través del ataque de la unión entre lamelas. Considerando la agresividad del ensayo, se puede valorar muy positivamente el resultado de resistencia a los procesos E-C ya que se encuentran muy por debajo de las 130 mm que puede llegar a perder el sustrato sin recubrir.

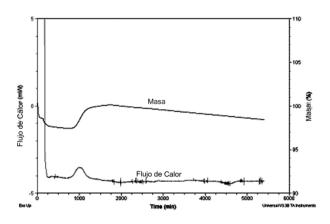
### 3.7. Ensayo termogravimetrico de corrosión bajo sales fundidas

Los ensayos realizados por termogravimetría muestran, para todas las muestras de A-1 estudiadas, que tras 120 h de ensayo no existe un aumento de peso por oxidación. El descenso observado en el perfil de peso de la muestra se atribuye a la evaporación de los cloruros utilizados como agente corrosivo<sup>[15]</sup>. Se concluye que el recubrimiento resiste, perfectamente, las 120 h de ensayo sin sufrir oxidación apreciable. La figura 7 muestra el perfil de la evolución de la pérdida de peso y el flujo de calor de una de las muestras de A-1. El flujo de calor no presenta picos significativos, por lo que se puede descartar la hipótesis de una oxidación del material que no se reflejara como un aumento de peso debido a la pérdida de peso por evaporación de las sales. En el caso del recubrimiento A-2, como se muestra en la figura 8, el perfil de porcentaje de peso sufre un incremento a partir del peso en seco. Aun así, la cinética de oxidación queda frenada a partir de las dos primeras horas de ensavo. A partir de esos instantes iniciales del ensayo, el comportamiento es similar al del A-1. En este ensayo se invierte, aunque de forma poco preocupante, la tendencia observada en el resto de ensayos de este trabajo, donde la erosión o el desgaste, en general, tenían un papel importante. Esta tendencia se explica por un mejor



**Figura 7.** Evolución del peso y el flujo de calor en el ensayo termogravimétrico para A-1.

Figure 7. Weight and heat flow of A-1 thermogravimetric test.



**Figura 8.** Evolución del peso y flujo de calor en el ensayo termogravimétrico para A-2

Figure 8. Weight and heat flow of A-2 thermogravimetric test.

fundido de las últimas capas del material A–1. En la figura 8 se observa este aumento de peso y su correspondiente pico exotérmico en el perfil de flujo de calor. En este caso, se puede cuantificar el aumento de peso por superficie del material como 12,15 ± 2,5 mg/cm², un valor muy bajo si se compara con los 130 mg/cm² aumentados por el acero de los tubos bajo las mismas condiciones. Si se comparan los resultados entre los dos recubrimientos se observa que A–1 (hidrógeno) tiene un mejor comportamiento cuando se somete a ensayos de oxidación estática. Una vez analizados todos los resultados para los dos casos, se deduce que los recubrimientos base níquel presentan, proyectados bajo condiciones optimizadas con cualquiera de los dos

gases utilizados como combustibles, una buena estructura y composición para la resistencia a corrosión en ambientes clorados, como ocurre en el interior de las incineradoras de residuos sólidos urbanos. Comparando los dos recubrimientos utilizados se observa, en todos los ensayos, que A-2 ofrece unas mejores características de resistencia a la erosión, abrasión y fricción y posee una mayor dureza v resiste mejor a todos los ensavos donde la erosión y la resistencia mecánica del recubrimiento tienen un papel importante. En el ensayo termogravimétrico de corrosión estática bajo sales fundidas no se percibe aumento de peso por parte de A-1 y el aumento de A-2 es muy pequeño y ocurre solo en las primeras horas de ensayo. Para la aplicación, como protección de los tubos, del intercambiador de calor de incineradoras de residuos sólidos urbanos se considera la resistencia a la oxidación como el factor más importante y, por tanto, clave en la selección del material a utilizar. La evaluación general del comportamiento de los recubrimientos HVOF base níquel es que ofrecen, en sus condiciones óptimas, una protección segura para los tubos del intercambiador de las plantas IRSU.

#### 4. CONCLUSIONES

- La proyección térmica de alta velocidad genera recubrimientos que presentan propiedades mecánicas y químicas que pueden ser competitivas en protección de zonas sometidas a ataques de agentes clorados, como es el caso de la incineradora de residuos.
- El material de base níquel proyectado con hidrógeno (A–1) presenta una mejor resistencia a la oxidación frente a las sales cloradas fundidas a 400 °C que el proyectado con propileno (A–2), mientras que este último presenta mejores propiedades de resistencia a la erosión y fenómenos tribológicos, así como una mayor dureza.
- El ensayo electroquímico sobre los recubrimientos da como resultado unos potenciales de alrededor de –125 eV, por lo que se considera que los mismos garantizarán una muy buena protección del sustrato; obteniéndose un resultado sensiblemente mejor para el recubrimiento proyectado con propileno.
- La combinación de elevadas resistencias a la oxidación bajo sales fundidas, corrosión electroquímica con cinéticas lentas y elevada resistencia al desgaste, caracteriza a ambos recubrimientos como buenas opciones para su utilización como protección en incineradoras de residuos sólidos urbanos.

### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen las ayudas recibidas de la Generalitat de Catalunya por el proyecto 2005 SGR 00310 y al Ministerio de Educación y Ciencia por el proyecto MAT 2000-0418-P4-03. M. Torrell agradece a la "Universitat de Barcelona" la concesión de una beca de investigación BRD 2006.

#### REFERENCIAS

- [1] B-Q. Wang, Wear 188 (1995) 40-48.
- [2] Y.S. Li., Y. Niu y W.T. Wu, Mater. Sci. Eng. A 345 (2003) 64-71.
- [3] M.A. Uusitlao, P.M.J. Vuoristo y T.A. Mäntylä, *Mater. Sci. Eng.* A 346 (2003) 168-177.
- [4] V.Higuera-Hidalgo, F.J. Blaunce-Varela y J. Riba-Lopez, *Rev. Metal. Madrid* 42 (2006) 444-455.
- [5] W.-M. Zhao, Y. Wang, L-X. Dong, K.-Y. Wu yJ. Xue, Surf. Coat. Tech. 190 (2005) 293-298.

- [6] P.Cadenas, M. Rodriguez y M.H. Staia, Rev. Metal. Madrid 43 (2007) 50-62.
- [7] T.S Sidhu, S. Prakash y R.D. Agrawal, Surf. Coat. Tech. 198 (2005) 441-446.
- [8] A. Agüero, Rev. Metal. Madrid 43 (2007) 63-75.
- [9] H.Y. Al-Fadhli, J. Stokes, M.S.J. Hashmi y B.S. Yilbas, Surf. Coat. Tech. 200 (2006) 5.782-5.788.
- [10] J.M.Guilemany, J.Nutting y V.Sobolev, High Velocity Oxy Fuel Spraying. Theory, Structureproperty Relationships and Applications. Maney Publishing. Leeds UK (2004). ISBN 1 90265 372 6.
- [11] Y. Longa, Y.S. Zhang, M Takemoto y R.A. Rapp, *Corros. Sci.* (1996) 680-689.
- [12] D. Zhang, S.J. Harris, D.G. McCartney, *Mater. Sci. Eng.* A344 (2003) 45-56.
- [13] W.M. Zhao, Y. Wang, T. Han, K. Wu y J. Xue, Surf. Coat Tech. 183 (2004) 118-125.
- [14] V. Shankar, K. B. Sankara y S.L. Mannan, *J. Nucl. Mater.* 288 (2001) 222-232.
- [15] A. Rhu y M. Spiegel. Corros. Sci. 48 (2006) 679-695.