

Factores que afectan la carga electrostática en polvos cerámicos

I. LORITE; J. J. ROMERO; J. F. FERNÁNDEZ

Departamento de Electrocerámica, Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, C/ Kelsen 28049 Madrid, España.

Los fenómenos de carga electrostática en polvos cerámicos se producen cuando las superficies de los mismos entran en contacto entre sí y con los elementos que las contienen. La acumulación de cargas electrostática es importante en polvos cerámicos dado su carácter aislante y debido al riesgo de explosiones por descarga. En este trabajo se estudian los principales factores que afectan a la aparición de carga neta y la tribocarga en las partículas de polvo cerámico. En polvos cerámicos de alúmina se ha comprobado que las partículas más finas presentan un aumento de la carga electrostática con una polaridad negativa. Se ha observado una correlación entre la naturaleza de los grupos OH superficiales y la carga electrostática. La carga neta y la tribocarga en polvos cerámicos se pueden reducir si se compensan los sitios superficiales que soportan dicha carga. La dispersión en seco de nanopartículas sobre micropartículas permite la compensación de la carga superficial con una importante modificación del estado de aglomeración de los polvos cerámicos.

Palabras clave: Polvos cerámicos, nanopartículas, carga electrostática, tribocarga, alúmina.

Factors affecting the electrostatic charge of ceramic powders.

Abstract. The phenomenon of electrostatic charge in ceramic powders takes place when the particle surfaces enter in contact between them or with the containers. The accumulation of electrostatic charge is of relevance in ceramic powders in view of their insulating character and the risk of explosions during the material handling. In this work the main factors that affect the appearance of intrinsic charge and tribo-charge in ceramic powder have been studied. In ceramic powders of alumina it has been verified that the smallest particle sizes present an increase of the electrostatic charge of negative polarity. A correlation has been observed between the nature of the OH -surface groups and the electrostatic charge. The intrinsic charge and the tribocharge in ceramic powders can be diminished by compensating the surface groups that support the charge. The dry dispersion of nanoparticles on microparticles allows surface charge compensation with a noticeable modification of the powder agglomeration.

Key Words: ceramic powders, nanoparticles, electrostatic charge, tribocharge, alumina.

1. INTRODUCCIÓN

La electricidad estática es un fenómeno físico que ha sido ampliamente estudiado durante siglos. Actualmente, la acumulación de electricidad estática durante la manipulación de los polvos cerámicos en los procesos industriales conlleva un elevado factor de riesgo debido a la posibilidad de explosiones (1) provocadas por descargas electrostáticas de los materiales cercanos a combustibles o gases inflamables. Sin embargo, a pesar de tratarse de un proceso conocido, los problemas derivados de la presencia de carga electrostática no están totalmente resueltos aún.

Existen diferentes explicaciones para la generación de la carga electrostática en las partículas de polvo cerámico (2). La carga electrostática se genera cuando dos superficies entran en contacto, tales como las partículas entre sí o las partículas con los equipos de producción (3). Este último fenómeno, llamado tribocarga, depende de diferentes parámetros como son la rugosidad de la superficie de las partículas, la presión de contacto entre las mismas y su estado de aglomeración. Para las superficies conductoras, está comúnmente asumido que las

cargas fluyen a través de las intercaras cuando las superficies se separan y, por lo tanto, el intercambio de carga neto es nulo (4,5). Por el contrario, los fenómenos de tribocarga generan la acumulación de carga en elementos aislantes que al contactar con un elemento conductor producen la correspondiente descarga eléctrica. Una aproximación práctica que se emplea en procesos industriales para minimizar los riesgos derivados de la acumulación de carga, es asegurar que las superficies de los polvos cerámicos están en contacto con elementos semiconductores o conductores conectados a tierra.

Los procesos de acumulación de carga electrostática han sido ampliamente estudiados en ámbitos que emplean materiales en polvo como son las industrias alimentaria (6), farmacéutica (7), química, cerámica, etc. Uno de los retos actuales consiste en determinar como afectan tanto los parámetros de los polvos cerámicos como los factores externos a la generación de carga y a la disipación de la misma (8). Entre los diferentes parámetros relativos a los polvos cerámicos se consideran: tamaño de partícula, morfología (9), composición,

rugosidad (10), propiedades eléctricas y mecánicas (11). En los factores externos se consideran condiciones atmosféricas como la temperatura y la humedad relativa (H.R.). Estos factores externos son difíciles de determinar y resultan en ocasiones impredecibles, siendo compleja la eliminación de la carga electrostática asociada a los mismos. Uno de los principales problemas a la hora de estudiar la carga electrostática en partículas cerámicas, radica en la falta de metodologías para determinar de forma precisa dicha carga y, en consecuencia, correlacionarla con los diferentes parámetros que están en su origen.

En este trabajo se aborda la medida de carga electrostática neta y tribocarga en partículas de alúmina con diferentes tamaños y se estudian los factores que modifican la acumulación de carga electrostática en la superficie de dichas partículas cerámicas. Se realiza una aproximación de procesos para la reducción de carga neta y tribocarga mediante el empleo de nanopartículas que presenta ventajas desde el punto de vista de su manipulación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se ha realizado empleando polvos cerámicos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ con diferentes tamaños de partícula. Los polvos de alúmina fueron obtenidos mediante el proceso Bayer y fueron suministrados por la empresa Vicar S.A. Adicionalmente se emplearon nanopartículas de NiO, suministradas por Aldrich, con una pureza del 99.8% y una superficie específica $>50\text{m}^2/\text{g}$, para realizar los estudios de compensación de carga superficial.

La superficie específica de los polvos cerámicos de partida se determinó mediante el procedimiento BET (Monosorb Surface Area, Quantachrome Corporation, EEUU). El tamaño de partícula se midió mediante granulometría láser (Malvern, Mastersizer S, Reino Unido) previa dispersión de los polvos cerámicos en medio acuoso con la ayuda con un dispersante acrílico y aplicando proceso de ultrasonidos durante 10 minutos (12). El tamaño medio de partícula se obtuvo al 50% en volumen de la distribución del tamaño de las partículas medidas. El índice de dispersión de las partículas, IDP, fue calculado mediante la expresión, $\text{IDP} = ((d_{90} - d_{10}) / d_{50})$, donde d_{10} y d_{90} son la distribución de tamaño para el 10% y 90% respectivamente de la acumulación en volumen de partículas medidas. La morfología de las partículas se evaluó mediante Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (MEB-EC, Hitachi S-4700, Tokio, Japón). El tamaño de las nanopartículas de NiO se determinó mediante Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM, Hitachi 120KeV, Tokio, Japón). Las curvas de absorción de nitrógeno se realizaron mediante isoterma de N_2 (Micromeritics, ASAP 2010/TRISTAR 3000, EE.UU). La caracterización de la hidroxilación de la superficie de las partículas se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja, ATR-IR, (Spectrum 100 TF-IR, Perkin Elmer, Massachusetts, EEUU).

El sistema empleado para determinar la carga electrostática fue un dispositivo de doble copa de Faraday diseñado en el ICV-CSIC y esquematizado en la figura 1, que consiste en dos tubos cilíndricos de acero inoxidable y diámetro diferente, cerrados por uno de los extremos. Los dos tubos cilíndricos se colocan de forma concéntrica y aislados eléctricamente entre sí mediante una placa de Teflón®. El tubo cilíndrico externo

se conecta a tierra por lo que no solo actúa como escudo para los campos eléctricos externos, sino también como punto de referencia ya que se mantiene a cero en todo momento. En el tubo cilíndrico interior se introduce el polvo cerámico que debido a su carga superficial induce una carga de igual valor pero de signo contrario, en su pared interior y de igual signo en la pared exterior. Como el tubo cilíndrico externo se mantiene conectado a tierra, el campo electrostático generado puede ser determinado mediante un electrómetro con una alta resistencia interna, 10^{14} Ohm (Keithley 6517A, Cleveland, Ohio, EEUU). La carga viene dada directamente por el electrómetro y se determina a partir de la relación $C=Q/V$, donde Q es la carga medida, C la capacidad interna del aparato de medida y V el campo eléctrico inducido debido a la diferencia de carga entre los dos cilindros. El montaje experimental cuenta, además, con una balanza electrónica para determinar el peso del polvo cerámico dosificado en cada medida. Este paso se realiza para la posterior normalización de la carga con la masa del polvo cerámico utilizado. El procedimiento de medida se repite 10 veces empleando cada vez dos gramos de polvo. El error experimental introducido por el montaje es de 0.01nC. Sin embargo, hay que tener en cuenta la dispersión de las medidas debido a la reproducibilidad de los valores de la carga al realizar el experimento varias veces. Este será el valor que tomaremos en adelante como error en nuestras medidas. El polvo cerámico debe ser renovado en cada medida de la carga, ya que el manejo del polvo produce aglomeraciones que pueden afectar al valor de carga obtenido. Se procedió a la obtención de dos tipos de medidas diferentes: 1) la carga neta y 2) la carga acumulada debido a tribocarga. En la medida de carga eléctrica neta el polvo cerámico se mantuvo a una temperatura de $>100^\circ\text{C}$ durante 24 horas y se manipuló en todo momento con una espátula metálica conectada a tierra para evitar la generación de tribocarga. En la medida de la carga acumulada el polvo cerámico se hizo deslizar a través de un material aislante, en concreto un tubo cilíndrico de vidrio de 50 cm de longitud y 4 cm de diámetro, que se encuentra a una inclinación de 45° .

Las medidas de carga electrostática se realizaron tanto para los polvos cerámicos de partida como para los polvos cerámicos seleccionados en los que se modificó la superficie

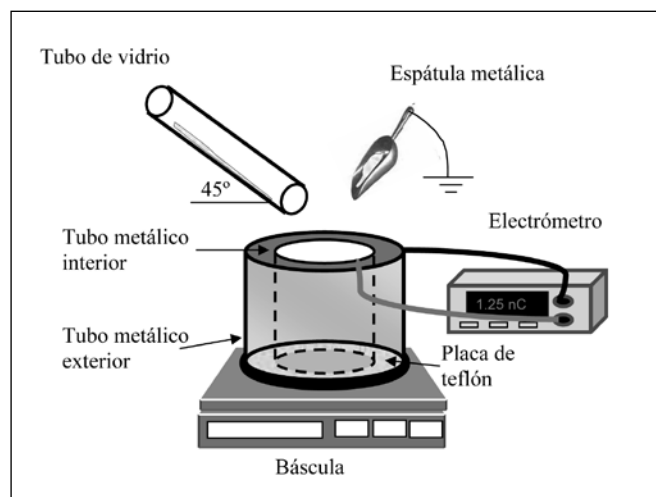


Figura 1: Sistema experimental consistente en una doble jaula de Faraday para las medidas de carga intrínseca y tribo-carga en polvos cerámicos.

mediante los siguientes tratamientos: a) adición de H₂O, b) Tratamiento térmico a 700°C durante 30 min, c) adición de acetato de ponivilino, PVA, y d) adición de nanopartículas de NiO. El agua se añadió en la proporción 0.5% en peso con una posterior homogeneización en un montero de ágata y tamizado por una malla de 100µm para romper posibles aglomeraciones formadas debido a la saturación de humedad. El PVA se molturó previamente y se añadió en la proporción del 0.5% en peso mediante un mezclado por agitación en seco en una túbula Mixer/Mill. Las nanopartículas de NiO se añadieron en un 1% en peso empleando un proceso de dispersión en seco¹³.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la tabla I se resumen las principales características de los polvos cerámicos estudiados. Se evaluaron polvos cerámicos de alúmina con cinco tamaños de partícula diferentes para estudiar el efecto de este parámetro sobre la carga electrostática neta y acumulada. De acuerdo con la disminución en el tamaño de partícula se observa un aumento en el valor de la superficie específica que indica una correlación entre el volumen y la superficie de las partículas. Esta correlación implica la baja presencia de microporos en los polvos cerámicos que podrían introducir diferencias en su respuesta. Para evaluar la homogeneidad del tamaño de partículas se determinó el índice de dispersión de las partículas, IDP. Un valor de IDP bajo indica una alta homogeneidad en la distribución del tamaño de partículas.

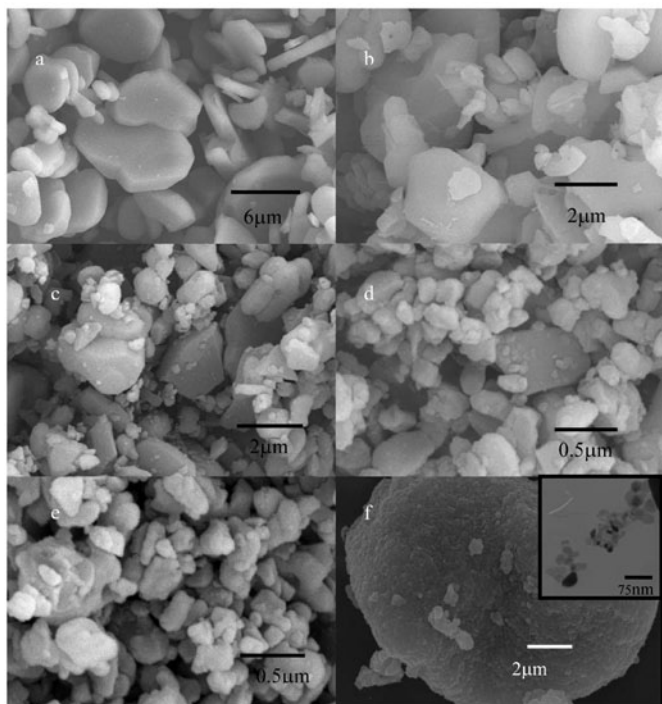


Figura 2: Micrografías mediante Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo de los diferentes polvos cerámicos estudiados: a) A α -Al₂O₃, 5,91µm; b) B α -Al₂O₃, 2,78µm; c) C α -Al₂O₃, 1,36µm; d) D α -Al₂O₃, 0,86µm; e) E α -Al₂O₃, 0,26µm; y f) NiO. Se muestra una imagen de microscopía de transmisión para observar el tamaño de partícula de NiO

TABLA I: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS UTILIZADAS.

	α -Al ₂ O ₃					NiO
	A	B	C	D	E	
Tamaño de partícula ±0,01(µm)	5,91	2,78	1,36	0,86	0,26	0.025*
Superficie específica ±0,1(m ² /gr)	0,5	1,4	2,6	7,9	8,7	40
Indice de dispersión ±0,04	1,95	3,11	1,72	6,66	2,88	10.5

* Valor determinado mediante Microscopía Electrónica de Transmisión

En la figura 2 se muestran las micrografías de los materiales estudiados mediante MEB-EC. Las partículas de alúmina muestran una morfología característica de tipo placa. El tamaño promedio de diámetro de las partículas, obtenido mediante análisis de imágenes, presentan un elevado grado de acuerdo con el tamaño determinado en volumen mediante granulometría láser. La alúmina D, que posee el valor de IDP más alto, se corresponde con los polvos de alúmina que presentan un mayor estado de aglomeración. En general, las partículas en estudio presentan una distribución homogénea de tamaños y un estado de baja aglomeración, que las hace idóneas para el estudio de carga electrostática propuesto.

La figura 2 f, muestra el polvo de NiO formando grandes aglomerados que están constituidos por partículas primarias de NiO de ~25 nm. Su elevado estado de aglomeración impide extraer conclusiones sobre la carga electrostática, por ello solo se emplearán estas nanopartículas para modificar la carga de las partículas de alúmina.

La figura 3a muestra la adsorción de N₂ para tres partículas seleccionadas de Al₂O₃ (no se representaron todas las partículas por simplicidad). Se observa un mayor volumen de N₂ adsorbido cuando el tamaño de las partículas disminuye, debido al aumento de superficie específica. En la figura 3b se muestra la banda de absorción infrarroja correspondiente a los grupos hidroxilos, OH, adsorbidos en la superficie. Los óxidos presentan diferencias en la adsorción de OH provenientes de la disociación de moléculas de agua adsorbidas (14) en los sitios disponibles de la superficie de las partículas. Esta característica de adsorción de grupos OH fue definida por Duffy (15) como la basicidad de la superficie. Esta basicidad indica cuantitativamente la capacidad de ceder electrones de los iones oxígeno, O²⁻, y la adsorción de OH en la superficie del óxido. Por tanto, la basicidad de la superficie puede ser expresada como la proporción OH/O²⁻. La adsorción de grupos hidroxilos depende del orden de coordinación del ion O²⁻, que producirá así mismo cambios en las vibraciones moleculares de los grupos OH en la superficie. Se observa que hay una banda más ancha e intensa para aquellas partículas con una mayor adsorción de N₂, la banda de OH en la superficie de los polvos de alúmina presenta una contribución de grupos hidroxilos a 3200-3300 cm⁻¹, que no contribuirán a la carga electrostática (16), y una segunda banda centrada a 3430 cm⁻¹ asociada a la carga electrostática. Las diferencias en proporción de estas bandas en los polvos de alúmina indican que las

TABLA II: CARGA ELECTROSTÁTICA DE PARTÍCULAS E α - Al_2O_3 CON SUPERFICIE MODIFICADA Y LOS MATERIALES EMPLEADOS PARA DICHA MODIFICACIÓN

	Materiales de partida		E α - Al_2O_3 modificada		
	E α - Al_2O_3	PVA	+ 0.5% H_2O	Tratamiento térmico	+PVA
Carga neta(nC/g)	-1.9 \pm 0.1	0.04 \pm 0.08	0.03 \pm 0.03	0.05 \pm 0.03	-0.63 \pm 0.2
Tribo carga(nC/g)	-3.9 \pm 0.4	1.2 \pm 0.10	0.06 \pm 0.10	-0.3 \pm 0.10	-1.73 \pm 0.6

condiciones ambientales del laboratorio y el tamaño de partícula producirá diferencias en la carga electrostática.

La figura 4 muestra la carga neta y tribocarga de las distintas partículas de alúmina. Se observa claramente una dependencia no lineal de la carga con el tamaño de partícula. Las partículas de mayor tamaño tienen una carga neta en su superficie menor. Este resultado se justifica debido a su menor capacidad de absorción de OH, como se observó anteriormente. Además, los grupos OH adsorbidos en estas partículas se encuentran a 3200-3300 cm^{-1} por lo que no contribuyen a la carga electrostática. Las partículas de menor tamaño presentan, por el contrario, una mayor adsorción superficial debida a grupos hidroxilos localizados a 3430 cm^{-1} que confieren a las partículas con tamaños <2 μm , una polaridad de carga negativa. La tribocarga presenta un comportamiento similar al descrito para la carga neta, con el tamaño de partícula. La diferencia radica en este caso en el aumento del estado de aglomeración del polvo que produce un aumento de la carga electrostática medida.

El valor de carga electrostática más elevado se obtiene para las partículas de menor tamaño, 0.26 μm . Un elevado valor de carga electrostática junto con una masa reducida favorece la movilidad a través del aire de las partículas submicrónicas debido a los fenómenos de ionización por el aire. Con el objeto de evaluar la dependencia de dicha carga con diferentes agentes externos se realizaron los tratamientos de modificación de la superficie descritos en el procedimiento experimental. Dichos tratamientos mantienen inalterado tanto

el tamaño de partícula como su morfología. Los valores de carga electrostática medida para las muestras con las variaciones mencionadas se resumen en la tabla II. Para los tratamientos que producen una variación en la humedad de la superficie de las muestras mediante la adición de H_2O o tratamiento térmico se observa una reducción importante de la carga electrostática neta y de la tribocarga. Cuando se produce una saturación de H_2O en la atmosfera se forman moléculas de agua en la superficie de las partículas que contribuyen a la neutralización de la carga. En la carga neta se produjo un aparente cambio de polaridad que no es significativo debido a la alta incertidumbre que produce la dispersión de los datos obtenidos. Por otro lado, la humedad genera además un aumento importante en el estado de aglomeración del polvo reduciendo su fluidez. Ambos aspectos limitan la generación de tribocarga.

Del mismo modo, la reducción de los OH superficiales mediante el tratamiento térmico se traduce en una disminución tanto de la carga electrostática neta como de la tribocarga debido a una menor capacidad de intercambio electrónico para la acumulación de carga electrostática.

Por otro lado, la adición de PVA incorpora carga positiva en la superficie de las partículas que produce una disminución tanto de la carga eléctrica neta de la superficie como de la tribocarga por una compensación con la carga de la alúmina. La adición de aditivos poliméricos afecta, por tanto, a la carga electrostática de los polvos cerámicos. En general, se ha podido constatar que tanto la carga neta como la tribocarga

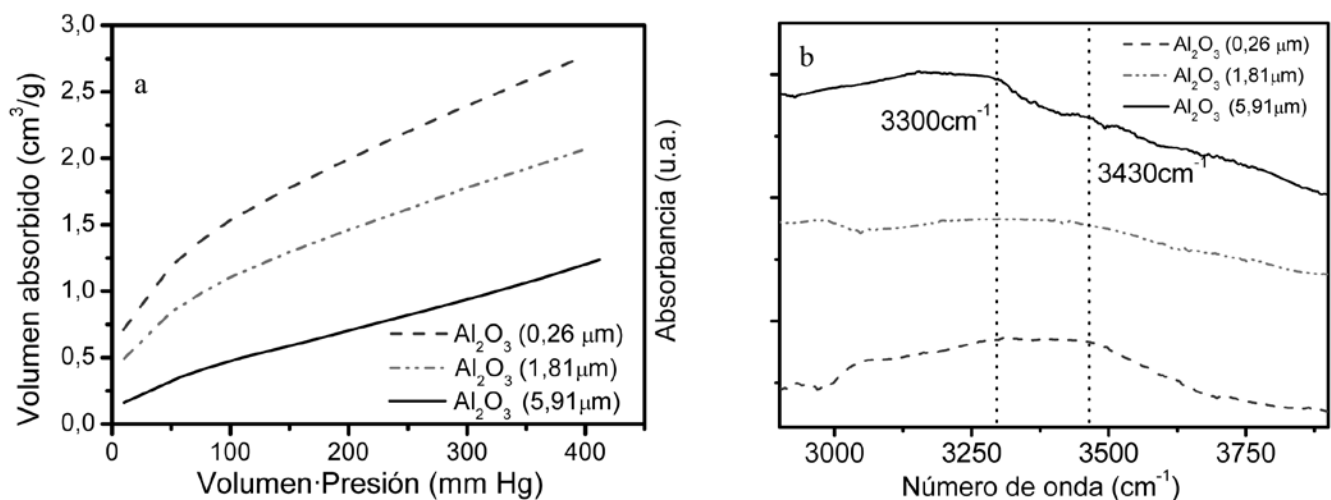


Figura 3: a) Curvas de absorción de nitrógeno para las muestras E α - Al_2O_3 (0,26 μm); C α - Al_2O_3 (1,81 μm); A α - Al_2O_3 (5,91 μm); b) Espectro de ATR-IR para las muestras de E α - Al_2O_3 (0,26 μm); C α - Al_2O_3 (1,81 μm); A α - Al_2O_3 (5,91 μm).

en polvos cerámicos se puede reducir si se compensan los sitios superficiales que soportan dicha carga, en particular empleando materiales que poseen una carga de diferente polaridad. La pregunta que quedaría abierta está relacionada con la posibilidad de que dichos sitios superficiales fueran neutralizados por cargas de similar polaridad.

Recientemente se ha comprobado que los procesos de dispersión en seco producen una correcta distribución de nanopartículas de NiO sobre la superficie de partículas submicrónicas de ZnO modificando sus niveles electrónicos¹⁷. Las nanopartículas de NiO presentan carga electrostática neta positiva, Tabla III. Para el estudio del efecto de compensación entre partículas cargadas con la misma polaridad se realizó la dispersión de NiO sobre partículas de A α -Al₂O₃, 5.91 μ m. Esta partícula sustrato se escogió debido al bajo IDP que presenta y a que su superficie esta libre de contaminantes.. La tabla III, recoge los valores de carga electrostática neta y tribocarga de las partículas antes y después de la dispersión en seco. Se produce una disminución de la carga neta por la interacción de los grupos OH superficiales responsables de la misma entre las nanopartículas y las partículas soporte. Esta reducción se puede atribuir a la reacción electroquímica propuesta en los procesos de dispersión en seco entre las superficies de la nanopartículas y la partículas de alúmina^{18,19}. Por el contrario, se observa un aumento de la tribocarga generada que se correlaciona con un sensible aumento del estado de aglomeración. El tamaño promedio de aglomerado, estimado mediante imágenes de microscopia óptica de luz reflejada, para el polvo de alúmina observado tras el ensayo de tribocarga es de ~200 μ m. Tras la dispersión en seco con 1% en peso de nanopartículas de NiO el tamaño de los aglomerados se incrementa en un 60%. La mayor rugosidad superficial asociada con la presencia de nanopartículas ancladas en la superficie de las partículas de alúmina estaría en el origen del aumento del tamaño de aglomerado. Por tanto la existencia de partículas finas en los procesos de molienda, y en particular la incorporación de mezclas de partículas y nanopartículas, jugará un papel importante en los procesos de generación de carga electrostática acumulada que se manifiestan no

TABLA III: CARGA ELECTROSTÁTICA DE PARTÍCULAS A α -Al₂O₃, NiO₂ Y PARTÍCULAS DE A (ALPHA)-Al₂O₃ MODIFICADAS CON NiO¹⁷

	A α -Al ₂ O ₃	NiO	A α -Al ₂ O ₃ +1% NiO
Carga neta(nC/g)	0.11±0.08	0,08±0.05	0.06±0.05
Tribo carga(nC/g)	2.2±0.4	,-1.69±0,5	3.0±0.8

solo en la tribocarga, sino en cambios en la respuesta a la aglomeración y fluidez de los polvos cerámicos.

El estudio en este trabajo se presenta de interés ya que actualmente una de las tendencias en transporte de polvos cerámicos es el empleo de métodos neumáticos debido a su simplicidad y el abaratamiento del proceso de transporte. En dichos procesos el rozamiento de las partículas con los materiales del sistema genera grandes cantidades de carga con el consiguiente riesgo de explosiones. El presente estudio incide en aspectos básicos sobre el origen y modificación de la carga electrostática en función de las características del polvo cerámico, así como en tratamientos sencillos para minimizar los efectos nocivos derivados de la manipulación. El empleo de polvos cerámicos submicrónicos y nanométricos de forma poco controlada conlleva un aumento del riesgo para la salud de los operarios. Este riesgo depende obviamente de la naturaleza de las partículas y aumenta con la facilidad de las mismas para permanecer suspendidas en la atmósfera y por lo tanto de ser introducidas en el organismo mediante inhalación o absorción cutánea. Las partículas más finas presentan una mayor carga electrostática que aumentaría sensiblemente el riesgo potencial de las mismas, al presentar una mayor capacidad de adhesión en las paredes de los órganos de los seres vivos por dicha interacción electrostática. El estudio presentado de los factores que gobiernan la carga eléctrica de las partículas cerámicas así como de los procesos que permiten su modificación, abre un campo que resulta de gran utilidad para solventar problemas en el procesado y minimizar los riesgos inherentes a las partículas finas.

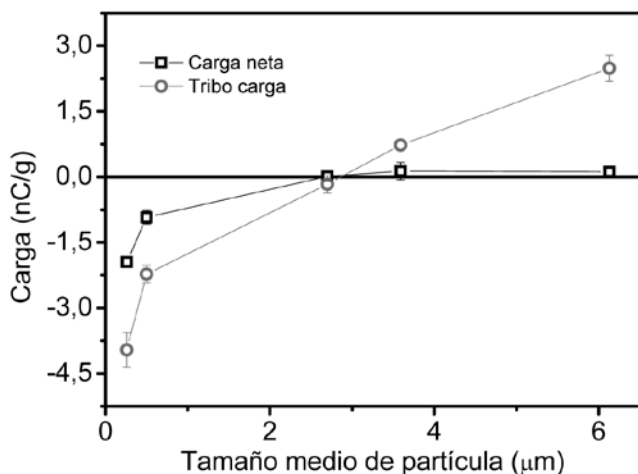


Figure 4: a) Carga electrostática de las diferentes partículas de alúmina: carga neta intrínseca (□), carga acumulada en rojo (○).

4. CONCLUSIONES

Se ha determinado el valor de la carga neta y la tribocarga en las partículas de polvo cerámico mediante el empleo de una metodología basada en una doble jaula de Faraday. En polvos cerámicos de alúmina se ha comprobado que las partículas más finas presentan un aumento de la carga electrostática así como un cambio de la polaridad de la misma. Se ha observado una correlación entre la naturaleza de los grupos OH superficiales y la carga electrostática, encontrándose que la naturaleza de los hidroxilos está en el origen del cambio de polaridad.

La modificación de la superficie mediante la adición de H₂O, tratamiento térmico o adición de polímeros afectan a la carga electrostática superficial, traduciéndose en una disminución de la misma. Se ha podido constatar que tanto la carga neta como la tribocarga en polvos cerámicos se puede reducir si se compensan los sitios superficiales que soportan dicha carga. La carga electrostática también puede

compensarse mediante la dispersión de nanopartículas en la superficie de las micropartículas. Este proceso implica una modificación en el estado de aglomeración de los polvos cerámicos que se ve reflejado en variaciones importantes en la carga acumulada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del proyecto MAT2010-21088-C03-01. Los autores agradecen a la empresa VICAR S. A. la selección de las muestras de polvo de alúmina así como las discusiones sobre el efecto de la carga en la manipulación de los polvos cerámicos; a M. A. Bañares la ayuda prestada en las medidas de Absorción de nitrógeno y a M. S. Martín-González por la ayuda en la discusión en la generación de grupos OH.

BIBLIOGRAFIA

- M. Glor; "Electrostatic ignition hazards in the process industry"; *J. Electrostat.* 63, 447-453, (2005).
- T. B. Jones, "Electromechanics of Particles". Cambridge University Press, Cambridge 1995.
- S. Matsusaka, Hiroakimasuda, "Electrostatics of particles"; *Adv. Powder Technol.*, 14, 2, 143-166 (2003).
- G. S. P.Castle, I. I. Incullet, G. S. Sines, Lawrence B. Schein, "Contact Charging Between Metals Revisited", *IEEE T Ind. Appl.*, 40, 5-8 (2004)
- W. R. Harper, "The volta effect as a cause of static electrification," *Proc. R. Soc. Lond. A, Math., Phys. Sci.*, 205, 83-103 (1951).
- A. E. Amefia, J. M. Abu-Ali, S. A. Barringer, "Improved functionality of food additives with electrostatic coating", *Innov. Food. Sci. Emerg.* 7, 176-181(2006).
- G. Rowley ; "Quantifying electrostatic interactions in pharmaceutical solid systems"; *Int. J. Pharmaceutic.*, 227, 47-55(2001).
- T. Nguyen, J. Nieh, , "The role of water vapour in the charge elimination process of flowing powders". *J. Elect.* 22, 213-227(1989).
- P.A. Carter, O.E. Cassidy, G. Rowley, D.R. Merrifield, "Triboelectrification of fractionated crystalline and spray-dried lactose", *Pharm. Pharmacol. Commun.* 4,111-115 (1998).
- J. Eilbeck, G. Rowley, P.A. Carter, E.J. Fletcher. "The effect of materials of construction of pharmaceutical processing equipment and drug delivery devices on the triboelectrification of size fractionated lactose", *Pharm. Pharmacol. Commun.* 5, 429-433, (1999).
- R. Elsdon, F.R.G. Mitchell, "Contact electrification of polymers", *J. Phys. D. Appl. Phys.* 9, 1445-1460 (1976).
- T. Jorge, P. Chartier, "Ultrasonic Dispersion of Ceramic Powders", *J. Am. Ceram. Soc.* 73, 2552-2254, (2005).
- J.F. Fernández, I. Lorite, F. Rubio-Marcos, J. J. Romero, M. A. García, A. Quesada, M. S. Martín-González, J. L. Costa-Krämer. Patent Numbers. WO2010010220-A1; ES2332079-A1, 2010, to Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
- J. Goniakowski, C. Noguera, "Theoretical investigation of hydroxylated oxide surfaces", *Surf. Sci.* 330 337-349(1995).
- J. A. Duffy, "Optical basicity of a solid oxide", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 3961-3970, (1993).
- D. B. Mawhinney, J. A. Rossin, K. Gerhart, and J. T. Yates, Jr, "Infrared Spectroscopic Study of Surface Diffusion to Surface Hydroxyl Groups on Al₂O₃:2-Chloroethylethyl Sulfide Adsorption Site Selection", *Langmuir*, 16, 2237-2241 (2000).
- F. Rubio-Marcosa, C.V. Manzanoc, J.J. Reinoso, I. Lorite, J.J. Romero, J.F. Fernández, M.S. Martín-González, "Modification of optical properties in ZnO particles by surface deposition and anchoring of NiO nanoparticles" *J. Alloy. Compd.*, 509, 2891-2896 (2011)
- M. S. Martín-González, J. F. Fernández, F. Rubio-Marcos, I. Lorite, J. L. Costa-Krämer, A. Quesada, M. A. Bañares, and J. L. G. Fierro "Insights into the room temperature magnetism of ZnO/Co₃O₄ mixtures" *J. Appl. Phys.*, 103, 083905 (2008).
- M.S. Martín-González, M.A. García, I. Lorite, J. L. Costa-Krämer, F.R. Marcos, N. Carmona, and J.F. Fernández, "A Solid-State Electrochemical Reaction as the Origin of Magnetism at Oxide Nanoparticle Interfaces" *J. Electrochem. Soc.* 157, 3, E31-E35 (2010).

Recibido: 14/01/2011
Aceptado: 01/04/2011