

Determinación experimental de la sección isoterma de 1300° C del Sistema CaO – Al₂O₃ – CoO

L. M. TORRES-MARTÍNEZ,* MA. E. ZARAZÚA MORÍN,* B. A. VÁSQUEZ MÉNDEZ**

* Dpto. de Ecomateriales y Energía, Instituto de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería Civil, U.A.N.L. México.

** Dpto. Química de los Materiales, Facultad de Ciencias Químicas, U. A. N. L. México

Se ha estudiado el *subsolidus* del sistema CaO-Al₂O₃-CoO estableciendo la existencia de nueve triángulos de compatibilidad en estado sólido. Se ha encontrado una fase de fórmula Ca₃CoAl₄O₁₀ isoestructural a Ca₃MgAl₄O₁₀. Se ha establecido la existencia de soluciones sólidas de Co en CaO, de Ca en CoO y en CoAl₂O₄. Se ha observado la formación de fases con diversos colores en función de la zona del diagrama. Al sustituir Co por otros cationes bivalentes (Sr, Ba, Mn, Ni, Cu, Cd, Sn y Pb) no se encontraron nuevas fases.

Este estudio presenta los resultados más relevantes en relación con la línea de investigación del uso de materiales alternos. La relevancia se enfoca en mantener la estabilidad de un nuevo compuesto en la matriz de algún proceso tecnológico, como por ejemplo el proceso del cemento, en el cual pueden ser incorporados desechos industriales como materias primas y combustibles alternos.

Palabras clave: diagramas de fase, materiales alternos, nuevas tecnologías.

Experimental Establishment of the 1300° C Isothermal Section within the CaO – Al₂O₃ – CoO Ternary System

The *subsolidus* of the system CaO-Al₂O₃-CoO has been studied. Was established the existence of nine compatibility triangles. It had been found a phase Ca₃Al₄CoO₁₀ isoestructural to Ca₃MgAl₄O₁₀. Solid solutions of CaO, CoO and CoAl₂O₄ were determined. Color variation on different samples was observed as function of the phase diagram region.

When Co was substituted for other bivalent cations (Sr, a, n, Ni, Cu, Cd, Sn and Pb), were not found new phases.

This study depicts the most outstanding results concerning the alternate materials research line. The importance focused on the stability of the new compound into the matrix of other materials from some technological processes such as the cement one, into which industrial wastes can be incorporated as alternate raw materials and fuels.

Keywords: Phase diagrams, alternate materials, new technologies

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el interés por la ciencia y la tecnología de los materiales ha crecido de forma inusitada a causa de las demandas que han surgido por resolver los diversos problemas de tipo energético, de reutilización de desechos industriales, de contaminación ambiental y ecológica que en general se presentan a escala regional y mundial. El desarrollo de estas tecnologías es consecuencia de la mayor eficiencia y competitividad económica que han tenido los sectores productivos y de protección a la naturaleza⁽¹⁾ al grado de que en la actualidad la difusión de líneas de investigación de nuevos materiales, como las cerámicas avanzadas y/o cerámicas de alta tecnología, vendrán a revolucionar la tecnología mundial del siglo XXI⁽²⁾.

Por otro lado, hay un uso extendido de materias primas alternas como una opción para la disminución de desechos⁽³⁻⁵⁾ que por su origen pueden contener en menor o mayor proporción elementos tóxicos, principalmente metales pesados, de los cuales es importante saber cómo o de qué

manera actúan y cómo modificar sus propiedades en los nuevos productos^(6,7). Entre algunos de los elementos de interés se encuentran el Ni, Mg, Mn, Cd, Co, Zn, Pb, Sn, Cr, Ba y Cu.

Hoy en día el interés en incorporar desechos de metales pesados en materiales con propiedades estables se debe a que pueden ser reutilizados como materias en procesos industriales.

Los elementos tóxicos, en especial los metales pesados, dependiendo de su origen y su generación en los residuos industriales, han creado la preocupación y necesidad de realizar nuevos estudios basados en diagramas de equilibrio de fases debido a la información que éstos proporcionan al sector industrial y específicamente al de los materiales cerámicos.

En particular se desea incorporar desechos industriales peligrosos (metales pesados) en materiales altamente refractarios que tengan propiedades estables, tales como

los óxidos de calcio y aluminio, para ser reutilizados posteriormente como materias primas alternas en procesos industriales⁽⁶⁾. Los estudios sobre el sistema CaO-Al₂O₃-MO, donde M representa un metal pesado divalente, son escasos y sólo se conocen los relacionados con Ni⁽⁹⁾, Zn⁽¹⁰⁾ y Mg⁽¹¹⁾. El sistema con M=Zn ha sido estudiado con detalle por su importancia en la estabilización de materias primas de desecho del cemento⁽¹⁰⁾. Además, se han reportado como compuestos ternarios en este sistema los compuestos Ca₃ZnAl₄O₁₀, Ca₆Zn₂Al₄O₁₀, Ca₃Zn₃Al₄O₁₅ y Ca₁₄Zn₆Al₁₀O₃^(10,12).

Cabe mencionar que mezclas de óxidos ricos en cobalto con óxidos de aluminio y los óxidos de silicio son usados ampliamente como aditivos para vidrios coloreados en la industria cerámica; y en el vidrio se utilizan para crear matices azules y para enmascarar las tonalidades verdosas del vidrio y porcelana causadas por impurezas de hierro^(13,14). Estos compuestos se caracterizan por tener una alta estabilidad con respecto a la luz, medio ambiente, alta temperatura y sustancias químicas⁽¹⁵⁻¹⁷⁾.

El cobalto presenta propiedades físicas y químicas similares a las de los metales Mg, Zn y Ni, como son el radio iónico, el punto de fusión, la estructura cristalina y el estado de oxidación entre otras, por lo que existen condiciones para encontrar un comportamiento similar con este elemento. En este trabajo se estudiará el comportamiento del cobalto como óxido en la matriz de los aluminatos de calcio⁽¹⁸⁻²⁰⁾.

Sólo un número muy limitado de estudios sobre el sistema ternario CaO-Al₂O₃-MO ha sido llevado a cabo. En particular el sistema con M = Mg ha sido estudiado por estar relacionado con su ocurrencia geológica y su uso en los procesos de la industria cerámica^(11,21-30), así como para determinar las fases que se incorporan durante la formación del cemento de alta alúmina.

Varios compuestos ternarios de este sistema han sido detectados, tales como: Ca₃MgAl₄O₁₀, la fase metaestable Ca₇MgAl₁₀O₂₃^(11,24), Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆ y CaMg₂Al₁₆O₂₇, éstos dos últimos en la región rica de aluminio^(27, 30).

Las investigaciones realizadas por Parker y Rayder⁽²⁸⁾ indicaron la posible existencia de un compuesto cuaternario de composición 6CaO-4Al₂O₃-MgO-SiO₂. Welch⁽¹¹⁾ sintetizó este compuesto y determinó por análisis de microscopía de alta temperatura que la composición real era 7CaO.5Al₂O₃.MgO (7:5:1), con propiedades ópticas y resultados de rayos X muy similares a las de la fase cuaternaria. El estudio de las rutas de cristalización en este sistema sugiere la presencia de una segunda fase para la cual se propone una composición inicial de 3CaO.2Al₂O₃.MgO (3:2:1). Sin embargo, al tratar Welch de sintetizarla encontró que la composición 3:2:1 era más completa y la definió como 25CaO.17Al₂O₃.8MgO (25:17:8).

Posteriormente, A.J. Majumdar^(21,22) realizó un estudio exhaustivo del diagrama ternario CaO-Al₂O₃.MgO y determinó la existencia de las fases con composiciones 3CaO.2Al₂O₃.MgO (3:2:1) y 7CaO.5Al₂O₃.MgO (7:5:1) en lugar de la 25:17:8 propuesta por Welch⁽¹¹⁾. La primera composición (3:2:1) es estable con la presencia de una fase metaestable aún no conocida y la otra (7:5:1) es considerada no estable por la presencia de CaO-Al₂O₃ como una segunda.

Majumdar encontró además un punto eutéctico entre MgO, Ca₃Al₂O₈ y Ca₁₂Al₁₄O₃₃ con una composición de 46.40% de CaO, 47.85% de Al₂O₃ y 5.75% de MgO a una temperatura de 1321± 3°C determinado por microscopía electrónica de

alta temperatura. Confirmó también que los dos compuestos ternarios (3:2:1 y 7:5:1) y la fase cuaternaria (6CaO-4Al₂O₃-MgO-SiO₂), descritas inicialmente por Parker y Ryder⁽²⁸⁾, tienen las mismas propiedades ópticas y cristalográficas de rayos X y que además pueden poseer estructuras cristalinas muy similares, las cuales sólo se pueden distinguir por la longitud del parámetro a₀ de su respectiva celda unitaria.

Un estudio termodinámico del sistema CaO-Al₂O₃-MgO efectuado por Krumar y Kay⁽²⁹⁾ llevó a M. Göbbels y col.^(25, 26) a realizar una investigación de la región rica en aluminio del sistema ternario CaO-Al₂O₃-MgO, donde encontró dos nuevas fases ternarias con fórmulas Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆ (CAM-I) y CaMg₂Al₁₆O₂₇ (CAM-II). Posteriormente A. H. de Aza y col. encontraron estos mismos compuestos, revisaron su estructura cristalina y delimitaron sus campos primarios de cristalización en el diagrama^(27, 30).

Estudios recientes⁽³¹⁾ del sistema Al₂O₃-CaO-MgO establecen experimentalmente un estudio de la sección isoplethal de CaAl₂O₄-MgO y CaAl₄O₇-MgO, donde proporcionan datos e información que sustituyen las evaluaciones de la termodinámica y optimizaciones del sistema Al₂O₃-MgO-CaO ternario realizados hasta la fecha.

Estudios previos realizados por Shirasaka y col.⁽³²⁾ han mostrado la influencia de ciertos elementos minoritarios como Cr, Cu, Zn y trazas de elementos presentes en la formación del clinker para producir cemento. Estos investigadores utilizaron materias primas alternas que contienen óxidos de calcio, aluminio, sílice y hierro y determinaron los porcentajes permitidos de estos metales para ser utilizados sin afectar el proceso.

Por otro lado, López A. y col.⁽⁹⁾ estudiaron el efecto de la incorporación de Ni en el clinker del cemento y determinaron los diagramas de fases de CaO-NiO-Al₂O₃ y CaO-NiO-Fe₂O₃. No encontraron la formación de compuestos ternarios en ninguno de los dos sistemas, sin embargo observaron regiones de soluciones sólidas en las regiones ricas en NiO y CaO y para el sistema que contiene Fe₂O₃ en la composición basada en NiFe₂O₄. Definieron además las relaciones de equilibrio entre las fases binarias de ambos sistemas en la isoterma de 1300°C.

Los diagramas binarios de los tres componentes del sistema ternario CaO-Al₂O₃-CoO están muy bien establecidos y contienen un cierto número de fases binarias. En el sistema CaO-Al₂O₃ se han identificado los siguientes compuestos binarios^(33, 34): Ca₃Al₂O₆, Ca₁₂Al₁₄O₃₃, CaAl₂O₄, CaAl₄O₇ y CaAl₆O₁₀. La presencia de humedad tiene una gran influencia en la formación y estabilidad de Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (C₁₂A₇)⁽³⁵⁾. El único compuesto encontrado en el sistema CoO-Al₂O₃ es CoAl₂O₄⁽³⁶⁾. Recientemente el Ca₃Co₂O₆ (3CaO-3Co₂O₃) ha llamado la atención por sus propiedades unidimensionales⁽³⁷⁾ y el Ca₃Co₄O₉ (3CaO-2Co₂O₃) por su gran magneto resistencia anisotrópica^(37,38), pero no se ha podido determinar si el promedio de la valencia formal del cobalto en estos compuestos es 3.

La inmovilización de residuos sólidos potencialmente peligrosos en la red cristalina de compuestos de gran estabilidad, como los aluminatos, es un tema de gran interés social, económico, industrial y ecológico⁽³⁹⁾.

La incorporación de cantidades relevantes y controladas de metales pesados como Ni, Mg, Mn, Cd, Co, Zn, Sn, Pb, Cr, Ba y Cu durante la fabricación de cementos puede originar materiales susceptibles de ser utilizados en la formulación de cementos y hormigones de obra civil⁽⁴⁰⁾.

Los diagramas de equilibrio de fases son una herramienta muy útil en el desarrollo de nuevos materiales ya que proporcionan información sobre las condiciones de reacción y estabilidad térmica de los materiales en la mayoría de los procesos industriales⁽⁴¹⁾.

En este trabajo se presenta el estudio del *subsolidus* del diagrama de fases ternario CaO-Al₂O₃-CoO a 1300°C. La fase ternaria encontrada en este estudio (Ca₃CoAl₄O₁₀) ya ha sido publicada, en donde se presentó la resolución de su estructura cristalina⁽⁴²⁾. Además, se ha comprobado experimentalmente que no se forman nuevas fases ternarias de fórmula Ca₃MA₄O₁₀ cuando M²⁺ ha sido sustituida por Sr, Ba, Mn, Ni, Cu, Cd, Sn y Pb⁽⁴³⁾.

2. PARTE EXPERIMENTAL

a) Preparación de las muestras

Para el estudio del diagrama de equilibrio se utilizaron como materias primas CoO, αAl₂O₃ y CaCO₃, todas ellas de alta pureza >99.99% y libres de humedad. Se han estudiado un total de 62 composiciones (figura 1) que se obtuvieron por pesada de 2g de las proporciones estequiométricas necesarias de cada una de las materias primas. Las mezclas obtenidas se homogeneizaron en un mortero de ágata utilizando acetona. Una vez homogeneizadas se trataron térmicamente a 900°C para asegurar la eliminación del CO₂.

Compactos de las muestras descarboxatadas fueron tratados a 1300°C en aire durante tiempos que oscilaron entre 48 y 360 horas con moliendas intermedias cada 24 horas hasta alcanzar el equilibrio. La molienda y posterior compactación de las muestras facilitaron un contacto más íntimo entre las partículas, la difusión de los iones aseguró una homogeneidad composicional y aceleró los procesos de reacción facilitando la consecución del equilibrio entre las fases.

Se consideró que se había alcanzado el equilibrio cuando se obtuvieron resultados coincidentes, constancia de parámetros de red y obediencia a la regla de las fases, después de dos tratamientos térmicos consecutivos. Todas las reacciones fueron llevadas a cabo en crisoles de Pt y en atmósfera de aire. En todos los casos se congeló el equilibrio mediante enfriamiento brusco desde la temperatura de reacción en hielo. Se siguieron procedimientos similares para los sistemas CaO-Al₂O₃-M²⁺O, con M²⁺ = Sr, Ba, Mn, Cu, Cd, Sn y Pb.

b) Caracterización de las muestras

Difracción de rayos X en polvos.

La caracterización de las muestras se llevó a cabo por difracción de rayos X, método de polvos, utilizando un difractómetro Siemens D-5000 con radiación monocromática CuK_α (λ=1.5418 Å) y filtro de Ni. El registro se realizó entre 15 a 65 (2θ) con un paso de 0.01° y un tiempo de 0.3s utilizando monocromador y girando el goniómetro a una velocidad de 15 rpm. La energía del tubo fue de 35kV y 25mA. La identificación de las fases se hizo por comparación con los patrones que se encuentran en el archivo de datos JCPDF (Joint Committee Diffraction Powder Standard Files)⁽⁴⁴⁾.

Densidad

La densidad real de la fase F se determinó por el método de desplazamiento de tolueno según la norma ASTM 0699⁽⁴⁵⁾.

c) Caracterización del color

El color de una selección de muestras fue determinado por colorimetría en el espacio de color en L*a*b* usando espectroscopia UV-V y reflectancia difusa en el intervalo de 360 ≤ λ/nm ≤ 750 con un espectrofotómetro Macbeth CE-7000^o.

Las mediciones se realizaron con una fuente que simula la luz del día D65 y un observador 10°. Las coordenadas L*a*b* dieron los parámetros de color en una posición específica en una ecuación tridimensional de espacio de color CIELAB⁽⁴⁶⁾ el cual está basado en el sistema de Eclairage de la Comisión Internacional (CIE).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Diagrama de fases del sistema CaO-Al₂O₃-CoO

De los resultados obtenidos por el estudio mediante DRX de las muestras en equilibrio se estableció la existencia de una fase ternaria dentro del sistema, que se denominó F, con relación molar 3CaO:2Al₂O₃:CoO (3:2:1), misma que ya ha sido reportada con su caracterización e identificación⁽⁴³⁾. En el presente trabajo se establecieron las siguientes áreas de compatibilidad en estado sólido:

- No. I CaAl₂O₄-Ca₃Al₂O₆-CoO (CaO-C₃A-CoO)
- No. II Ca₃Al₂O₆-Ca₁₂Al₁₄O₃₃-CoO(C₃A-C₁₂A-CoO)
- No. III Ca₁₂Al₁₄O₃₃-CoO-F (C₁₂A₇-CoO-F)
- No. IV Ca₁₂Al₁₄O₃₃-CaAl₂O₄-F (C₁₂A₇-CA-F)
- No. V CaAl₂O₄-CoO-F (CA-CoO-F)
- No. VI CaAl₂O₄-CoO-CoAl₂O₄ (CA-CoO-CoA)
- No. VII CaAl₂O₄-CoAl₂O₄-CaAl₄O₇ (CA-CoA-CA₂)
- No. VIII CaAl₄O₇-CoAl₂O₄-CaAl₁₂O₁₉ (CA₂-CoA-CA₆)
- No. IX CaAl₁₂O₁₉-CoAl₂O₄-Al₂O₃ (CA₆-CoA-Al₂O₃)
- No. X C_{1-x}Ca_xAlO y muy pequeño
- No. XI Ca_{1-y}Co_yAlO z muy pequeño
- No. XII Co_{1-n}Al_{2+m}Ca_nO4 n muy pequeña

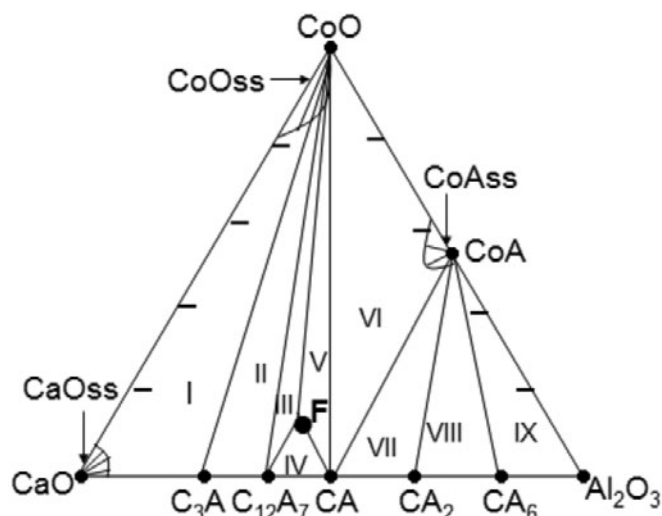


Figura 1: Diagrama de fases del Sistema CaO-Al₂O₃-CoO estudiado en atmósfera de aire a una temperatura máxima de 1300°C.

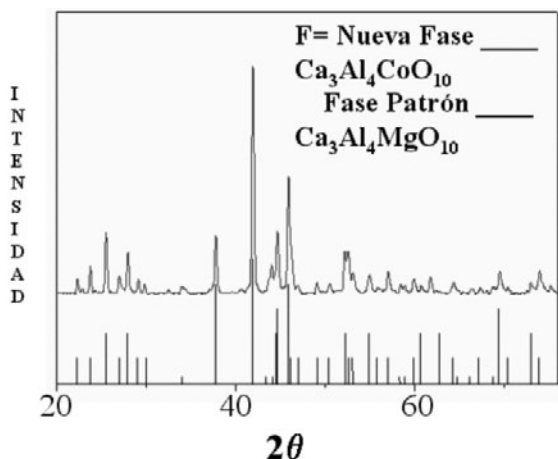


Figura 2: Patrón de la fase $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$ con la fase comparativa.

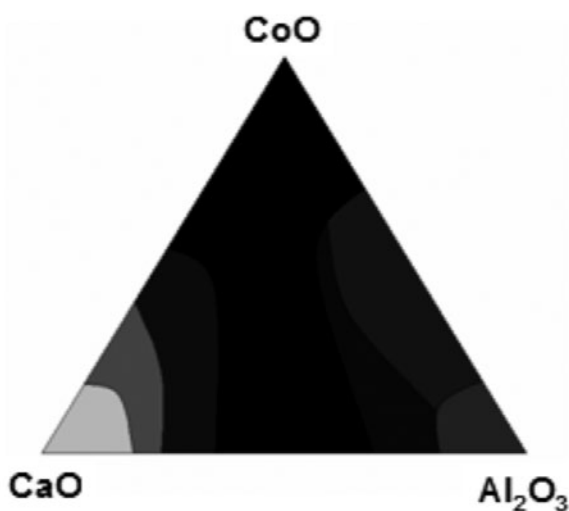


Figura 3: Diagrama con las diversas tonalidades de color obtenidas para los diferentes rangos de composiciones estudiados.

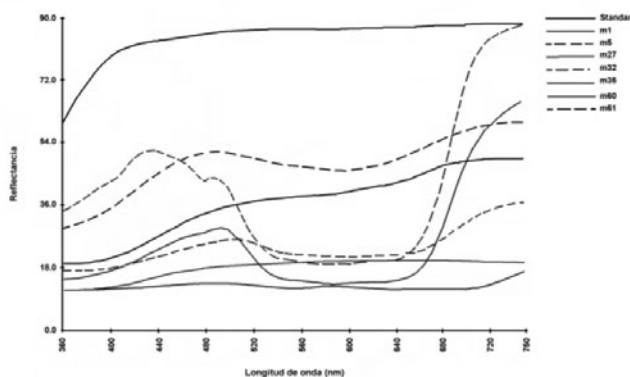


Figura 4: Curvas espectrales de la variación de color, representativas de las diferentes composiciones del sistema ternario $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CoO}$.

En la figura 1 se ha representado la fase ternaria $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$ y los 9 triángulos de compatibilidad mencionados a 1300°C . Así mismo se ha establecido con base en medidas de parámetro de red y a los datos de equilibrio la formación de soluciones sólidas limitadas en las zonas de elevado contenido en CaO y CoO y en CoAl_2O_4 .

También se ha registrado que una muy pequeña cantidad de Al puede disolverse en las soluciones sólidas de Co en CaO y de Ca en CoO .

Igualmente se ha observado que entra una pequeña cantidad de Ca en la red cristalina de fase espínela (CoAl_2O_4). No se ha detectado la presencia de fases tipo $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ ó $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$.

La densidad real determinada ($4,34 \text{ g/cm}^3$) (Norma ASTM O699)⁽⁴⁶⁾ y la obtenida experimentalmente por rayos X ($3,21 \text{ g/cm}^3$)⁽⁴⁵⁾ ponen de manifiesto una diferencia entre los resultados por lo que es probable que parte del Co^{2+} se haya oxidado a Co^{3+} .

El difractograma de la fase F se muestra en la Figura 2 con el perfil del patrón de difracción de la fase $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{MgO}_{10}$ que resultó ser isoestructural a esta nueva fase F⁽⁴⁴⁾.

b) Determinación de color

En todas las composiciones estudiadas se observaron a simple vista varias tonalidades de colores (figura 3) que van desde un gris claro (en la región rica en CaO), cambiando a tonos de verde en la región comprendida entre los rangos de composiciones en % molar de CaO de 35 a 94%; de 3 a 20% en Al_2O_3 y de 3 a 25% en CoO , mientras que en la vecindad de la fase $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{CoO}_{10}$ el color tiende a negro.

Las muestras hacia la región rica en Al_2O_3 y CoAl_2O_3 adquieren diferentes tonalidades del azul como se observa frecuentemente en compuestos que contienen cobalto, los colores tienden a ser definidos y oscuros ya que no rebasan el 50% en L^* , con respecto al estándar, lo que se puede ver en la figura 4 donde se han graficado muestras representativas en una curva espectral de acuerdo a los valores obtenidos de los campos coloreados.

4. CONCLUSIONES

- Se ha determinado el diagrama de equilibrio de fases del sistema ternario $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ en la isoterma de 1300°C .
- Se encontraron nueve triángulos ó áreas de compatibilidad.
- Se estableció la extensión de tres regiones de soluciones sólidas ricas en CaO , CoO y CoAl_2O_4 .
- Se encontró una nueva fase ternaria con fórmula estequiométrica $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{CoO}_{10}$ isoestructural a $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{MgO}_{10}$ ⁽⁴³⁾.
- Se han encontrado variaciones en el color de las diferentes muestras, desde gris claro en el área del CaO , verde oscuro, negro y azul oscuro en el entorno del $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{CoO}_{10}$ y negro intenso en la zona de alta Al_2O_3 .

BIBLIOGRAFÍA

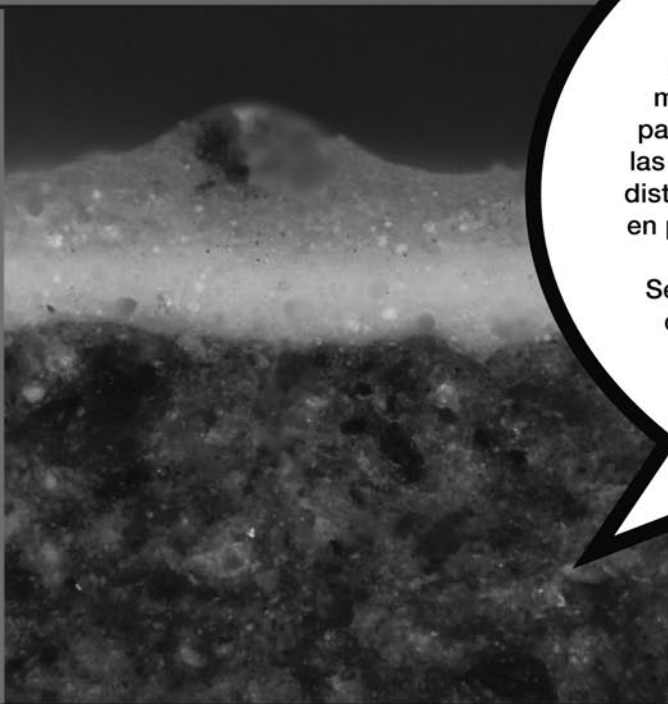
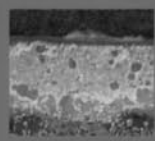
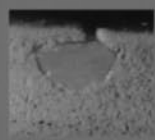
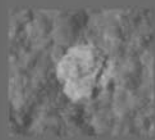
1. M. Martín Lomas y J. Veciana Miró. "Diseño y preparación de nuevos sistemas moleculares", Revista El Futuro de la Química en Europa, 31. (2000).
2. L. López Mateo. "La Nueva Cerámica una Revolución Tecnológica del siglo XXI". Revista Química No. 20, 53, (2000).
3. A. Encino Landero. "Disminuir y Minimizar Residuos". Revista Manufactura, Enero, 16, (1996).
4. Francis, A.A. "Non-isothermal crystallization kinetics of a blast furnace slag glass". Journal of the American Ceramic Society. 88:1859-1863. (2005).
5. Bernardo, E., Varraso, M., Cadamuro, F. and Hreglic, S. "Vitrification of wastes and preparation of chemically stable sintered glass-ceramic products". Journal of Non-Crystalline Solids. 352:4017-4023. (2006).
6. D.M. La Graga, L.P. Buckingham y J.C. Evans. "Gestión de Residuos Tóxicos", McGraw Hill, Madrid, (1996).
7. Henao, Hector; Itagaki, Kimo. "Metallurgical and Materials Transactions B", Volume 35, Number 6, pp. 1041-1049 (9), (2004).
8. F. Kreith. Handbook of Solid Waste Management, McGraw Hill, 1994, 1.1 t 15.1.
9. P. López Armendáriz. "Efecto de la incorporación de níquel en el clinker del cemento". Tesis de Maestría en Ingeniería Cerámica. UANL, Octubre, (1997).
10. H. Bolio Arceo y F.P. Glasser. "Zinc Oxide in Portland Cement, Part I, System CaO-ZnO-Al₂O₃ y CaO-ZnO-Fe₂O₃". J. Advances in Cement Research 10, 25; (1998).
11. J.H. Welch Nature, "Revised Equilibrium Diagram for the System Al₂O₃-SiO₂". 191, 559, (1961).
12. H. Bolio et al., "Zinc Oxide in Portland Cement, Part II, Hydration, Strength Gain and Hydrate Mineralogy". Journal Advances in Cement Research, Vol 12 No. 4, 173-179, (2000).
13. V.D. Babanyagre, T.I. Timoshenki, A.M. Ilynets and V.M. Shamshurov, "Synthesis and some properties of new three-component compounds in the CaO-Al₂O₃-SnO₂ system". Powder Diffract. 12, 22 (1997).
14. R.K. Mason. "Measurement of the profiles of super-smooth the surfaces using optical interferometry", Ceram. Bull. 40, 5 (1961)
15. J. Alarcon, P. Escibano and R. Ma. Marin. "Action of additives on quartz solution in the firing of porcelain bodies", Trans. Br. Ceram. Soc. 84, 170, (1985).
16. S. Djambazov, I Ivanova, A. Yoleva and N. Nedelchev, "Sintering of aluminum titanate-barium titanate ceramics prepared from sol gel powders", Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 46, 1, 35-40, (2011).
17. F. Singer and S.S. Singer, "Industrial Ceramics" Chapman & Hall, Ltd, London, (1963).
18. G.N. Schrauzer, "Cobalt in Metals and their compounds, in the environment occurrence, analysis and biological relevance". Editor Merian E.L. Editorial VCH Verlagsgesellschaft Weinheim Alemania, 879, (1991).
19. R.D. Shannon, "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides". Acta Crystallogr. A 32, 519 (1976).
20. D.R. Lide, Handbook of Chemistry and Physics. 71st Edition CRC Press, Inc. (1990-1991).
21. A.J. Majumdar. "The Quaternary Phase in High-Alumina Cement. Part I". Trans. Br. Ceram. Soc. 63, 347 (1964).
22. A.J. Majumdar. "The Quaternary Phase in High-Alumina Cement. Part II". J. Am. Ceram. Soc. 64, 416 (1965).
23. F.P. Glasser and J. Marr. "Separate compounds of the composition C₆A₄MS" Trans Br. Ceram. Soc. 74, 113 (1975).
24. B. Hallstedt. "Thermodynamic Assessment of the CaO-MgO-Al₂O₃ System". J. Am. Ceram. Soc. 78, 193 (1995).
25. M. Göbbels, E. Woermann and J. Jung. "The Al-rich part of the system CaO-Al₂O₃-MgO. Part I: Phase relationships", J. Solid State Chem. 120, 358 (1995).
26. I. Nobou, M. Göbbels and Y. Matsui. "The Al- Rich Part of the System CaO-Al₂O₃-MgO (Part II). Structure Refinement of two new Magnetoplumbite-Related Phases". J. of Solid State Chem., 120, 364 71(1995).
27. A.H. De Aza, J.E. Iglesias, P. Pena and S De Aza. "Ternary system: Al₂O₃-MgO-CaO: Part II, Phase Relationships in the Subsystem Al₂O₃-MgAl₂O₄-CaAl₂O₇". J. Am. Ceram. Soc. 83, 919 (2000).
28. T.W. Parker and J.F. Ryder. "The relationship between mineral composition and strength development of high alumina cement" The Cement and Concrete Association., 485, (1954).
29. R.V. Krumar and D.A.R. Kay. "Thermodynamic stabilities of some β and β' aluminas" Metall. Trans. B. 16, 107, (1985).
30. A.H. De Aza, P. Pena and S. De Aza. "Ternary System Al₂O₃-MgO-CaO: I, Primary Phase Field of Crystallization of Spinel in the Subsystem MgAl₂O₄-CaAl₂O₇-CaO-MgO", J. Am. Ceram. Soc. 82, 2193 (1999).
31. Duran T., Serena S., Pena P., Caballero A., De Aza S., De Aza AH. "Experimental establishment of the CaAl₂O₇-MgO and CaAl₂O₇-MgO isoplethal". Journal of The American Ceramic Society, 91, 2, 535-543; (2008).
32. T. Shirasaka, S. Hanehara and H. Uchikawa. "Influence of six minor and trace elements in raw materials on the composition and structure of clinker". World Cement. March, 102, (1996).
33. R.W. Nurse, J.H. Welch and A. J. Majumdar, "The 12CaO.7Al₂O₃ Phase in the CaO-Al₂O₃ System," Trans. Br. Ceram. Soc. 64, 323 (1965).
34. B. Hallstedt. "Assessment of the CaO-Al₂O₃ System", J. A. Ceram. Soc. 73, 15 (1990).
35. D.A. Jerebisov and G.G. Mikhailov. "Phase diagram of CaO-Al₂O₃ system", Ceram. Int. 27, 25 (2001).
36. C. Brisi and P. Rolando. "The calcium oxide-cobalt II oxide-oxygen system" Ann. Chim. 58, 6, 676-683 (1968).
37. H. Fjellvag, E. Gulbrandsen, S. Aasland, A Olsen and B.C. Hauback, "Crystal structure and possible charge ordering in one-dimensional Ca₃Co₂O₆", J. Solid State Chem., 124, 190 (1996).
38. S. Aasland, H. Fjellvag and B. Hauback, "Graphene made easy: high quality, large-area samples", Solid State Commun. 101, 187 (1997).
39. A. C. Masset, C. Michel, A. Maignan, M. Hervieu, O. Toulemonde, F. Studer, B. Raveau, J. Hejtmanek, "Misfit-layered cobaltite with an anisotropic giant magnetoresistance Ca₃Co₂O₆", Phys. Rev. B 62, 1, 166-175 (2000).
40. M.G. Caligaris; N.E. Quaranta, R.E. Caligaris, "Trends in Argentina's Ceramic Industries". The American Ceramic Society Bulletin: 76 (3), 69-72; (1997).
41. F. Kreith. Handbook of Solid Waste Management. McGraw Hill, 1.1 y 15.1; (1994).
42. A.R. West, "Solid State Chemistry and its Applications", Editorial John Wiley and Sons; (1996).
43. B. Vázquez et al., "Subsolidus Phase Equilibria in the System CaO-Al₂O₃-CoO and the Crystal Structure of Novel Ca₃CoAl₁₀O₁₀". Journal of Solid State Chemistry, 166, 191-196; (2002).
44. JCPDF, Joint Committee on Powder Diffraction Standard Files. International Centre for Diffraction Data (1997).
45. Norma Oficial, ASTM 0699. Método Técnico Analítico Estandarizado para medir Densidad real, por desplazamiento de Tolueno.
46. ASTM-E 308-80, «Standard Test Method for Computing the Colours of Objects by Using the CIE System" February, (1991).

Recibido: 06/07/2010

Aceptado: 01/04/2011

Introducción a los esmaltes cerámicos

Introducción
a los **esmaltes cerámicos**



Editado por: Alicia Durán

Roberto Hevia, Nicola Centritto,
Pedro Antonio Novaes de Oliveira,
Adriano Michel Bernardín, Alicia Durán

Los objetivos de la obra, pensada como un libro de introducción a los esmaltes y vidriados cerámicos, han sido resumir el estado actual de la técnica del esmaltado en todas sus facetas, desde las materias primas a las técnicas de deposición, pasando por la producción y formulación de las fritas, las propiedades del esmalte en las distintas etapas del procesamiento y los ensayos en planta para su control.

Se han incluido temas de máxima actualidad como los esmaltes vitrocerámicos y el origen de los distintos tipos de defectos que afectan a estos recubrimientos.

PVP
29 €

AS&Adesign

www.asadesign.com
libros@asadesign.com

tel. 964 34 09 36
fax. 964 25 65 83

