

UTILIZACIÓN DE POLVO RESIDUAL DE ACERÍA ELÉCTRICA COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE TEJUELAS CERÁMICAS

N.E. Quaranta^(*), N.S. Lalla⁽⁺⁾

Grupo de Estudios Ambientales - GEA, Facultad Regional San Nicolás,
Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

*Investigador CIC. +Becario ANPCyT.

E-mail: nquaranta@frsn.utn.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar la factibilidad de utilización de polvo de aspiración de horno eléctrico (EAFD) de la industria siderúrgica como sustituto parcial de arcillas minerales de uso industrial, para la producción de ladrillos o tejas cerámicas para construcción civil.

En primer lugar fueron caracterizados los materiales granulados por diversas técnicas. Se analizaron las características morfológicas y microestructurales mediante microscopía óptica (OM), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis químico semicuantitativo por análisis dispersivo de energía de rayos X (EDS).

Se analizaron los resultados y se determinaron las condiciones de proceso que permiten mantener los estándares requeridos por los productos y procesos comerciales.

Tomando como base la arcilla mineral, se conformaron tejas con diferentes porcentajes del residuo siderúrgico, agregando 10, 20, 30, 40 y 50% del residuo.

Para establecer la aptitud técnica de los productos cocidos, se midieron las propiedades mecánicas, determinándose la resistencia a la compresión y flexión, la absorción de agua ligada a la porosidad abierta y las características microestructurales con técnicas similares a las utilizadas para el material granulado.

Finalmente, para establecer la aptitud medioambiental que valida el producto y la tecnología de reciclaje para este residuo, se realizaron ensayos de lixiviación de las muestras en polvo y de los productos sinterizados.

Tópico 4: Materiales Cerámicos

Palabras clave: residuos siderúrgicos, cerámicos, lixiviación.

1. INTRODUCCIÓN

El uso correcto de los recursos naturales de manera que éstos sean perdurables en el tiempo, junto con el aprovechamiento de otros recursos tales como los descartes industriales mediante el reciclado, tiene una importancia fundamental para la conservación del medio ambiente, permitiendo además disminuir el consumo energético y las emisiones contaminantes en comparación con los procesos tradicionales.

Este trabajo continúa con las investigaciones del grupo sobre el reciclado de polvo de acería de arco eléctrico del proceso siderúrgico, para utilizarlo como agregado en la fabricación de ladrillos y tejas de arcilla roja mineral para uso civil [1].

En el proceso de aceración por arco eléctrico se generan gases, tanto en la atmósfera interna del horno como así también en el baño de acero líquido, por las reacciones de decarburación, y dentro de la escoria buscando el espumado de las mismas. Estos gases son colectados por un sistema de aspiración y al escapar del horno llevan consigo numerosas partículas finas sólidas y líquidas. Éstas están compuestas de elementos provenientes del acero, de la escoria, finos de la carga (chatarra de acero y pellets de hierro pre-reducido, fundentes, etc.) y del refractario. Este polvo es considerado un residuo sólido peligroso por las legislaciones medioambientales de los principales países y recibe el tratamiento correcto para su disposición o reciclaje [2] en función de que en su composición se puede encontrar mayormente hierro y zinc con menores porcentajes de plomo y cadmio entre otros.

El contenido de zinc y plomo tiene su origen en la chatarra galvanizada cargada en el horno de arco eléctrico, la mayoría del zinc de la chatarra de acero termina en los polvos y humos debido a su muy baja solubilidad en el baño de acero y en la escoria, especialmente porque su presión de vapor es más alta que la presión de vapor del hierro a las temperaturas siderúrgicas. El vapor de zinc es arrastrado fuera del horno con los otros gases o componentes particulados generados durante las reacciones de aceración, produciendo compuestos como ZnO y $ZnFe_2O_4$ [3].

Debido a su origen, la cantidad generada por tonelada de acero colado va a variar en cada planta en función de diversos factores como el mix de carga y las condiciones de proceso, pero se estima que se originan de 12 a 25 kg/ton de acero colado. La generación mundial de polvo de horno de arco eléctrico, EAFD, por su sigla en inglés, está estimada en alrededor de 3,7 millones de toneladas anuales [3].

Una particularidad de algunos países latinoamericanos es el bajo contenido de zinc en el polvo. Esto sucede en plantas con producción de hierro esponja y cargas menores de chatarra [2].

De acuerdo con Leclerc [4], cuando algunas partículas de zinc están en contacto con las partículas de hierro a alta temperatura en una atmósfera oxidante, la formación de la ferrita de zinc va a ocurrir en el horno y en el sistema de aspiración. El problema es que el zinc no sale solo, otros elementos se evaporan y son colectados por el sistema de aspiración originando el EAFD. Investigaciones publicadas por Birat et al [5] de las condiciones de proceso y por A.G. Guézennec et al [6] sobre el análisis morfológico del polvo de horno eléctrico muestran que el proceso de formación del polvo tiene lugar en dos etapas: primero los precursores de emisión de polvo en el interior del horno, es decir, vapores, pequeñas gotas metálicas y partículas sólidas, y segundo, la conversión de estos precursores dentro del polvo por aglomeración o transformaciones fisicoquímicas [7].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Preparación de las muestras

Las materias primas que se utilizaron para la preparación de las muestras fueron el polvo de aspiración de horno eléctrico de arco (EAFD) y arcilla mineral. El EAFD es generado en una planta siderúrgica integrada argentina que utiliza la vía de reducción directa-hornos de arco eléctrico. La arcilla comercial es provista por una industria cerámica ubicada en la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe y se extrae de canteras de la zona de Olavarría, provincia de Buenos Aires, compuesta de una mezcla de arcillas minerales sin contenido de materia orgánica.

Se prepararon mezclas con 0, 10, 20, 30, 40 y 50% de EAFD con un contenido de humedad de 8% y fueron conformadas en un molde de aproximadamente 40 mm x 70 mm con una presión uniaxial de 25 MPa aplicada durante un minuto. Luego fueron secadas a temperatura ambiente por 4 días antes de su cocción, simulando las condiciones industriales de fabricación de estos productos cerámicos.

Las probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico que consistió de un calentamiento hasta 950°C, manteniéndose esta temperatura durante 3 horas. Por último las muestras fueron enfriadas hasta temperatura ambiente dentro del horno. La determinación de la temperatura máxima de tratamiento se realizó utilizando diagramas ternarios, teniendo en cuenta las composiciones químicas de los materiales, los componentes mayoritarios de las mezclas y la presencia minoritaria de compuestos fundentes y refractarios.

2.2 Caracterización de materias primas y productos

Diversas técnicas fueron utilizadas para caracterizar los materiales de partida y los productos compactos cocidos: microscopía óptica (OM) y electrónica de barrido (SEM), dispersión de energía de rayos X (EDS), fluorescencia de rayos X (XRF), espectrometría de emisión en plasma (ICP-OES), distribución granulométrica, porosidad, resistencia a la compresión y a la flexión y análisis de elementos lixiviados.

Las muestras cocidas fueron cortadas, y trozos de aproximadamente 1 cm³ fueron embutidos en resina y pulidos hasta grano 1 µm para su observación microscópica.

Las observaciones ópticas fueron realizadas con un equipo Zeiss-Axiotech, con cámara marca Donpisha 3CCD, y digitalizador de imágenes. Los análisis de SEM y EDS se llevaron a cabo con un microscopio electrónico de barrido Philips 515, con analizador dispersivo de energía (EDAX-Phoenix software).

El análisis químico de las muestras en solución y lixiviados por ICP-OES se realizaron con un equipo Perkin Elmer ICP Optima 3100 XL, mientras que el análisis químico de los sólidos XRF fue realizado con un equipo Thermo Scientific* ARL ADVANT'X XRF.

La porosidad de las muestras fue determinada según la Norma IRAM 12510. Los ensayos mecánicos se realizaron siguiendo la norma ASTM C67-03a en una máquina universal de ensayo marca Cific de 294 kN, con valores de trazabilidad. El ensayo de flexión se realiza sobre probetas a escala según la relación dimensional establecida en dicha norma con una máquina de Ensayos Digimess TG 100 DL de baja carga y alta precisión. Se analizaron los lixiviados del material en polvo y de los trozos del cerámico sinterizado siguiendo la norma USEPA 1311 TCLP y con las tejuelas enteras siguiendo la norma EA NEN 7375:2004 conocida como “ensayo de tanque”.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis químico

La composición porcentual de las materias primas, expresada como óxidos, se muestran en la Tabla 1, con fines comparativos. Para el análisis químico se utilizaron diferentes técnicas como fluorescencia de rayos X, espectrometría de emisión atómica con plasma inductivo y análisis semicuantitativo por dispersión de energía de rayos X. Los resultados obtenidos fueron similares. En la Tabla 1 se expresan los valores promedio de las diferentes técnicas.

Tabla 1. Análisis químico del residuo y de la arcilla.

Óxidos [%]															
	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	PbO	P ₂ O ₅	ppc
EAFD	0,89	7,07	4,84	5,80	3,11	2,07	6,65	2,36	46,11	11,71	---	0,15	3,55	0,36	5,32
Arcilla	18,54	---	2,98	62,73	---	4,76	1,05	---	9,13	---	0,80	---	---	---	0,60

El análisis por elementos, que incluye también al C, indica la presencia de aproximadamente un 3,3% para el caso del EAFD mientras que para la arcilla comercial no se detecta dicho elemento.

Se observan porcentajes importantes de Na, K, Ca y Mg en el residuo analizado, elementos que durante la cocción de las piezas conformadas pueden actuar como fundentes disminuyendo las temperaturas de sinterización de las mezclas residuo-arcilla.

3.2 Distribución granulométrica

El análisis granulométrico del EAFD muestra que más del 95 % de las partículas son menores de 40µm por lo que no puede analizarse por medio de tamices de mallas. Diferentes estudios anteriores se refieren a este punto pudiéndose mencionar los trabajos de Machado et al [3] donde el diámetro medio de partículas del EAFD, utilizando un equipo laser, fue de 1,88 µm, siendo el 60% del material de un tamaño entre 0,9 a 4,3µm. Esta distribución está de acuerdo a lo publicado por Mantovani et al [8] y Xia y Pickles [9] quienes mencionan que este polvo es conocido por tener una granulometría muy fina y una tendencia a aglomerarse, generando agregados de partículas muy finas. También Takano et al [10] determinaron en dos polvos de origen diferente que más del 90 % de las partículas son menores a 10µm.

En cuanto a la arcilla, presenta una distribución homogénea de partículas, aunque pueden encontrarse algunas partículas de mayor tamaño. El análisis de distribución granulométrica de esta arcilla comercial muestra que más del 70% del material presenta una granulometría menor a 75µm.

Este aspecto resulta fundamental para obtener un grado de sinterización importante a temperaturas no tan elevadas, tanto para la arcilla como para el EAFD.

3.3 Diseño de la curva de cocción

En función de la composición química de la arcilla y del EAFD y la relación de éstos modificados por los porcentajes en cada mezcla, se tomaron los tres óxidos mayoritarios para definir el diagrama ternario que más se ajusta, en este caso SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃. Una vez ubicadas las distintas mezclas, desde arcilla pura hasta la mezcla con 50% del residuo, pueden verse que todas las composiciones se encuentran en el campo de cristalización de la tridimita, con primera formación de fase líquida durante el calentamiento en el eutéctico tridimita - espinela - mullita (Fig. 1). La temperatura del Eutéctico es 1382 °C por lo que la temperatura de

sinterización tomando un 75% de ésta (en °K) sería $T_{sint} = 968,25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ahora bien, si se tiene en cuenta la cantidad de álcalis presente y el tamaño de las partículas de ambos componentes, puede seleccionarse una T de sinterización de $950 \text{ } ^\circ\text{C}$ que debería asegurar un buen grado de sinterización y ahorro energético. La velocidad de calentamiento no fue constante, sino ajustada a la utilizada en las ladrilleras industriales de la zona (aprox. $1^\circ\text{C}/\text{min}$ en todo el proceso), con mesetas a los $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ para permitir eliminar los restos de agua de mezcla y químicamente ligada (Ver Fig 2).

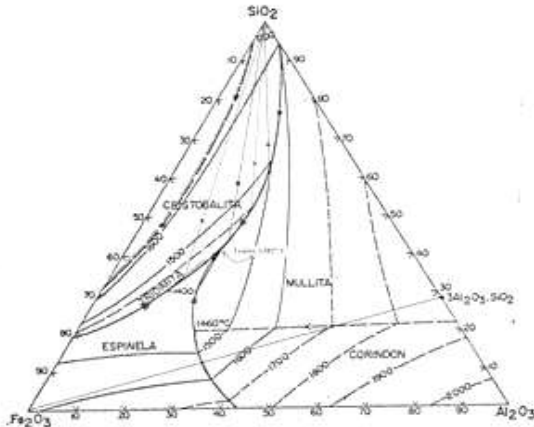


Figura 1. Diagrama ternario sílice-alúmina-férrico.

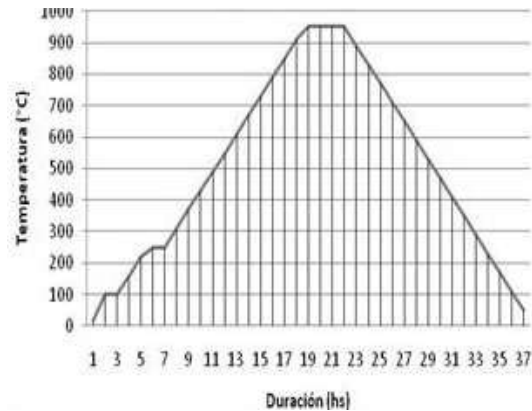


Figura 2. Curva de cocción utilizada.

3.4 Aspecto superficial de los cuerpos cocidos

En su aspecto macroscópico todas las probetas producidas resultan compactas, con un color rojizo que va haciéndose más intenso a medida que aumenta el porcentaje de EAFD agregado. Todas presentan bordes bien definidos, sin desgranamiento de la estructura, lo que indica que se ha logrado un importante grado de sinterización, sin alcanzar temperaturas cercanas a la formación de fases vítreas de los óxidos mayoritarios en cantidades importantes, lo que se presentaría como pérdida de aristas y vértices.

3.5 Variación volumétrica permanente y pérdida de peso por calcinación

Los valores de la variación volumétrica permanente, expresados como variación porcentual en volumen y las pérdidas de peso por calcinación (ppc), expresadas de forma porcentual, se presentan en la Figura 3, en donde se observa que la arcilla comercial pura tiene una contracción volumétrica superior al 7% y esta propiedad disminuye a medida que se agrega el residuo, lo cual en principio resultaría beneficioso para el proceso, llegando al 2,5 % en las muestras con contenidos de 50% del EAFD. Lo contrario ocurre con la diferencia entre el peso en verde vs. el peso cocido de estas muestras. Debe tenerse en cuenta que esta diferencia contempla parte del agua agregada durante el conformado ya que se refiere a los compactos en verde, secos a temperatura y humedad ambiente. Este comportamiento además podría deberse a la presencia en el EAFD de un 3,3% de C y una pérdida por calcinación de 5,3% de los compuestos que se volatilizan durante la cocción que llega a temperaturas superiores a $900 \text{ } ^\circ\text{C}$, compuestos que no se encuentran en la arcilla comercial, que seca y en estado granulado, presenta una pérdida por calcinación de 0,6% (ver ppc en Tabla 1).

Estudios futuros contemplan la necesidad de mediciones de gases liberados durante la cocción para determinar su composición y concentración en vías de medir su posibilidad de daño ambiental.

3.6 Porosidad y densidad de los compactos cocidos

La densidad de los compactos cocidos se presenta en la Figura 4. Como puede observarse la densidad de las muestras resulta menor, a medida que aumenta el porcentaje de descarte incorporado. La porosidad de las muestras se presenta en el gráfico de la Figura 5. Se observa una tendencia a mayores porosidades a medida que el contenido de residuo es mayor, alcanzando porosidades de aproximadamente 32% para las muestras con 50% de EAFD agregado. Estos comportamientos y tendencias se condicen con los de variación volumétrica y pérdida de peso por calcinación, y también se reflejan en las propiedades mecánicas.

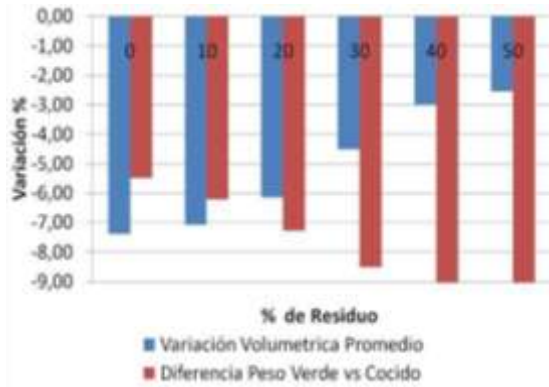


Figura 3. Variación volumétrica y ppc.

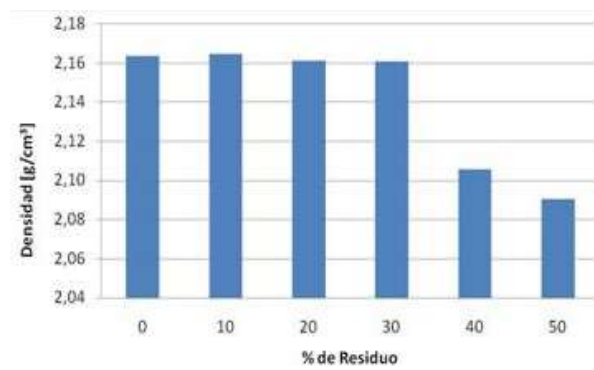


Figura 4. Densidad de los cuerpos cocidos.

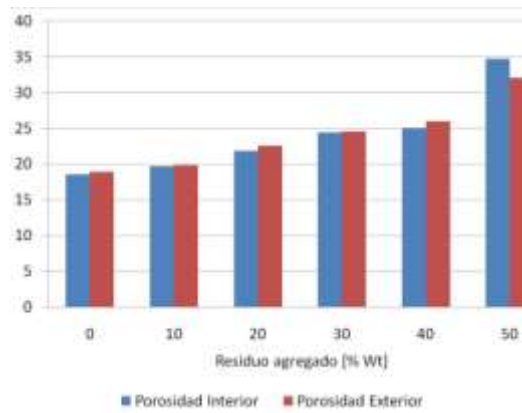


Figura 5. Porosidad abierta de muestras exteriores e interiores.

3.7 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas analizadas, resistencia a la compresión y módulo de ruptura por flexión de las muestras compactas cocidas se presentan en los gráficos de la Figura 6.

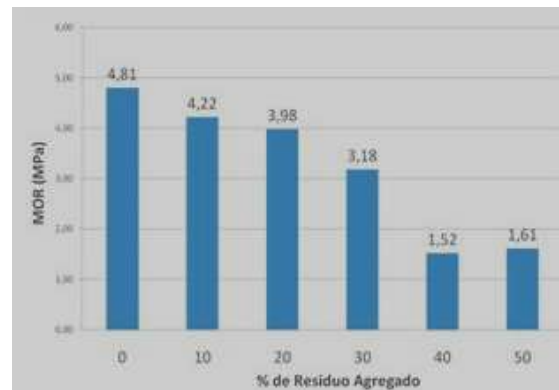
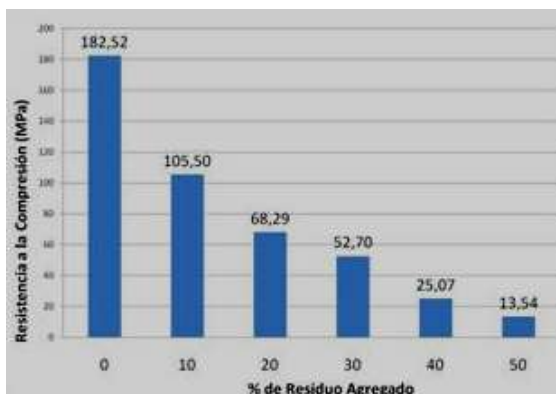


Figura 6. Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de los productos cocidos.

Se puede observar que los valores de estas propiedades tienden a disminuir a medida que los porcentajes de residuo incorporado son mayores. Es muy notable la diferencia entre el producto sin agregado del residuo y el que contiene un 50% de éste, que presenta una resistencia menor al 10% del presentado por la arcilla pura. Esto estaría relacionado con la resistencia propia de cada fase y acentuado por la porosidad total del producto reflejada en los valores de porosidad abierta y pérdida de peso durante la cocción. Aun así, en todos los casos se

supera el límite establecido por las normas para ladrillos portantes (Norma ASTM C0064 - 04A) que requieren resistencias a la compresión superiores a los 10,3 MPa.

3.8 Microscopía óptica

Se realizó la observación de la microestructura de las muestras con los diferentes porcentajes de adición del EAFD y también de la muestra de arcilla pura que fue tomada como referencia en todos los ensayos.

En el caso de la muestra sin adiciones de EAFD, puede observarse un grado de sinterización muy elevado, con poros muy pequeños y cerrados (ver Fig. 7) y una perfecta unión entre la matriz y otras partículas minerales de mayor tamaño, lo que se refleja en forma directa en las propiedades macroscópicas antes descritas.

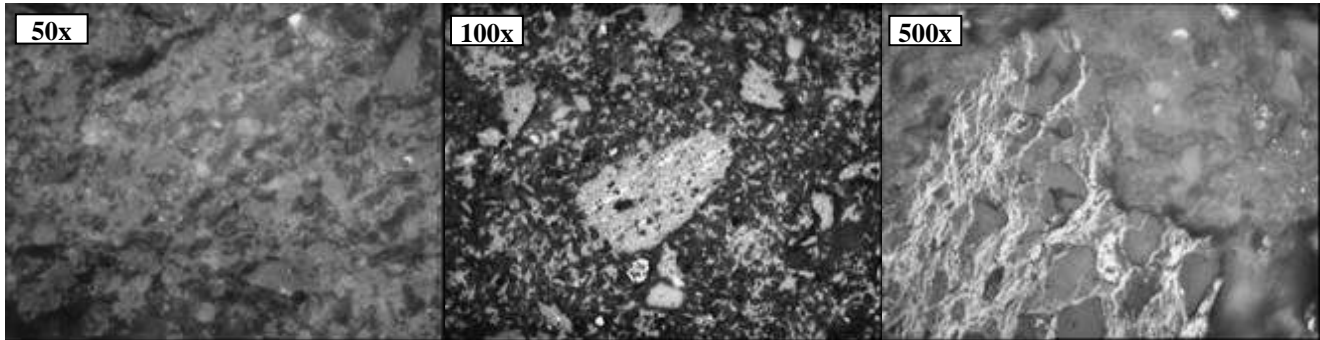


Figura 7. Micrografías OM de la muestra sin adiciones de EAFD.

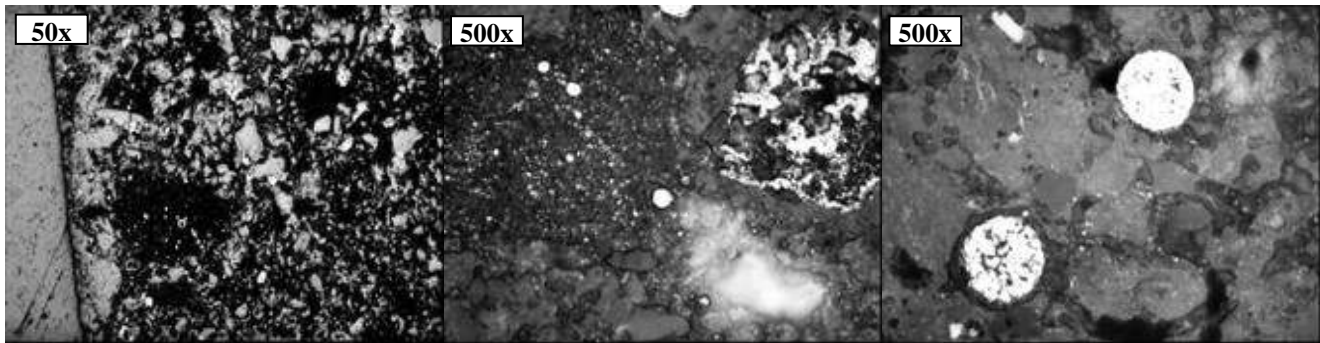


Figura 8. Micrografías OM de las muestras con incorporación del descarte.

En las muestras con 10% de EAFD se observa que el polvo de acería no se encuentra disperso totalmente en la mezcla, sino aglomerado en distintas zonas, tanto en la periferia como en el interior de la tejuela (ver Fig. 8). A magnificaciones de 500x, se aprecia que la sinterización entre las fases EAFD y arcilla es completa y no se observan discontinuidades o huecos en la interfase. Inmersas en la matriz del polvo se observan partículas grandes y pequeñas, esféricas, huecas o sólidas con morfologías y estructuras idénticas a las mencionadas por Li y Tsai [11] e identificadas como Espinelas ferríticas ($(\text{Mn}_x\text{Zn}_y\text{Fe}_{1-x-y})\text{Fe}_2\text{O}_4$), y por Machado et al [3] y Guézennec y Huber [6]. Esto pudo observarse en todas las muestras que contienen EAFD agregado.

En lo que respecta a las muestras con el agregado del 20% del EAFD, éstas muestran una microestructura muy similar a la anterior, con una distribución heterogénea del residuo dentro del cuerpo cerámico y características de sinterización comparables. Las muestras con 30% del EAFD presentan una mayor porosidad interna y la distribución del EAFD es más regular aunque presenta todavía zonas heterogéneas, manteniendo las características en cuanto a la sinterización entre ambas fases. También se observan partículas grandes provenientes del EAFD inmersas en la matriz. Observando las muestras con agregados de 40 y 50% del residuo se aprecia mayor presencia de poros, tanto en el interior como en el exterior, como así también mayor tamaño de los mismos, mucho más notable a medida que el contenido de EAFD aumenta, con una distribución homogénea y manteniendo el grado de sinterización entre fases en las zonas de contacto entre las partículas sólidas y la

matriz arcillosa o de EAFD. En este caso la unión entre partículas no se observa en toda la periferia de las mismas, sin embargo poseen la resistencia necesaria para que no se desgranen durante el pulido siendo retenidas en la matriz. Estas características descriptas pueden observarse en las micrografías presentadas en la Figura 9.

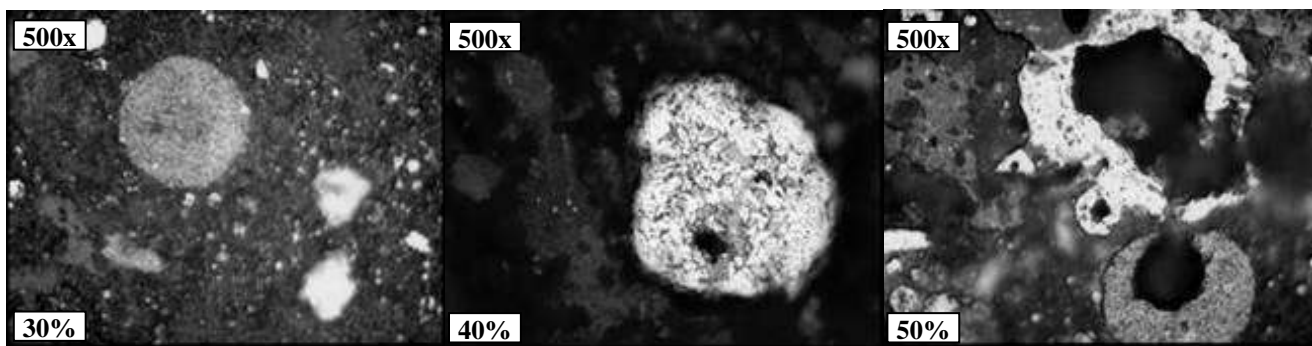


Figura 9. Micrografías OM de las muestras cocidas con 30%, 40% y 50% de EAFD.

3.9 Análisis de lixiviados

Para determinar la eficacia de esta tecnología para contrarrestar la peligrosidad de este material granular se llevan a cabo ensayos de lixiviación siguiendo la norma USEPA 1311 TCLP (utilizada por la Legislación Argentina). Esta norma establece que el material a analizar debe utilizarse con un tamaño máximo de partículas o trozos menores a 1 cm de lado, por lo que el material en polvo se analiza tal cual se recibe desde la acería y las tejas de cada contenido de EAFD se rompen en trozos de estas dimensiones, para luego ser sumergidos en una solución de pH ácido, la cual extrae los contaminantes. El objetivo de la norma es simular las peores condiciones a las que podría encontrarse el producto. En la Figura 10 (a), se presentan estos resultados.

En función de que este tipo de productos cerámicos está diseñado para ser utilizado en forma monolítica y no en trozos pequeños, se realiza también la comparación de resultados siguiendo la norma de la Agencia Medioambiental Europea, EA NEN 7375:2004, la cual está diseñada especialmente para determinar las características de lixiviabilidad de productos moldeados o cuerpos monolíticos conteniendo materiales residuales. Esta norma es conocida como *ensayo de tanque* y consiste en sumergir las muestras en un recipiente que contenga 5 veces el volumen de muestra sólida de agua destilada de pH neutro, y dejar las piezas sumergidas tiempos cada vez mayores (6, 24 y 30 hs; 4, 9, 16, 36 y 64 días) y luego de cada periodo se retira el líquido lixiviado para su análisis y se coloca sobre la misma muestra solución nueva (agua destilada de pH neutro). Este método se basa en medir el desprendimiento de contaminantes desde el sólido hacia el medio líquido por difusión. El pH que la solución alcanza al finalizar cada periodo depende de las características del material monolítico empleado, y eso afecta la solubilidad de los metales pesados de forma directa. Estas condiciones se asemejan mucho más a las que el producto debe soportar en su uso como material de construcción civil. En la figura 10 (b) se observan estos resultados. En la Tabla 2 se muestran los límites establecidos por la Ley 24051, Decreto 831/93 (anexo IV) que define la peligrosidad del residuo, y del Código Alimentario Argentino para el agua de bebida.

Tabla 2. Límites de contaminantes en solución (mg/litro).

	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Cr
Ley 24051, Decreto 831/93 (anexo IV y VI)	500	100	1	0,5	1,34	5
Limite Código Agua Bebida	5	1	0,01	0,005	0,0134	0,05

Si se toma como guía la norma Europea, en principio el material puede considerarse como no peligroso y con respecto a los límites para agua de bebida, sólo el contenido de Cr y Ni en algunas muestras estaría fuera del límite. Con respecto al análisis siguiendo la Norma USEPA, que somete a la muestra a un tratamiento mucho más severo, el material cerámico tampoco resulta peligroso, aunque sus contenidos de Cd, Cr, Pb y Ni están fuera de los límites para agua de bebida. En función de estos resultados puede considerarse a la ceramización de estos residuos como una tecnología eficiente y prometedora.

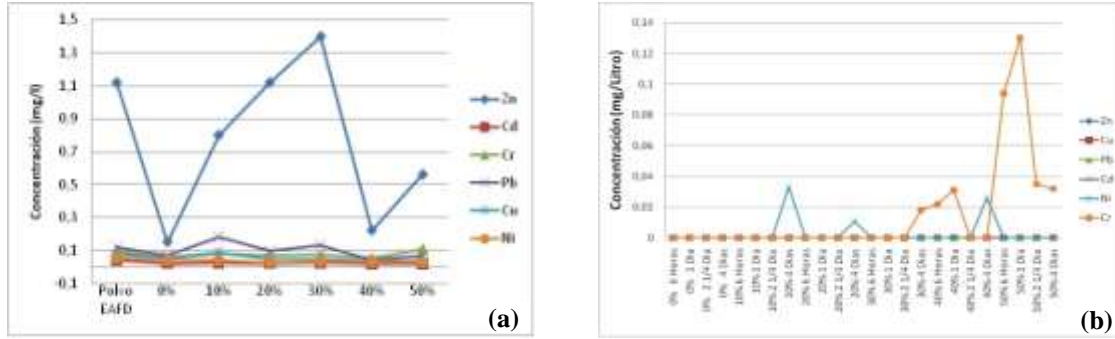


Figura 10. Ensayos de lixiviación según las normas (a) USEPA 1311 TCLP, y (b) EA NEN 7375:2004.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de estos estudios sobre la incorporación de polvo de acería eléctrica (EAFD) como sustituto de arcilla mineral han confirmado la factibilidad de reutilización de este tipo de descarte siderúrgico como materia prima en la industria cerámica para construcciones civiles. Se pudo observar que tanto las propiedades físicas necesarias para su uso en servicio, como la resistencia mecánica, la porosidad abierta y la variación volumétrica están dentro de los valores normalmente requeridos. En lo que respecta a las propiedades químicas y medioambientales, los productos cumplen con los requerimientos legales y su uso no representa un riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Materiales y Medio Ambiente de la Universidad de Módena y Reggio Emilia en Italia, por los análisis de XRF, y a la Escuela de Educación Técnica N°2 de la ciudad de San Nicolás, por los ensayos mecánicos de las probetas. Y a la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo (PICT Raíces N° 35672).

REFERENCIAS

- [1] N. Quaranta, N. Lalla, C.M.F. Vieira, R. Sanchez, S.N. Monteiro, C.A.C.M. Dias. Use of steel-making plant wastes into clayey ceramic. Congreso SAM-CONAMET 2009. Actas del Congreso (CD).
- [2] J. Madías, Reciclado de polvos de horno eléctrico, Acero Latinoamericano No. 513 Marzo-Abril de 2009, 38-47
- [3] J.G.M.S. Machado F. Andrade Brehm, C.A. Mendes Moraes, C.A. dos Santos, A.C. Faria Vilela, J. Ba. Marimon da Cunha. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials. B136 (2006) 953-960
- [4] N. Leclerc, E. Meux, J.M. Lecuire, Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites, Hydrometallurgy (2003) 175-183.
- [5] J.P. Birat, A. Dez, M. Faral, S. Gonthier, J.C. Huber, B. Aubry, Journées Sidérurgiques Internationales ATS, Paris (1998).
- [6] A.G. Guézennec, J.C Huber, F. Patisson, P. Sessieq, J.P Birat, D. Ablitzer. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles. Powder Technology, 157 (2005), 1-3, 2-11
- [7] J.C. Huber, La formation des poussières dans un Four Electrique d'Aciérie, Doctorate Thesis, INPL,(2000).
- [8] M.C. Mantovani, C. Takano, F.L. Cavallante, Caracterizacao de tres tipos de poeiras geradas em fornos eletricos a arco, 53 Congresso Anual da ABM 53, 1998, pp. 1329-1343.
- [9] D.K. Xia, C.A. Pickles, Microwave caustic leaching of electric arc furnace dust, Miner. Eng. 13 (2000) 79-94.
- [10] C. Takano, M.C. Mantovani, F.L. Cavallante, M.B. Mourao. Arc dust characterization and recycling by self reducing pellets. 1st Japan-Brazil Symp. on dust processing-energy-environment in metallurgical industries, Sao Paulo, 1999.
- [11] C.L. Li, M.S. Tsai, Mechanism of Spinel Ferrite Dust Formation in Electric Arc Furnace Steelmaking, ISIJ International, Vol. 33 (1993), No. 2, pp, 284-290.