

# Diseño de polvos de molde para colada continua de *slabs* de aceros bajo carbono<sup>(\*)</sup>

A. Cruz-Ramírez\*, J.F. Chávez-Alcalá\* y J.A. Romero-Serrano\*

## Resumen

A partir de la caracterización de polvos comerciales mediante pruebas de laboratorio y la modificación de sus propiedades mediante adiciones de compuestos químicos, se identificaron y desarrollaron criterios y estrategias de diseño que sirvieron de base para elaborar nuevos polvos. La caracterización de los polvos comerciales indica que se fabrican por simple mezcla mecánica de minerales, utilizando feldespatos y arcillas como materiales base, que contienen SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O y, en menor proporción, K<sub>2</sub>O, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MnO, caliza como fuente principal de CaO, fluorita (CaF<sub>2</sub>) como fluidificante y grafito como fuente de carbono. Mediante pruebas de fusión–solidificación se determinaron las temperaturas de fusión y fluidez de los polvos y se identificó una gran variedad de especies cristalinas que se forman durante la solidificación, entre las que destacan la nefelina (NaAlSiO<sub>4</sub>) y la cuspidina (Ca<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>F<sub>2</sub>), que tienen una influencia directa sobre los fenómenos de transferencia de calor de la línea al molde y, por lo tanto, en la velocidad de transformación de fases y de contracción del acero.

## Palabras clave

Polvos. Colada continua. Minerales. Nefelina. Cuspidina.

## Fluxes design for continuous casting mold of slab low carbon steels

## Abstract

Commercial fluxes were characterized by laboratory tests, and their original properties were changed with additions of chemical reagents in order to establish criteria and design strategies to produce new fluxes. The characterization of the commercial fluxes reveals that they are produced by simple mechanical blend of minerals, using feldspars and clays as base materials, containing SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O and in less quantity K<sub>2</sub>O, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MnO; limestone as the main source of CaO, fluorspar (CaF<sub>2</sub>) used to control the viscosity and graphite as carbon source. Melting-solidification tests revealed melting and fluidity temperatures and the existence of abundant mineralogical phases formed during the flux solidification. Some important mineralogical compounds are the nepheline (NaAlSiO<sub>4</sub>) and cuspidine (Ca<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>F<sub>2</sub>); these species have a direct influence on the heat transfer phenomena from strand to mold and therefore on the phase transformations and the shrinkage of the steel.

## Keywords

Fluxes. Continuous casting. Minerals. Nepheline. Cuspidine.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de polvos para molde se ha convertido en una práctica prioritaria, debido a su fuerte impacto sobre la calidad superficial e interna del producto y sobre la productividad de las máquinas de colada continua. Es de suma importancia la elección del polvo en relación con el tipo de acero y las condiciones de colada más adecuadas o para resolver un problema en particular. La selección de los polvos se ha realizado, en muchos casos, por prueba y error<sup>[1]</sup> o, simplemente, dejando al proveedor la posible solución

a los problemas, con cambios de formulación no especificados al cliente. Actualmente, los principales proveedores de polvos son compañías multinacionales que los fabrican variando las relaciones de mezcla de las materias primas para obtener propiedades térmicas determinadas, sin que las características particulares de las mezclas sean especificadas. Esta clara dependencia explica la necesidad de generar la tecnología que permita su diseño y fabricación local en base a las necesidades propias.

(\*) Trabajo recibido el día 11 de agosto de 2003 y aceptado en su forma final el día 3 de diciembre de 2004.

(\*) Dpto. de Ingeniería Metalúrgica. E.S.I.Q.I.E. – I. P. N. Apdo. P. 75-874. México D.F. 07300.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se caracterizaron dos polvos comerciales, uno para la producción de aceros bajo carbono (0,015 – 0,06 % C), polvo I, y otro para aceros medio carbono y peritéticos (0,07 – 0,16 % C), polvo II, y se hicieron modificaciones en su composición original mediante adiciones de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , C,  $\text{CaF}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La tabla I muestra la composición química de los polvos comerciales. La identificación de las especies mineralógicas contenidas en ellos se realizó mediante un estudio petrográfico<sup>[2]</sup> utilizando un microscopio de polarización Leitz SM-LUX-POL. Los polvos se reprodujeron a nivel de laboratorio, con referencia a su composición mineralógica y granulometría, a partir de diferentes minerales locales proporcionados por el Consejo de Recursos Minerales de México, con variaciones sistemáticas en sus contenidos de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , C,  $\text{CaF}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El comportamiento de fusión de los polvos se determinó mediante la fabricación de pequeños cilindros de polvos compactados<sup>[1]</sup>. Estos cilindros se calentaron lentamente en un horno de tubo hasta su fusión y, por comparación de alturas entre el cilindro y patrones de alúmina de referencia, se determinaron las temperaturas de ablandamiento, fusión y fluidez de los polvos.

**Tabla I.** Composición química de los polvos de molde comerciales

*Table I. Chemical composition of the commercial fluxes*

Composición	Tipo de polvo	
	I	II
$\text{SiO}_2$	31-34	30-33
CaO	31-34	36-39
MgO	1 máx.	1,5 máx.
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,2-5,2	5,5-7,5
$\text{TiO}_2$	0,5 máx.	1,0 máx.
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,5 máx.	1,5 máx.
MnO	0,5 máx.	1,0 máx.
$\text{Na}_2\text{O}$	5,4-6,4	4,3-5,3
$\text{K}_2\text{O}$	0,5 máx.	1,0 máx.
F	4,8-5,8	6,4-7,4
$\text{C}_{\text{total}}$	7,9-8,9	6,2-8,2
$\text{C}_{\text{libre}}$	5,5-6,5	4,5-6,5
$\text{CO}_2$	10-11	5,3-7,3
$\text{Li}_2\text{O}$	1,0 máx.	0,6 máx.
$\text{H}_2\text{O}$ a 105 °C	0,5 máx.	1,5 máx.

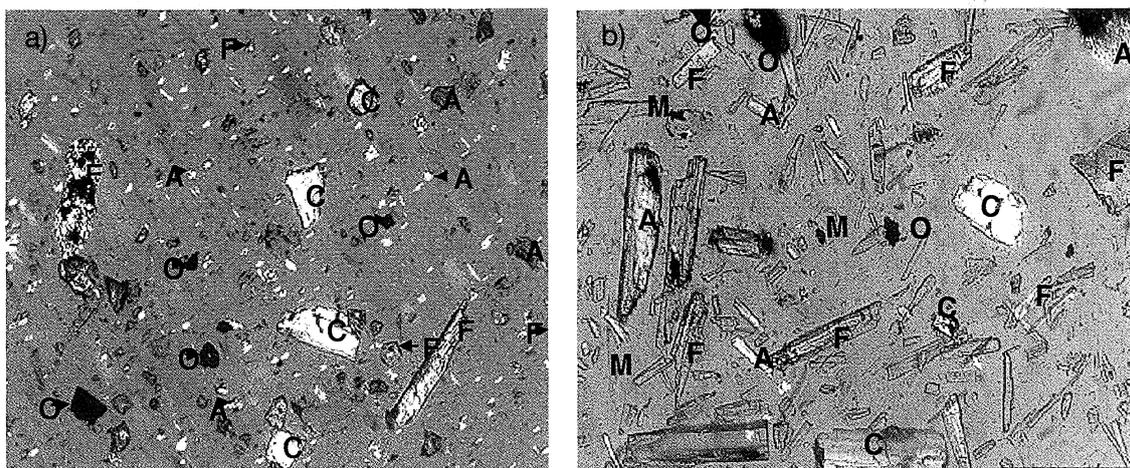
La composición química y la temperatura de fluidez se representaron mediante diagramas pseudoternarios de Mills<sup>[3]</sup>. Las muestras comerciales y fabricadas se analizaron por difracción de rayos X, empleando un difractómetro de Rayos X SIEMENS D 5000, para establecer la clase de especies presentes en el polvo de molde original. Adicionalmente, para estudiar el desarrollo de la fusión, se interrumpió el proceso de fusión a las temperaturas de fluidez determinadas experimentalmente, enfriando los polvos lenta (en el interior del horno) y rápidamente (vacando sobre una placa de cobre), con el objeto de determinar el grado de cristalización e identificar la formación de especies a estas condiciones de temperatura y velocidad de enfriamiento. Se utilizó el programa de cómputo comercial FACTWIN<sup>[4]</sup> para hacer una predicción termodinámica de especies en equilibrio, con base en la composición química de los polvos de molde y a las temperaturas de importancia en colada continua.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Polvos comerciales

Algunos resultados del estudio petrográfico se muestran en las micrografías de las figuras 1a y 1b, correspondientes a los polvos de molde para aceros bajo y medio carbono, respectivamente. Se observa que los polvos comerciales están constituidos por feldespatos, que pueden ser sódicos o potásicos, de color azul y amarillo verdoso (Fig. 1b). Los minerales arcillosos se observan de color café o café-rojizo, estas arcillas son, básicamente, silicoaluminatos. La calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) se encuentra presente en ambos polvos y se observa de color amarillo. Este mineral es la fuente del óxido de calcio para la fabricación de los mismos. El estudio mineralógico prueba que los polvos de molde comerciales son mezclas mecánicas de minerales, básicamente feldespatos y arcillas que, a su vez, son las fuentes principales de sílice, alúmina, potasio y sodio, así como de magnesio y hierro, en menor proporción; se encuentran mezclados con caliza o calcita, fluorita y carbono. No se observan partículas aglomeradas indicadoras de algún proceso de sinterizado.

En las figuras 2a y 2b se representa la composición química de los polvos de molde comerciales y de los polvos modificados con adiciones, mediante el diagrama pseudoternario  $\text{CaO-SiO}_2\text{-NaF}$  propuesto por Mills<sup>[3]</sup>. En dicho diagrama, las proporciones molares de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaF}_2$  se reflejan como NaF, a partir de la base termodinámica de



**Figura 1.** Micrografía del polvo I (a) y II (b) a 65 x. Se observan feldspatos (F), arcillas (A), minerales opacos (O) y carbonatos (C) y algunos contornos de partículas de fluorita (M).

*Figure 1.* Micrograph of flux I (a) and II (b) at 65 x. Showing feldspars (F), clays (A), opaque minerals (O) and limestone (C) and some borderlines of fluorite (M).

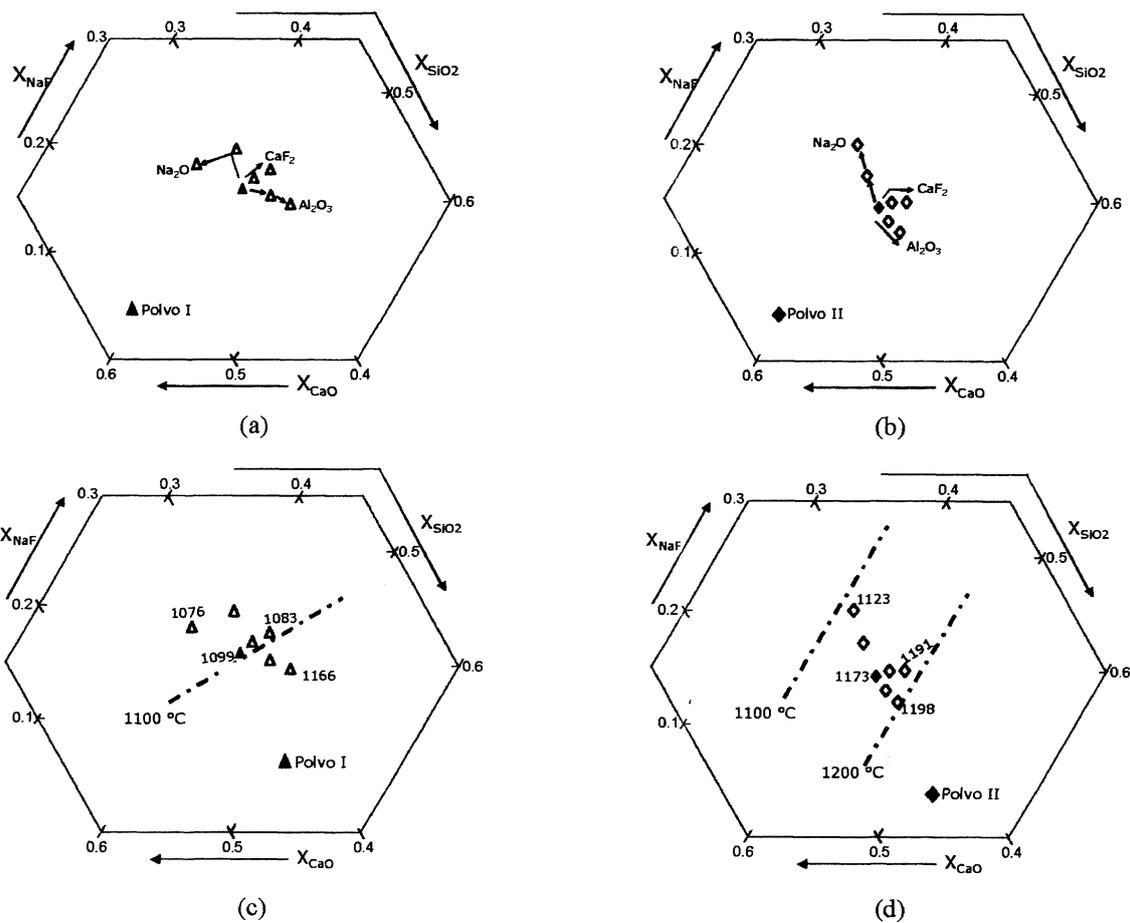
que  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaF}_2$  reaccionan para formar  $\text{NaF}$ . Por ser  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  formadores de red, ambos, se consideran en el componente  $\text{SiO}_2$ ; en el componente  $\text{CaO}$ , se considera la suma de los óxidos  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$  y algún exceso de  $\text{Na}_2\text{O}$  que permanece después de satisfacer la reacción entre el  $\text{CaF}_2$  y el  $\text{Na}_2\text{O}$  en el polvo original.

El diagrama pseudoternario de Mills<sup>[3]</sup> de la figuras 2c y 2d presenta las temperaturas de fluidez medidas para los polvos de molde comerciales originales y con adiciones. Se observa, para ambos, una tendencia bastante clara que permite trazar la línea de temperaturas de fluidez de 1.100 °C, para clasificar las composiciones de los polvos estudiados. Se observa, claramente, el aumento de este valor hacia el vértice de  $\text{SiO}_2$  y su reducción hacia el vértice de  $\text{NaF}$ , lo que permitirá hacer ajustes en caso de detectarse problemas en la colada, sobre todo, para evitar perforaciones de la corteza solidificada con adiciones de óxidos alcalinos.

Con el propósito de conocer las especies mineralógicas contenidas en los polvos comerciales, éstos, se caracterizaron por difracción de rayos X en fresco (sin fundir) y, después de fundidos a la temperatura de fluidez y solidificados rápidamente, como ocurre en el molde. Los resultados de estas pruebas se presentan en los difractogramas de la figura 3, para el polvo de aceros bajos en carbono, en los que se puede apreciar que, en los polvos sin fundir aparecen compuestos químicos simples, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , C,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc. En los difractogramas obtenidos de los polvos llevados a las temperaturas de fluidez, se observa la forma-

ción de una serie de especies mineralógicas complejas, eliminándose, por completo, la presencia de componentes puros. Lo único que varía, en cada caso, es la cantidad de las especies formadas, entre las que destacan la nefelina ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y la cuspidina ( $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7$ ), que han sido referidas en la literatura<sup>[5 y 6]</sup>. Otras especies que se forman son:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , que aparece en ambos polvos; una serie de silicatos más complejos, como es  $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ , en el tipo I; y la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que aparece en los dos polvos. En todos los casos, la formación de especies se presenta desde antes de la fusión total y, posteriormente, no varían las especies formadas.

Con el programa comercial FACTWIN<sup>[4]</sup>, se predicen, cuantitativamente, las especies mineralógicas que se pueden formar a estas condiciones en estado de equilibrio químico, a partir de la composición química global del polvo y de la temperatura. En este paquete de análisis termodinámico, el usuario suministra los reactantes, la temperatura y la presión total. Las especies predichas de esta manera concuerdan, casi en su totalidad, con las especies determinadas, por difracción de rayos X, en los polvos de molde sometidos a calentamiento hasta la temperatura de fluidez y enfriamiento. Los resultados se observan en la Tabla II. Para el tipo I, las especies que se obtuvieron mediante el cálculo fueron dos silicatos de calcio,  $(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)_2$  y  $(\text{CaO})(\text{SiO}_2)$ , un silicato de sodio,  $(\text{Na}_2\text{O})(\text{SiO}_2)$ , un silicato doble de calcio y magnesio,  $(\text{CaO})_3(\text{MgO})(\text{SiO}_2)_2$ ; además, un silicoaluminato de sodio,  $(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)$ , especie



**Figura 2.** Diagrama pseudoternario CaO-SiO<sub>2</sub>-NaF propuesto por Mills<sup>[3]</sup>, donde se representa la composición química de los polvos de molde comerciales, originales y con adiciones (2a y 2b), y las temperaturas de fluidez medidas en los polvos, originales y con adiciones (2c y 2d).

*Figure 2. Pseudoternary CaO-SiO<sub>2</sub>-NaF diagram proposed by Mills<sup>[3]</sup> showing the chemical composition of the original fluxes and the fluxes with additions (2a y 2b) and the fluidity temperature of the original fluxes and the fluxes with additions (2c y 2d).*

mineralógica conocida como nefelina y, hematita, (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La predicción de especies es muy similar para las temperaturas de ablandamiento, fusión y fluidez, donde solo varía la cantidad en que aparecen dichas especies. La columna de resultados experimentales de la tabla II presenta las especies identificadas por difracción de rayos X, que corresponden a la nefelina (NaAlSiO<sub>4</sub>), un silicato de sodio, (Na<sub>2</sub>O)(SiO<sub>2</sub>), la pseudo-wollastonita, CaSiO<sub>3</sub>, y la hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Estas cuatro especies coinciden con las obtenidas en el cálculo termodinámico. Además, aparece un silicato de calcio conocido como kilchoanita, Ca<sub>6</sub>(SiO<sub>4</sub>)(Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>), y la cuspidina (Ca<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>F<sub>2</sub>), que no fue prevista por el programa de cómputo debido a que en su fórmula química interviene la fluorita y el programa no lo contempla en su base de datos. La cuspidina es una fase que se encuentra en ambos polvos, debido a la presencia de CaF<sub>2</sub> en altos

**Tabla II.** Especies mineralógicas del polvo de molde I, formadas a la temperatura de fluidez determinadas por (a) programa termodinámico y (b) fusión-solidificación y difracción de rayos X

*Table II. Mineralogical species formed in flux I at the fluidity temperature estimated by (a) thermodynamic program and (b) melt-solidification and X-ray diffraction*

Programa termodinámico		Resultados Experimentales
% masa	Especie química	Especie química
47,24	(CaO) <sub>3</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Ca <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> F <sub>2</sub>
15,1	NaAlSiO <sub>4</sub>	NaAlSiO <sub>4</sub>
13,85	CaSiO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>
11,34	(CaO) <sub>3</sub> (MgO)(SiO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Ca <sub>6</sub> (SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )
10,83	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
1,64	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

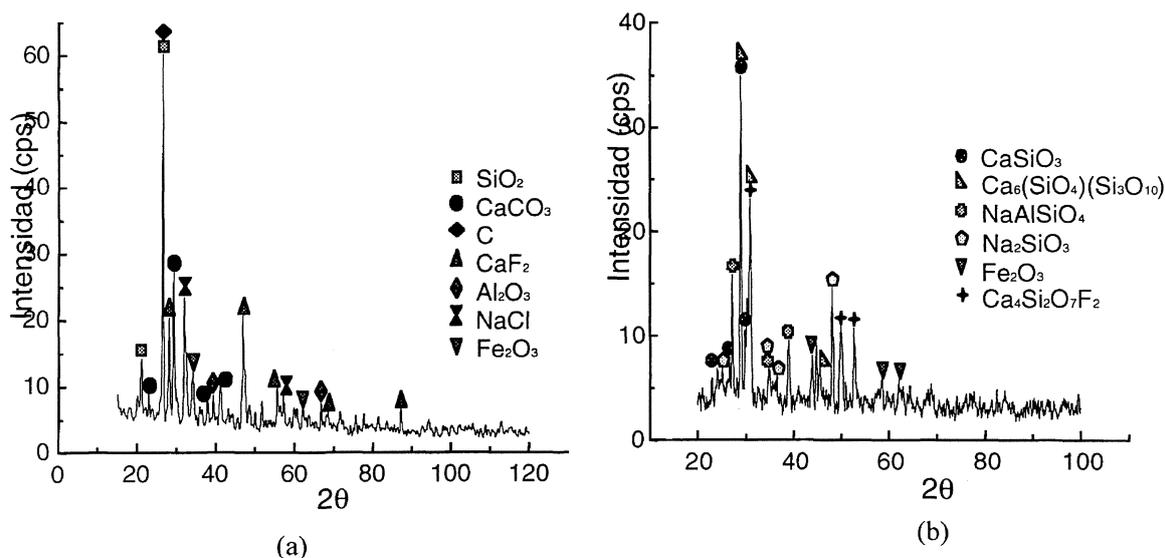


Figura 3. Difractogramas obtenidos del polvo de molde I, (a) sin fundir, (b) fundido a 1.099 °C y enfriado rápidamente.

Figure 3. X ray diffraction of flux I (a) as received, (b) after melting at 1099 °C with rapid cooling.

niveles, en todos los casos. Estas especies se presentaron en los polvos llevados a las temperaturas de fluidez, solidificadas lenta y rápidamente. Las especies mineralógicas determinadas experimentalmente para el polvo de molde II también coinciden con las predichas en el cálculo termodinámico.

### 3.2. Criterios de diseño

El polvo de molde I se emplea para la colada de aceros bajos en carbono (0,015 a 0,06 % C), calmados con aluminio. La temperatura de fluidez del polvo recomendada se sitúa en el intervalo de 1.040 a 1.070 °C, para que éste se encuentre líquido a la temperatura de colada del acero. Una característica que debe cumplir este tipo de polvos es la de atrapar y disolver inclusiones no metálicas, como las provenientes de la desoxidación del acero, que pueden ser sólidas y deben evitarse en la zona de la interfase molde-línea, ya que pueden provocar una fuerte fricción y agrietamientos. La velocidad a la cual el polvo disuelve las inclusiones se incrementa con la disminución de la viscosidad. Esta viscosidad puede sufrir un incremento posterior debido a la recolección de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El valor óptimo de viscosidad que se recomienda es 2 a 2,5 poise, a 1.300 °C. Para obtener estas características se requiere de una basicidad cercana a 1, bajos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y altos contenidos de fluidificantes, como  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaF}_2$ . Se recomienda que el diseño de este tipo de polvos para la

producción de aceros bajo carbono considere evitar la formación de la cuspidina ( $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{F}_2$ ), ya que esta especie funde a altas temperaturas (1.450 °C), mientras que la nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ) funde a 800 °C. El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  debe eliminarse de estos polvos porque es fácilmente reducible en los aceros desoxidados con aluminio y puede afectar la estabilidad química de estos polvos.

Con respecto al polvo de molde II, se utiliza para la producción de aceros medio carbono (0,07-0,1 % C) y peritéticos (0,09 a 0,16 % C). Este tipo de aceros presenta una fuerte contracción en la solidificación, al pasar de ferrita  $\delta$  a austenita  $\gamma$ , a temperaturas comprendidas en el intervalo de 1.400 a 1.480 °C, donde pueden generarse grietas longitudinales durante la colada. Para disminuir este efecto se recomienda una alta temperatura de fluidez, preferiblemente en el intervalo de 1.180 a 1.190 °C, y una baja viscosidad, del orden de 0,8 poise, a 1.300 °C. Estas condiciones se requieren para tener una capa de escoria, predominantemente sólida, entre línea y molde, que actúa como una barrera al flujo de calor, permitiendo un enfriamiento "suave", que se logra a través de las fases cristalinas presentes en el polvo solidificado, principalmente la cuspidina ( $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{F}_2$ ), que reduce el flujo de calor y los gradientes térmicos transversales, ayudando a reducir las grietas longitudinales, aunque otros autores<sup>[5 y 6]</sup> le atribuyen este efecto, también, a la nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ). En cuanto a la composición química para lograr estas condiciones, se requiere de un predominio de óxidos

básicos (% óxidos básicos / % óxidos ácidos > 1). También, se requiere la adición de altos contenidos de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) y fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), recomendándose que, de esta última, no se sobrepase el 10 % porque erosiona la buza sumergida.

### 3.3. Polvos de molde fabricados

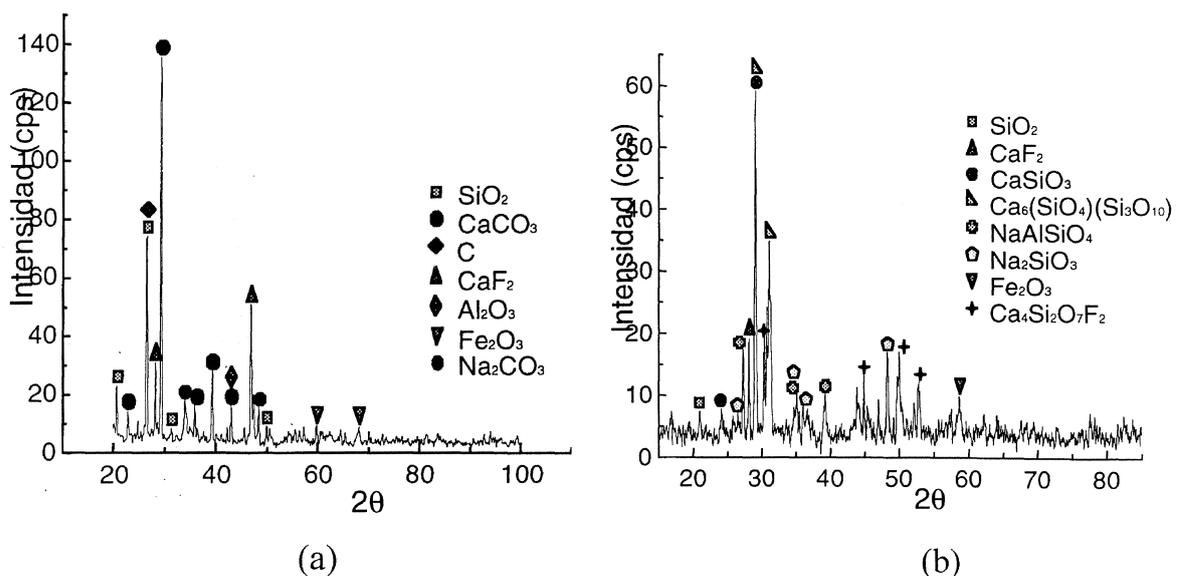
Con base en las propiedades determinadas en los polvos comerciales, se procedió a la fabricación propia a partir de minerales. Al igual que en otros trabajos desarrollados en la fabricación de fundentes de soldadura<sup>[7 y 8]</sup>, se partió de mezclas en fresco de minerales. Se hicieron dos mezclas para producir ambos polvos comerciales. Las mezclas I.1 y I.2 representan el polvo para la producción de aceros bajo carbono. Para el tipo I.1 se utilizó el feldespato 1 como fuente principal de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{MgO}$  y, para el tipo I.2, el caolín es el componente principal y fuente de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Las mezclas II.1 y II.2 se hicieron para obtener los empleados en la producción de aceros medio carbono y peritéticos. Para el tipo II.1 se utilizó el feldespato 2, para aportar una mayor cantidad de  $\text{CaO}$ , y para el tipo II.2 se empleó la arcilla como fuente principal de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . En todos los casos, los minerales utilizados se ajustaron con la caliza como fuente principal de  $\text{CaO}$ . El análisis químico de la materia prima empleada para la fabricación de los nuevos polvos se muestra en la tabla III. Para el ajuste final de las mezclas se usó fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y partículas de grafito de granulometría controlada.

**Tabla III.** Análisis químico de la materia prima industrial

Table III. Chemical analysis of raw materials

Compuesto	Materia prima industrial				
	Feldespato	Feldespato	Caolín	Caliza	Arcilla
	1	2			
$\text{SiO}_2$	62	63	61,8	14	55,5
$\text{CaO}$	3	3,4	1,8	42,34	-
$\text{MgO}$	2,6	2,5	0,7	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12	11,76	21	-	19,4
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,45	1,4	1,30	-	4,02
$\text{Na}_2\text{O}$	2,2	1,7	1,50	0,55	2,02
$\text{K}_2\text{O}$	-	-	0,96	-	-
Volátiles	16,75	16,24	10,94	43,11	19,06

De igual forma que con los polvos comerciales, se llevaron a cabo pruebas de difracción de rayos X a los polvos fabricados en fresco (sin fundir) y semifundidos a la temperatura de fluidez, enfriados lenta y rápidamente, con objeto de conocer las especies mineralógicas que se forman en las mezclas fabricadas y observar el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre el grado de cristalización de los nuevos polvos. En los difractogramas de la figura 4, se presentan los resultados obtenidos para la mezcla I.2. Para las cuatro mezclas fabricadas sin fundir aparecen compuestos químicos simples, tales como:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , C,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y, en las mezclas II.1 y II.2, aparece, también, el



**Figura 4.** Difractogramas obtenidos de la mezcla I.2, (a) sin fundir, (b) fundido a 1.108 °C y enfriado rápidamente.

Figure 4. X ray diffraction of the mixture I.2 (a) fresh mixture, (b) after melt to 1108 °C with faster cooling.

silicoaluminato  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ . Sin embargo, a la temperatura de fluidez, se obtuvieron una serie de especies mineralógicas complejas como la nefelina ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), la cuspidina ( $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7$ ), la pseudo-wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), un silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) y la especie compleja  $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ . Para las cuatro mezclas fabricadas a las distintas condiciones de temperatura y velocidad de enfriamiento, además de estas especies, aparecen compuestos químicos simples que no alcanzaron a combinarse para formar especies complejas, como son  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaF}_2$ . Comparando estas especies con las obtenidas experimentalmente para los polvos comerciales se encontró que coinciden en su totalidad, ya que aparecen de nuevo la cuspidina, nefelina, el silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), la pseudo-wollastonita, la hematita y la kilchoanita  $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ . No se observa diferencia apreciable al solidificar lenta o rápidamente, lo que muestra la baja tendencia a solidificar, en forma amorfa, de los polvos elaborados.

#### 4. CONCLUSIONES

Los polvos de molde de colada continua pueden fabricarse por simple mezclado mecánico de materiales en bruto, principalmente feldespatos, arcillas y caliza; su comportamiento adecuado depende de la correcta selección de materia prima, teniendo en cuenta el aspecto mineralógico, la composición química y el tamaño de partícula, lo que permite controlar el comportamiento térmico y reológico de los polvos, requerido para cada tipo de acero.

Se determinó la nefelina, para aceros bajos en carbono y la cuspidina, para medio carbono, como las fases cristalinas formadas que controlan la transferencia de calor entre el molde y el slab. La cuspidina, por tener un alto punto de fusión ( $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ ), funciona como barrera aislante, mientras que la nefelina funde a  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , promoviendo la transferencia de calor en la interfase molde-acero.

Las temperaturas de fluidez de los polvos estudiados se representaron en un diagrama de Mills<sup>[3]</sup>, observándose una clara tendencia a aumentar, conforme la composición se dirige al vértice del  $\text{SiO}_2$ , a relaciones de NaF y CaO constantes.

La predicción de fases a partir de datos termodinámicos muestra un alto grado de confiabilidad.

Para las temperaturas experimentales en este trabajo no se observó un efecto de la velocidad de enfriamiento en la formación de fases cristalinas, lo que puede implicar la ausencia de fases amorfas en la capa de polvo cercano al metal.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del IPN, COFFA, CONACYT y SNI, y al Consejo de Recursos Minerales (Tecamachalco).

#### REFERENCIAS

- [1] A. CRUZ, Tesis Maestría, E.S.I.Q.I.E- I.P.N, México D.F. 2000.
- [2] C. KLEIN and C. HURLBUT, *Manual of Mineralogy*, John Wiley & Sons, Singapore, 1977 pp. 234-240.
- [3] K. C. MILLS. *Ironmaking Steelmaking* 15 (1988) 175-180.
- [4] C.W. BALE, A.D. PELTON and W.T. THOMPSON, *Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics (FACT-Win)*. User's guide, 1999.
- [5] R. BOMARAJU. ISS, Pittsburgh, USA, 1991, pp. 95-110.
- [6] P.GRIEVESON, S. BAGHA, N. MACHINGAWUTA, K. LIDDELL, and K. C. MILLS, *Ironmaking Steelmaking* 15 (1988) 181-186.
- [7] A. CRUZ, R. QUINTANA, L. PERDOMO, L. GARCÍA, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal Madrid* 39 (2003) 114-122.
- [8] L. PERDOMO, R. QUINTANA, A. CRUZ, J. CASTELLANOS, L.I. GARCÍA, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 268-278.