

Caracterización de Fundentes para Molde de Colada Continua de Acero

Alejandro Cruz Ramírez*, Olga Hernández Nava**, Antonio Moreno Aldama** y Marissa Vargas Ramírez***.

RESUMEN

Los fundentes para molde de colada continua de acero cumplen diferentes funciones clave para obtener planchones de acero de óptima calidad. En este trabajo, se caracterizaron cuatro fundentes comerciales mediante pruebas de laboratorio (Estudio petrográfico, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido con microanálisis). La caracterización indica que los fundentes están constituidos por simple mezcla mecánica de minerales utilizando feldespatos y arcillas como materiales base, que contienen SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O y en menor proporción K_2O , MgO , Fe_2O_3 y MnO ; la caliza como fuente principal de CaO , fluorita (CaF_2) como fluidificante y grafito como fuente de carbono. Esta información es útil para establecer criterios de diseño para obtener fundentes con materiales disponibles en el mercado nacional.

ABSTRACT

Fluxes for continuous casting mold of steel fulfill several key functions in order to produce slab steel of good quality. In this work, four commercial fluxes were characterized by laboratory tests (Petrographic study, X-ray diffraction and scanning electronic microscope with microprobe). 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_2 , Al_2O_3 , Na_2O and in less quantity K_2O , MgO , Fe_2O_3 y MnO ; limestone as the main source of CaO , fluorite (CaF_2) used to control the viscosity and graphite as carbon source. This information is useful to establish design parameters to obtain fluxes with raw materials available in the local market.

Recibido: 15 Enero de 2007
Aceptado: 2 mayo de 2007

INTRODUCCIÓN

El proceso de colada continua constituye actualmente la base para la producción de acero en el mundo. La adopción del proceso de colada continua, ha sido el factor de mayor influencia en el desarrollo de la industria del acero, debido a que una sección semiterminada, tal como planchón, tocho o palanquilla, es directamente formada del acero líquido, sin necesidad de pasar por las etapas de lingote, recalentamiento y laminado, por lo que los costos de una planta de fabricación de acero por colada continua, son mucho menores que aquellos producidos por lingotes y laminación. 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 (Cruz, 2000). Los fundentes son escorias sintéticas usadas para cubrir el acero líquido en el molde de colada continua, los cuales cumplen diferentes funciones clave. La composición de los fundentes para molde está generalmente basada en el sistema SiO_2 - CaO - Al_2O_3 , con

Palabras clave:

Fundentes; Colada continua; Minerales; Acero; Planchón.

Keywords:

Fluxes; Continuous casting; Minerals; Steel; Slab.

* Departamento de Ingeniería Metalúrgica, ESIQIE-IPN. A. Postal 118-431, México D.F. 07051, Tel: (52) 55-5729-6000 ext. 54202, fax: (52) 55-5273-2996. correo electrónico: alcruzr@ipn.mx.

** Estudiantes de 8vo semestre de Ingeniería Metalúrgica. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, ESIQIE-IPN. A. Postal 118-431, México D.F. 07051. correos electrónicos: olga_hnava@hotmail.com y morenos_m@hotmail.com.

*** Centro de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Pachuca-Hgo. México 42084. correo electrónico: marissav@uaeh.reduaeh.mx.

óxidos alcalinos (Na_2O) y fluoruros (CaF_2) agregados como fluidizantes (Celaya, 1994). El Grafito es usado en cantidades de 3 % a 6 % para controlar las características de fusión de los fundentes. Es importante la adecuada selección del fundente, en relación con el tipo de acero a producir y las condiciones de colada del proceso. Sin embargo, esta selección es en muchos casos por prueba y error, o simplemente dejando al proveedor la posible solución a los problemas. Esto aunado a que los principales proveedores de fundentes en polvo son compañías multinacionales que los fabrican variando las relaciones de mezcla de las materias primas, para así obtener propiedades térmicas determinadas, sin que las características particulares de las mezclas sean especificadas (Cruz, 2000). Esta clara dependencia explica la necesidad de generar la tecnología que permita su diseño y fabricación local, con base a las necesidades propias.

ANTECEDENTES

La figura 1 muestra el esquema del proceso de colada continua (Peters, 1982), en donde el acero líquido pasa del reactor de aceración o refinación hacia una olla de vaciado, y de ésta, a su vez pasa a un depósito llamado distribuidor. El acero fluye entonces, desde el distribuidor hacia uno o más moldes de cobre de fondo abierto, enfriados por agua. El enfriamiento inicial del metal ocurre en la barra falsa. La solidificación continúa inmediatamente en la periferia del molde, donde se forma una cáscara sólida, hasta alcanzar un espesor de 12 a 25 mm, en la salida del fondo del molde. El planchón de acero es soportado mecánicamente hacia abajo a través de la zona de enfriamiento secundario, donde se rocía agua a presión en la superficie del planchón para así completar el proceso de solidificación. Finalmente, el planchón es cortado a la longitud deseada por un aparato cortador adecuado.

La figura 2 muestra las funciones del fundente en el molde de colada continua. Una vez que el fundente ha sido agregado al molde, ocurren dos fenómenos en serie (Nakano, 1987; Pinheiro, 1995): El polvo se calienta por contacto con el metal líquido fundiéndose con lo que se crea en la superficie del metal una fase líquida, la cual fluye sobre la superficie del acero, y se infiltra entre el molde y el acero durante el ciclo de oscilación. Una parte del fundente infiltrado se solidifica cuando entra en contacto con la pared del molde de cobre enfriado por agua y forma una capa sólida, mientras que una capa de fundente líquido permanece en contacto con la cáscara de acero solidificado, lo cual asegura la lubricación en la interfase hilo-molde (Pinheiro, 1995).

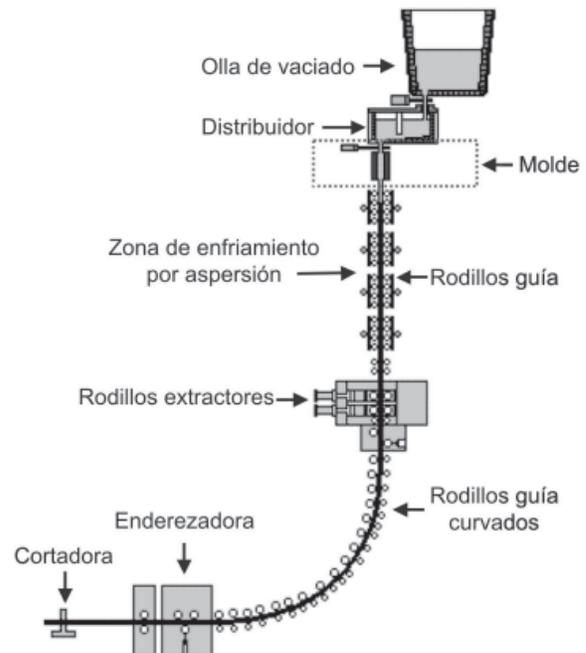


Figura 1. Esquema del proceso de colada continua de planchón de acero.

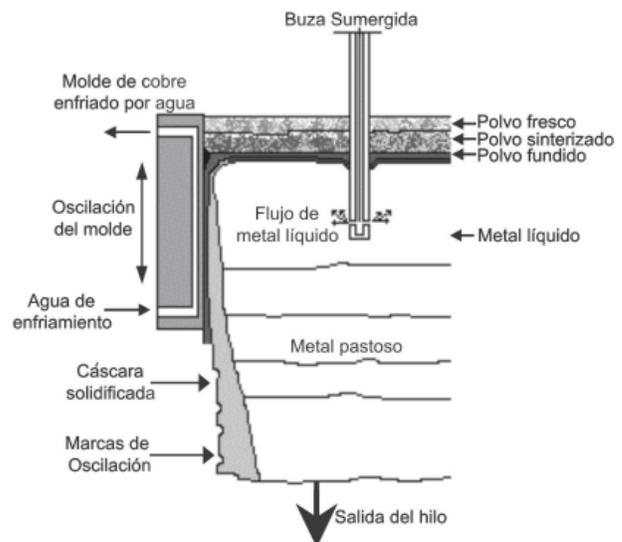


Figura 2. Esquema del molde de colada continua con el fundente en polvo.

Durante este proceso el fundente cumple las siguientes funciones (Mc Cauley, 1983): a) Protege al acero de la reoxidación a través del contacto con el aire, b) Aisla térmicamente la superficie del metal líquido para evitar una solidificación prematura, c) Absorbe y disuelve inclusiones de alto punto de fusión, evitando

su atrapamiento en la cáscara solidificada; d) Mejora la lubricación entre el acero y el molde para facilitar la salida del producto de colada, y e) Controla la velocidad y uniformidad de remoción de calor del producto de colada. Los polvos para molde se clasifican en tres categorías (Celaya, 1994): a) De base ceniza, constituidos por mezclas físicas de materiales en bruto como la bauxita, calcita, espato-flúor, etc., mezclados con ceniza en polvo como principal componente; b) Sintéticos elaborados a base de materiales en bruto pulverizados y mezclados en proporciones adecuadas y c) Profundidos o fragmentados, también son mezclas de materiales en bruto, profundidos y clasificados por tamaños. Todos estos polvos se mezclan con un 3 % a 6 % de carbono para darles propiedades de aislamiento térmico y para controlar la velocidad de fusión. La composición de los fundentes para molde está generalmente basada en el sistema $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$. Pequeñas cantidades de óxido de magnesio pueden sustituir al óxido de calcio y los óxidos de potasio y litio pueden sustituir al óxido de sodio; algunos fundentes contienen cantidades substanciales de óxido de boro. Cualquier contenido apreciable de óxido de hierro en particular es indeseable, ya que tiende a incrementar el potencial de oxígeno en la interfase metal-escoria de los aceros desoxidados, y por lo tanto, reintroducir oxígeno dentro del metal (Riboud, 1979). Existe una variedad de defectos superficiales en el acero, los cuales pueden ser originados en el molde y las áreas de enfriamiento secundario de la máquina de colada continua (Riboud, 1979; Brimacombe 1997). De estos, tres en particular: escoria atrapada, grietas longitudinales y marcas de oscilación, pueden ser directamente ocasionados por el uso incorrecto de los fundentes para molde (Riboud, 1979; Takeuchi, 1984).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se caracterizaron cuatro fundentes comerciales, uno para la producción de aceros bajo carbono (0,015 – 0,06 % C), fundente 1; el fundente 2, utilizado en la producción de aceros alto carbono (0,1 – 0,25 % C), el fundente 3 (fundente de arranque) que se utiliza para iniciar la operación de colada continua y el fundente 4 utilizado para aceros medio carbono y peritéticos (0,07 – 0,16 % C). La tabla 1 muestra la composición química de los fundentes comerciales reportada en las hojas técnicas de los proveedores. La identificación de las especies mineralógicas contenidas en ellos se realizó mediante un estudio petrográfico (Klein, 1977), utilizando un microscopio de polarización Leitz SM-LUX-POL. Se empleó el método de inmersión, el cual consiste en colocar sobre un portaobjetos una gota de un líquido de índice de refracción conocido,

para posteriormente adicionar partículas del fundente molido entre 65 y 100 mallas, mediante una aguja previamente humedecida en el líquido. Se agita el líquido con la muestra para que todas las partículas del mineral queden dentro del seno del líquido. Posteriormente se observa la muestra en el microscopio de polarización con luz transmitida, usando nicoles cruzados y placa de cuarzo y por comparación con distintos líquidos con índice de refracción conocido se identifican las especies minerales contenidas en la muestra. La observación y toma de fotografías se llevaron a cabo a 20 aumentos. Los fundentes comerciales se analizaron por difracción de rayos X empleando un difractor de Rayos X SIEMENS D 5000 con radiación $\text{Cu K}\alpha$, para establecer las especies mineralógicas presentes en los fundentes. Las condiciones de operación son las siguientes: 35 volts y 25 ampers, con un colimador en el primario de 6mm y en el detector de 0.6 mm. Finalmente, se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido JEOL 6300, para determinar la morfología, tamaños y distribución de los fundentes, adicionalmente con la técnica de microanálisis por EDS (Energy Dispersive Spectra) se determinó la composición química cualitativa de los fundentes. Por ser los fundentes óxidos metálicos no conductores, se evaporaron con grafito sobre su superficie para poder ser observados en el microscopio, para ello se empleo la evaporadora de grafito Denton Vacuum Desk II. La observación se hizo con electrones retrodispersados. Las condiciones de operación fueron: 15 Kv y una distancia de trabajo de 39 mm, examinando un área de muestra de 140 por 120 μm , correspondiente a 600 aumentos.

Tabla 1.
Composición química de los fundentes para molde de colada continua de acero

Composición Química	Tipo de Fundente			
	1	2	3	4
SiO_2	31-34	30-33	31.5	30-33
CaO	31-34	36-39	25.4	36-39
MgO	1 máx.	1.5 máx.	0.3	1.5 máx
Al_2O_3	4.2-5.2	5.5-7.5	2.9	5.5-7.5
TiO_2	0.5 máx.	1.0 máx.	0.5	1.0 máx
Fe_2O_3	1.5 máx.	1.5 máx.	10	1.5 máx
MnO	0.5 máx.	1.0 máx.	0.5	1.0 máx
Na_2O	5.4-6.4	4.3-5.3	11.6	4.3-5.3
K_2O	0.5 máx.	1.0 máx.	0.1	1.0 máx
F	4.8-5.8	6.4-7.4	11.0	6.4-7.4
C_{total}	7.9-8.9	6.2-8.2	2.2	6.2-8.2
C_{libre}	5.5-6.5	4.5-6.5	-	4.5-6.5
CO_2	10-11	5.3-7.3	8.2	5.3-7.3
Li_2O	1.0 máx.	0.6 máx.	0.6	0.6 máx
$\text{H}_2\text{O a } 105^\circ\text{C}$	0.5 máx.	1.5 máx.	0.5	1.5 máx

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio petrográfico reveló que los fundentes están constituidos por diversos minerales abundantes en la naturaleza, los cuales se encuentran de diversas formas y tamaños en los cuatro fundentes, variando sólo el contenido tentativo de las especies presentes, como se puede apreciar en los resultados mostrados en la Tabla 2.

De aquí se tiene que los feldespatos, que pueden ser sódicos o potásicos, se observan de color azul y amarillo verdoso. Los minerales arcillosos se observan de color café o café-rojizo, estas arcillas son básicamente silicoaluminatos. La calcita (CaCO_3) se observa de color amarillo, siendo la fuente del óxido de calcio para la fabricación de los fundentes. El estudio mineralógico muestra que los fundentes de molde comerciales son mezclas mecánicas de minerales, básicamente feldespatos y arcillas, los cuales son las fuentes principales de sílice, alúmina, potasio y sodio, así como magnesio y hierro en menor proporción; estas se encuentran mezclados con caliza o calcita, fluorita y carbono. Los resultados de las pruebas de difracción de rayos X de los fundentes, se presentan en los difractogramas de la figura 3 (Fundentes 1 y 2) y la figura 4 (fundentes 3 y 4). En todos los fundentes se puede apreciar que están constituidos por compuestos químicos simples tales como: SiO_2 , CaCO_3 , C, CaF_2 , Al_2O_3 , etc. La única especie mineralógica que se determinó fue la pseudo-wollastonita (CaSiO_3) para los cuatro fundentes. Sin embargo, se conoce del estudio petrográfico, que estos compuestos químicos simples, como SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , etc. se encuentran asociados a especies minerales como

los feldespatos, de fórmula general ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), las arcillas, de fórmula general ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), los minerales opacos que corresponden a los minerales de hierro y al grafito. Comercialmente, los aceros más importantes son los bajo y medio carbono, que corresponden a los fundentes 1 y 4. En la figura 4 se observa que el fundente 3 contiene grandes cantidades de fluorita (CaF_2) y óxido de hierro (Fe_2O_3).

Las microfotografías obtenidas de los fundentes en el microscopio electrónico de barrido, se observan en la figura 5a – 5d respectivamente, se ve una mezcla de una gran variedad de partículas de diferentes tamaños y formas. Dado que se utilizó la técnica de electrones retrodispersados por contraste composicional, se puede establecer que las partículas claras son las que tienen el mayor número atómico; éstas pueden ser principalmente magnetita, hematita y calcita, mientras que las partículas oscuras corresponden a las especies más ligeras, que pueden atribuirse a los feldespatos, las arcillas y el grafito.

No se observan partículas aglomeradas indicadoras de algún proceso de sinterizado, por lo que el análisis en el microscopio electrónico de barrido, corrobora lo reportado en el estudio mineralógico y se concluye que los fundentes son una simple mezcla mecánica de minerales, en donde sólo varía la relación de mezcla. Los resultados del microanálisis por EDS (figura 6) son muy similares para los cuatro fundentes, por lo que sólo se reportan los microanálisis para los fundentes 1 y 4; es decir, se identifican los mismos elementos, variando la cantidad de cada uno de ellos. A pesar de ser un análisis cualitativo, este coincide en gran medida con la composición química reportada en las hojas técnicas de los fundentes.

Tabla 2.
Estudio petrográfico de los fundentes comerciales.

Fundente 1			
MINERALES	ESPECIES	CONTENIDO TENTATIVO (%)	FORMA
Calcita	CaCO_3	5 – 25	Anedral
Feldespatos	(KNa) AlSi_3O_8	25 – 50	Subedral
Minerales opacos	C, Fe_2O_3	5 – 25	Subedral
Arcillas	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5 – 25	Anedral
Fundente 2			
Calcita	CaCO_3	5 – 15	Anedral
Feldspatos	(KNa) AlSi_3O_8	5 – 25	Tabular
Minerales opacos	C, Fe_2O_3	5 – 25	Subedral
Arcillas	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	< 5	Anedral
Fundente 3			
Feldespatos	(KNa) AlSi_3O_8	25 – 50	Subedral
Minerales opacos	C, Fe_2O_3	5 – 25	Subedral
Arcillas	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5 – 25	Anedral
Fluorita	CaF_2	5 – 10	Subedral
Calcita	CaCO_3	< 5	Subedral
Fundente 4			
Calcita	CaCO_3	5 – 10	Subedral
Feldespatos	(KNa) AlSi_3O_8	5 – 25	Tabular
Minerales opacos	C, Fe_2O_3	< 5	Subedral
Arcillas	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	< 5	Anedral

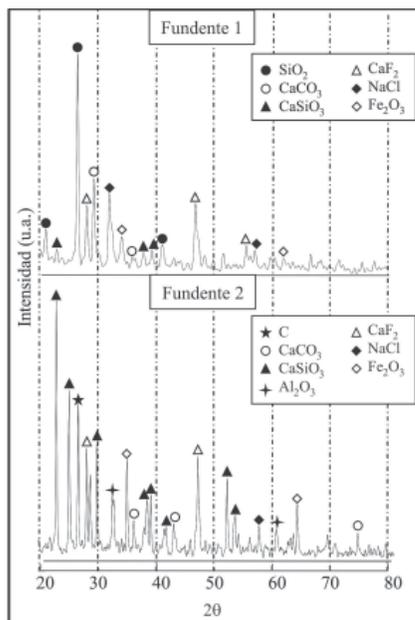


Figura 3. Patrones de difracción de Rayos de X de los fundentes 1 y 2.

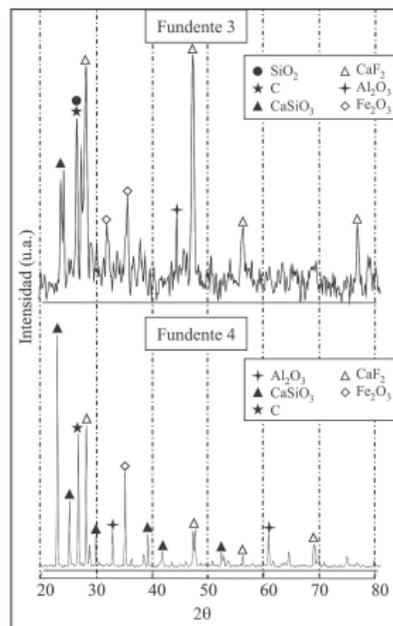


Figura 4. Patrones de difracción de Rayos de X de los fundentes 3 y 4.

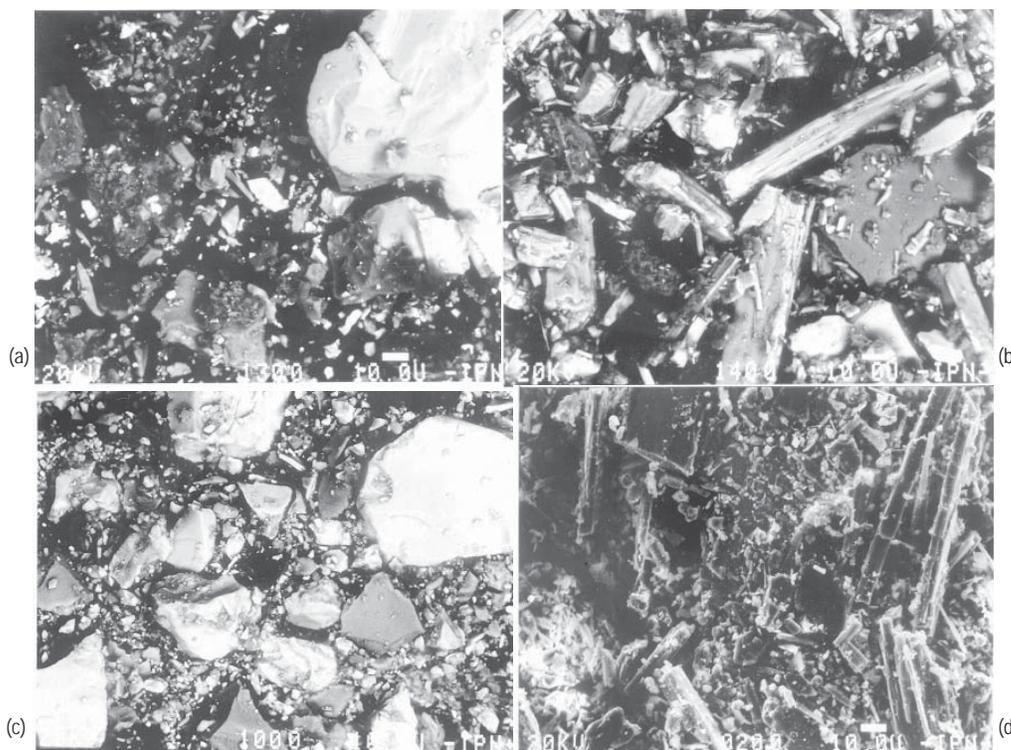


Figura 5. Fotomicrografías de MEB obtenidas a 600X de los fundentes comerciales. (a) Fundente 1, (b) Fundente 2, (c) Fundente 3 y (d) Fundente 4.

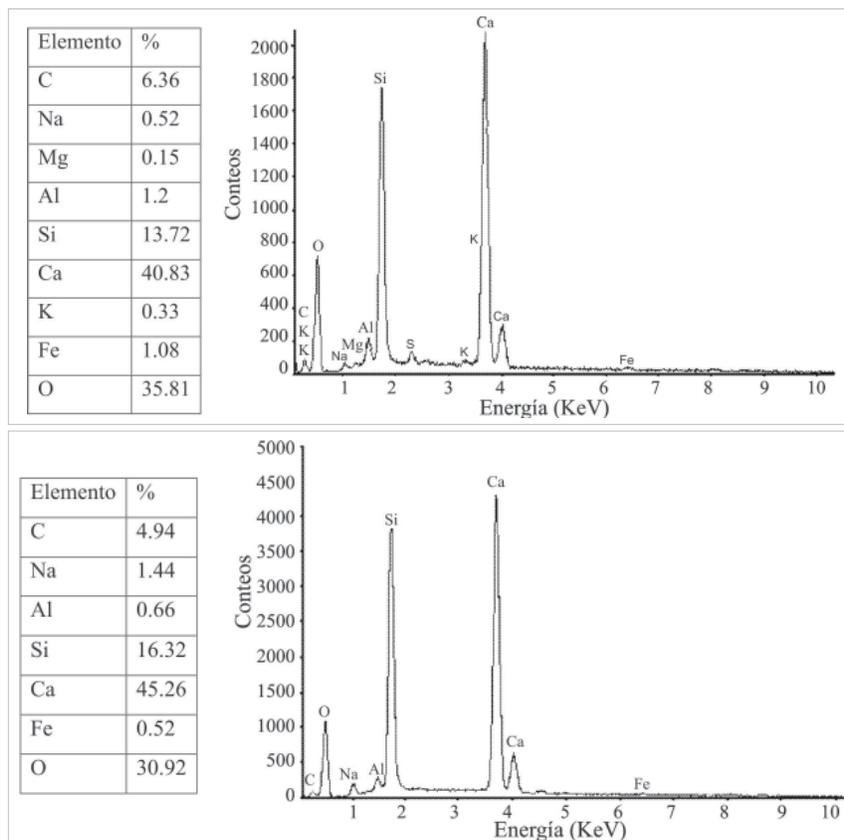


Figura 6. Microanálisis de los fundentes comerciales (a) Fundente 1, (b) Fundente 4.

CRITERIOS DE DISEÑO

El análisis de resultados muestra que los cuatro fundentes comerciales son mezclas mecánicas de diversos materiales, estos son minerales principalmente, los proveedores utilizan feldspatos y arcillas, los cuales son ricos en compuestos tales como SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O y en menor proporción contienen K_2O , MgO , Fe_2O_3 y MnO . Estos son los materiales base que conforman los fundentes y como fuente principal de CaO se emplea la caliza o calcita (CaCO_3), y en ocasiones también dolomita (CaCO_3)(MgCO_3), además de utilizar fluorita como fluidizante y como fuente de carbono, carbono negro o grafito; se descarta que pudieran ser finos de coque en este caso, porque no se observa una base de ceniza en las fotografías. El fundente 1 se emplea para la producción de aceros bajo carbono (0,015 a 0,06 % C) calmados con aluminio, la temperatura de fluidez del fundente recomendada se encuentra en el intervalo de 1040 a 1070 °C, para que el fundente se encuentre líquido a la temperatura de colada del acero, el valor óptimo de viscosidad que se recomienda es de 2 a 2,5 poise a 1300 °C. Para obtener estas características se requiere de una basicidad (CaO/SiO_2) cercana a 1, bajos contenidos de SiO_2 y Al_2O_3 y altos contenidos de fluidizantes como Na_2O y CaF_2 . El fundente 2 se emplea para la producción de acero alto carbono (0,1 – 0,25 % C), en este caso se requiere de una temperatura de fluidez de fundente más baja que en el caso anterior,

ya que este tipo de aceros son colados a menor temperatura. Se recomienda una temperatura de fluidez para el fundente de 980 °C a 990 °C, además, este tipo de aceros no tan propensos a las fracturas, por lo que en el hueco molde – hilo se requiere de una capa de escoria líquida uniforme a lo largo del molde, que permita una rápida extracción de calor. Para lograr este comportamiento se requiere de altos contenidos de Na_2O y CaF_2 con bajos contenidos de SiO_2 , CaO y Al_2O_3 . Este tipo de formulación permite tener una viscosidad baja, la cual es requerida. Para el fundente 3, el cual se emplea como polvo de arranque al iniciar la operación de colada continua, los requisitos que deben de cumplir este tipo de fundentes es que se tienen que fundir rápido, generando calor mediante reacciones exotérmicas. Para lograr este propósito se le adiciona una gran cantidad de óxido de hierro; esta característica se obtiene con un índice de basicidad cercano a 0.8. De esta manera se evita que el acero líquido pierda demasiado calor al fundirse el polvo, evitando a su vez cualquier solidificación prematura del baño de acero. Para el fundente 4, utilizado para la producción de aceros medio carbono (0,07-0,1% C) y peritéticos (0,09 a 0,16 %C), este tipo de fundente debe tener una temperatura de fluidez alta, preferiblemente en el rango de 1 180 °C a 1 190 °C, debido a que este tipo de aceros presentan una fuerte contracción en la solidificación al pasar de ferrita δ a austenita y con lo que se pueden generar grietas longitudinales durante la colada. Para disminuir este efecto, se recomienda una alta temperatura de fluidez del fundente y una baja viscosidad del orden de 0,8 poise a 1 300 °C, estas condiciones son requeridas para tener una capa de escoria predominantemente sólida a lo largo del hueco molde – acero, la cual actúa como una barrera al flujo de calor, permitiendo

un enfriamiento "suave". 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 necesita adicionar altos contenidos de álcalis (Na_2O y K_2O) y fluorita (CaF_2), esta última se recomienda que no sobrepase del 10 %, porque erosiona la buza sumergida.

CONCLUSIONES

Los fundentes de molde de colada continua pueden fabricarse por simple mezclado mecánico de materiales en bruto, estos son principalmente minerales, tales como feldespatos y arcillas que contienen SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O y en menor proporción K_2O , MgO , Fe_2O_3 y MnO , y caliza, fuente principal de CaO ; además de utilizar fluorita (CaF_2) como fluidizante y grafito como fuente de carbono. Su adecuado comportamiento depende de la correcta selección de la materia prima, teniendo en cuenta el aspecto mineralógico, la composición química y el tamaño de partícula, lo cual permite controlar el comportamiento térmico y reológico de los fundentes, en función del tipo de acero a producir.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de los siguientes organismos: COFFA, CONACYT, SNI e IPN, mediante el proyecto SIP 20060050.

REFERENCIAS

- Celaya A., Morales R. Tápia V. (1994), *Polvos de Molde de Colada Continua Análisis Preliminar*. Memorias del XVI Simposio Nacional de Siderurgia. Morelia, Mich., (p 23.1 – 23.13)
- Cruz A. (2000), *Obtención de fundentes para molde de colada continua y su caracterización*, Tesis Maestría. E.S.I.Q.I.E. – I.P.N., México D.F.
- Brimacombe J., Sorimachi K. (1997), Crack Formation in the Continuous Casting of Steel *Metallurgical transactions B*, (8B), 489-505
- Klein C., Hurlbut C. (1977) *Manual of Mineralogy*. John Wiley & Sons. Singapore, 234-240
- Mc Cauley W., Apelian D. (1983), "Continuous Casting Mold Fluxes", *Iron and Steelmaker*. 10, (12), 38-39
- Nakano T. (1987) *Model Analysis of Melting Process of Mold Powder for Continuous Casting of Steel*. Nippon Steel Technical Report, 34, 21-30
- Peters A. (1982) *Ferrous Production Metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc. USA
- Pinheiro C., Samarasakera I., Brimacombe J. (1995) *Mold Flux for Continuous Casting of Steel, part 11*. *Iron and Steelmaker*, 12, (22) pp. 41-43
- Riboud P., Larrecq M. (1979) *Properties and Performance of mold powders*. AIME Steelmaking Proc., (62), 78-92
- Takeuchi E., Brimacombe J. (1984) *The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs*. *Metallurgical transactions B*, (15B), 493-509