INOCULANTES Y FERROALEACIONES

SENA
SERVICIO NACIONAL
DE APRENDIZAJE

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE "SENA"
Centro Nacional de Fundición Bogotá
DIVISION DE INDUSTRIA
Octubre de 1976

SENA SERVICIO DOCUMENTACION TECNOLOGICA CENTRO METALURGIA

INOCULANTES Y FERROALEACIONES

Preparada por : A. Miguel Castillo P.
Profesional Asesor

**** - ****

INOCULANTES Y FERROALEACIONES

1. GENERALIDADES.

Es bien sabido que la resistencia mecánica de las fundiciones, en particular su resistencia a la tracción, disminuye de manera general, al mismo tiempo que aumenta el carbón equivalente (por aumento de carbono grafítico) 1); las fundiciones llamadas resistentes son generalmente de bajo carbono y de matriz perlítica.

Sinembargo, a medida que disminuye el carbono equivalente, se observa en las fundiciones una tendencia creciente a la solidificación en la estructura blanca.

En lo que concierne a la microestructura, las fundiciones de bajo carbono equivalente, frecuentemente tienen tendencia a presentar, al lado de la estructura blanca, placas de grafito interdendrítico, llamado grafito de sobrefusión del tipo D cuando es muy fino, o del tipo E en el caso contrario. El grafito muy finamente disperso facilita la precipitación de carbono en forma grafítica durante las transformaciones en estado sólido (superficie grande de contracto antre la matriz y el grafito con distancias cortas de difusión), lo que conduce a la estructura frecuente observable: Grafito fino + Ferrita. Pero generalmente resultan características de utilización poco satisfactorias, aunque los mejores resultados para la mayor parte de las piezas utilizadas en construcción mecánica se basan en las estructuras que son formadas por la asociación perlita + grafito tipo A ó B ó E (2), (Según la dimensión de las células eutécticas y según la importancia de las dendriticas que son tanto más desarrolladas cuanto la fundición sea más hipo-eutécticas y la sobre-fusión más fuerte.)

Notas: (1) Orden de tamaño de la baja resistencia a la tracción 1,5 a 2 kg/mm^2 en promedio para un aumento de 0,1 en el carbono equivalente.

(2) Se indica que tratamientos especiales recientemente en estudio, han permitido obtener la matriz ferrítica con el grafito fino del tipo D, y características mecánicas muy interesantes (resistencia a la tracción y resiliencia elevadas).

Por otra parte se ha notado que el silicio introducido en la fundición inmediatamente antes de la colada, por ejemplo en el canal del cubilote, en forma de diversos cuerpos llamados "Agentes Inoculantes"

(Ferrosilicio o Sílico-Calcio por ejemplo), tenía un efecto mucho más fuerte que el Silicio incluído en el lecho de fusión sobre la adaptabilidad de la fundición a grafitizar durante la solidificación. Ciertos autores precisan que la eficacia del silicio inoculado es el triple de la del silicio adicionado en las cargas. (esta eficacia se caracteriza aquí por el efecto producido sobre la profundidad de temple de una probeta.)

La adición de un agente inoculante permitirán entonces, al conservar un débil carbón equivalente, evitar la estructura blanca o atruchada (caracterizada por zonas grises con grafito de sobrefusión); se obtendrá así buenas propiedades mecánicas al mismo tiempo que la estructura gris y la maquinabilidad. Simultáneamente con una homogenización de la estructura del grafito en toda la masa, la inoculación producirá una reducción neta de la sensibilidad al espesor. Se precisa además, que el efecto de inoculación, aunque mucho menos sensible, existe aún en moldeos bastante gruesos, puesto que la estructura normal no lleva graifto interdendrítico de sobre-fusión.

Su efecto, paralelamente a este efecto grafitizante, la inoculación produce un afinado del grano con un aumento del número de células eutécticas.
(Fig. 1). Este efecto contribuye al mejoramiento de las características mecánicas y por esta razón la inoculación puede aun mejorar sensiblemente la resistencia de las fundiciones que sin inoculación tengan ya la estructura gris. Pero el efecto es tanto más limitado cuanto mayor sea el carbono equivalente que tenga la fundición y eventualmente se puede percibir la influencia en sentido inverso debida al aumento equivalente (o más bien del carbono grafítico) .

Resulta así, que en las fundiciones vecinas a la composición autéctica (Ce 4,3) la inoculación entraña una baja resistencia mecánica. La inoculación de fundiciones eutécticas e hipereutécticas es generalmente sin interés, ya que se encuentra a veces y en partes el grafito interdendrítico de sobrefusión ("Taches").

INOCULANTES DIVERSOS.

Fuera del ferrosilicio y el sílico-calcio, diversas aleaciones pueden ser usadas como inoculantes en las fundiciones.

Citamos en particular ciertas aleaciones al Zirconio con las cuales parece deseable el encontrar una proporción moderada de calcio. La eficacia de los productos de este género, constatada por varios autores es siempre superior a la del ferrosilicio, tanto por la reducción de la

profundidad de temple como por el afinado de grano y el aumento de la resistencia a la tracción. Ensayos del caso, han confirmado plenamente estas conclusiones.

(Anotamos que diversas referencias señalan igualmente la eficacia de estos productos para la inoculación de las fundiciones de grafito esferoidal). No obstante obtener por comparación con el sílico-calcio, datos menos concluyentes, nuestros propios resultados tienden más bien a establecer la superioridad de las aleaciones al Zirconio, mientras que trabajos americanos dan la preferencia al sílico-calcio.

Los productos a base de grafito o de carburo de silicio, parecen particularmente eficaces para reducir la profundidad de temple; se comienza igualmente a hablar de inoculantes al Bario (Siliciuro de Bario).

A continuación se encuentra una lista no limitativa de los principales inoculación con su composición global habitual (Tabla I).

TABLA I

INOCULANTES	Silicio %	Calcio %	Aluminio %	Otros elementos
Ferro-Silicio de 50%	47-51	O,2O	1	
Ferro-Silicio de 65%	65-69	O,3O	1-2	
Ferro-Silicio de 75%	74-79	O,5O	1-3	
Ferro-Silicio de 85%	80-89	O,5O	1-3	

Ferro-Silicio de 95%	90-95	0,50	1 - 3	
Sílico-Calcio de 50%	50-55	6-8	1- 2	
Calcio-Silicio	60-65	30 - 33	1	
Calcio-Silicio-Titanio	50-55	5 - 7	1, 25	Ti - 10%
Silicio-Manganeso - Zirconio	60-65	0,5 - 2	1,70	Mn 6.82;Zr 5-6 %
Ferro-Silicio - Zr	40-65	-	1-2	Zr 15-40%
Ferro-Si-Ca-Zr	65-70	5 - 6	0,1	Zr 5 - 7%
Sílico-Ca-Zr	50-55	15-20	-	Zr 15-20%
Producto a base de grafito	45-56	-	1,5	Carbono 45-50%

Se notará que el Sílico-manganeso no parece tener ningún efecto inoculante; señalamos por el contrario, la eficacia del Cerio en muy débil cantidad (0,01% de Mischmetal), no obstante un exceso de adición (0,1%), arriesgando sinembargo hacer la fundición enteramente blanca (Fundición de bajo contenido de azufre).

Es de advertir que la inoculación no es incompatible con la adición simultánea en la cuchara de elementos especiales, cuando se quiere por ejemplo, combatir

el poder carburígeno de algunos, entre ellos : Cromo, Manganeso, etc.. Ciertas Sílico-Aleaciónes han sido puestas en funcionamiento principalmente en los Estados Unidos para permitir efectuar en una sóla operación el doble tratamiento de adición y de inoculación.

Se dice por otra parte, que las fundiciones de contenido moderado de Cromo son sensibles al efecto de inoculación por las Sílico-Aleaciones. Se señala aun el empleo del ferro-sílico-zirconio que permite obtener simultáneamente una resistencia a la tracción elevada y una buena capacidad de amortiguamiento, teniéndose al mismo tiempo un aumento del coeficiente.

$$K = \frac{Rt}{E.H}$$

Es decir, una disminución del efecto de incisión del grafito.

En fin, se menciona igualmente un procedimiento que si bien se basa en una técnica diferente, es suceptible de producir efectos análogos a los de la inoculación: el borboteo de gas dentro del baño de fundición a través de un tubo de grafito, lo que representa probablemente una inoculación poniendo en suspensión partículas de grafito que provienen de las paredes del tubo. Se conoce en efecto, que el grafito es susceptible de producir gérmenes de grafitización, pero es difícil poner en suspensión y el borboteo es precisamente un medio cómodo y eficaz de realizar la operación.
Se obtiene así, al mismo tiempo que la disminución de la profundidad de temple, un fuerte mejoramiento de la maquinabilidad.

Además, ciertas experiencias han mostrado que el tratamiento por borboteo no presentaría el fenómeno de "desvanecimiento", clásico por el efecto de inoculación y del que hablaremos más adelante.

EFECTOS DE RECHUPE DEBIDO A LA INOCULACION.

Conviene señalar, que (según trabajos recientes sobre fundiciones hipoeutécticas comparadas en composición idéntica, con y sin inoculación) las modificaciones dimensionales de las piezas moldeadas en arena verde al solidificar, serían afectadas por la inoculación. Se observaría después de este tratamiento una expansión más fuerte durante la solidificación a causa del forzado de los moldes en arena verde y un aumento del volumen de los rechupes. Es así que para las fundiciones de alto fósforo (del orden del 1%), la inoculación conllevaría la formación de porosidades internas en casos en que ellas no aparecieran en el mismo metal sin efecto de inoculación. Los

mismos resultados serían observados para una fundición de 0,66% de fósforo. Para las fundiciones de bajo fósforo no se observan porosidades internas, pero el metal inoculado presenta un rechupe externo más fuerte.

Ensayos sistemáticos a carbono equivalente creciente de 3,9 a 4,3, y con un fósforo variable entre 1,04 y 0,025, habrían confirmado, sobre diversos tipos de moldeo, que la inoculación (sobre pasando 0.5% de Si) tiende a ser acompañada de su aumento de las dimensiones de las piezas moldeadas en arena verde y de una intesificación de los efectos de rechupe (rechupe externo y porosidades interiores). No obstante estos efectos relativos resultan más atenuados en las piezas más masivas y las porosidades internas no aparezcan después de la inoculación sino a partir de 0,24% de fósforo.

Si no se practica la inoculación sobre fundidores de alto fósforo estas observaciones merecen señalarse, por una parte porque muestran que el tratamiento debe ser aplicado con moderación y con buen conocimiento; de otra parte porque sugieren ciertas precauciones particulares en el moldeo. Es evidente que las fundiciones inoculantes que son generalmente muy fuertemente hipoeutécticas, tienden ya por si mismas a presentar una contracción de solidificación importante.

SEGUNDA PARTE (II)

INFORMACIONES PRACTICAS.

Composición y Elaboración de Fundiciónes a tratar por Inoculación

La inoculación no ofrece un verdadero interés, sino para fundiciones de buena calidad y bajo carbono y bajo silicio; el contenido de carbono debe situarse generalmente hacia 3%. Como para las fundiciones normales, hay que adaptar el contenido de Si a los espesores de las piezas teniendo en cuenta los efectos de la "inoculación"; este contenido de Si debe ser relativamente bajo y generalmente está comprendido antes de la inoculación, entre 0.80% (Piezas cuyo espesor es superior a 50 mm.) y 1,50% (Piezas de 5 a 10 mm. de espesor).

La mayor parte de los inoculantes gratitizantes utilizados, contienen un cierto porcentaje de Si que debe intervenirse en el cálculo del Si final.

Teniendo en cuenta la composición inicial, las cantidades de Si adicionadas varían comúnmente entre 0,2 a 0,8%.

Como se trata de fundiciones de calidad, el contenido de fósforo de fundiciones inoculadas debe ser tan bajo como sea posible, lo más corriente inferior o igual a 0,20%.

Las fundiciones inoculadas son las más comúmente elaboradas a partir de lechos de fusión que comprenden 50% de acero, así como a veces hasta 80 o 90% el resto es constituído por retornos y el ferro-silicio y el ferro-manganeso de adición para ajustar la composición. La fusión en el cubilote debe ser perfectamente regulada de manera a obtener una fundición de temperatura constante en el canal de colada para un inoculante dado. Parece en efecto que cada inoculante tenga un intervalo de temperatura, en el cual su acción es óptima.

Una temperatura muy elevada (1500-1550°C) tendrá el inconveniente de redisolver muy rápidamente ciertos gérmenes y de limitar así en el tiempo el efecto inoculante. Una temperatura muy baja traería dificultades, tales como heterogeneidad de estructura (Presencia de Cementita libre en gran cantidad), importantes sopladuras o defectos de alimentación.

PROCEDIMIENTO PRACTICO DE INOCULACION.

Mecánicamente, la inoculación tiene el problema de hacer entrar en la fundición las adiciones de densidad débil, sobre todo para el silico-calcio. En espera de contar con un procedimiento más perfeccionado, el sistema de inoculación que parece actualmente dar los mejores resultados, está principalmente compuesto de un tamiz vibrante y de una placa dosificadora igualmente unida a un vibrador.

NOTA: El dispositivo "Meehanite" es esencialmente compuesto por un distribuidor de paletas.

La placa dosificadora despacha los grano de inoculante en un tubo que desciende justamente encima del canal, lo más cerca posible del hueco de colada. Este tubo debe tener dimensiones suficientes para evitar que los granos puedan taponarse. Además, debe presentar una fuerte pendiente y sí es posible una parte vertical bastante larga de manera que las fuerzas de inercia de los granos que caen en caída libre, les permita penetrar en el metal líquido.

La precisión de la adición debe ser verificada períodicamente porque las variaciones en las cantidades de inoculantes introducidos, pueden

originar dificultades serias en las fabricaciones. El inoculante debe ajustarse muy progresivamente a la fundición líquida y el tiempo de inoculación propiamente dicho debe estar comprendido entre 60 y 80% del tiempo necesario para llenar la cuchara de la cantidad de fundición deseada.
Es preferible hacer la adición en una cantidad de metal superior a 100 kg. porque por debajo el enfriamiento de la fundición en la cuchara corre el riesgo de ser muy rápido.
La granulometría de los inoculantes tiene cierta influencia sobre la marcha del procedimiento, pedazos muy gruesos son difíciles de disolver perfectamente mientes que los granos finos o en polvo tienden a flotar sobre el baño y a oxidarse. Habitualmente, los inoculantes se presentan en granos de 4 a 10 mm.. La inoculación permite utilizar una misma fundición de base para la preparación de varias aleaciones, presentado calidades metalúrgicas diferentes, lo que simplifica evidentemente las condiciones de elaboración en las fundiciones donde se debe asegurar fabricaciones variadas.

CONTROL METALURGICO.

Se puede medir rápidamente la eficacia de la inoculación por medio del ensayo de temple; si la inoculación ha sido eficaz, la profundidad de temple será claramente reducida con relación a la dada por la fundición de base. Esta es la llamada técnica de la "Doble Probeta de temple", antes y después del tratamiento.

Este ensayo permite igualmente constatar que el efecto de inoculación desaparece con el tiempo. El dura más o menos largo tiempo según los inoculantes, las temperaturas de adición y de mantenimiento, así como las composiciones de base y las temperaturas de sobre calentamiento. Generalmente el efecto se hace sentir desde el primer minuto es máximo aproximadamente a los 2 ó 3 minutos de hacer la adición permanece estable durante algunos minutos (10 a 12) y desaparece casi totalmente en unos 20 minutos.

El empleo de ferro-silicio de 75 o 90%, exige condiciones de utilización más estrictas que las otras aleaciones. Su efecto se desvanece rápidamente (10 minutos aproximadamente), o no existe mientras cambién ciertas condiciones de incorporación (variación de temperatura, incorporación masive, etc.) el Sílico-calcio y las ferrcaleaciones al Zirconio son agentes más regulares y más enérgicos que el ferrosilicio.

El desvanecimiento del efecto de inoculación obliga a colar las piezas muy rápidamente después del tratamiento, inmediatamente después del limpiado de las cucharas de colada. Debe entenderse que después de la inoculación, la profundidad de temple no corresponde más a los datos

habituales establecidos para este control y su relación con el contenido de silicio en particular se encuentra profundamente modificada.

Entonces es conveniente establecer una nueva correlación entre el espesor de las piezas y la profundidad de temple de la segunda probeta por medio de controles micrográficos. La estructura de las piezas debe ser esencialmente perlíticos, sin ferrita ni cementita libre.

El aumento de resistencia mecánica debido a la inoculación debe producirse sin gran modificación de la dureza.

Algunas cifras obtenidas en el curso de ensayos son:

- Resistencia a la tracción y dureza en bebederos de ϕ 50mm.
- Fundición Testigo o de Ensayo 24 kg/mm^2 234 Brinell
- Después de la inoculación de 0,30% de Silicio:
  - a) En Ferro-Silicio de 90% - 32 kg/mm^2 234 Brinell
  - b) En aleación al Zirconio de 90% 37 kg/mm^2 231 brinell
  - c) En Silico-Calcio 37kg/mm^2 239 Brinell
  - d) En mezcla de Si-Ca+Aleación al Zirconio +Fe-Si.... 38,5kg/mm^2 237 Brinell

Las gráficas 2, 3 y 4 resultados más generales.

TERCERA PARTE (III)

FUNDICIONES "MEEHANITE"

Hacia 1924, MEEHAN, efectúa investigaciones y tiene patentes sobre el mejoramiento de las propiedades de la fundición por la regulación de la grafitización y la eliminación de discontinuidades en la estructura.

SMALLEY y sus colaboradores, profundizando los trabajos de MEEHAN encuentran métodos precisos e industriales para la obtención de las llamadas fundiciones "inoculadas".

Las principales patentes patentes relativas a la inoculación que fijan diferentes análisis de fundición, así como la composición y la granulometría de los inoculantes, han pasado a la heredad pública, pero el nombre de MEEHANITE no resume menos que una marca

declarada. Es la MEEHANITE Metal Corporation, cuya sede está en Nueva York (representada en Europa por la International Meehanite Metal Corporation I.M.M C. 66, Victoria Street-Londres S.W.1) que vende a los fundidores que solicitan la licencia de Explotación de la marca.

Esta licencia no se concede sino a los fundidores que tienen:

1- Una clientela y un gasto muy importante (El precio de la licencia será determinado por cada tonelada de fundición elaborada).

2- Medios de producción modernos y de control o las posibilidades financieras de adquirir estos medios.

El fundidor con licencia "Meehanite" se beneficia:

1- De una visita trimestral de un ingeniero, asesor metalúrgico de la I.M.M.C.

2- De una documentación muy completa (en inglés) y de proveniencia muy variada a la cual él aporta, no obstante, la contribución de su experiencia.

3- De un congreso anual que se tiene para Europa donde él puede encontrar otras licencias.

4- Del hecho de que muchos pedidos americanos se refieren a especificaciones "Meehanite" principalmente el material destinado a las refinerías de petróleo.

Con este propósito, notamos que algunos fundidores no licenciados pueden igualmente ofrecer a su clientela serias garantías de calidad, además, algunas fundiciones pueden ofrecer bajo nombres diversos fundiciones elaboradas siguiendo técnicas particulares que comprenden principalmente operaciones de inoculación, para la obtención de características mecánicas elevadas.

SIMBOLIZACION DE LAS FUNDICIONES DE MARCA MEEHANITE.

Es impropio hablar de fundición "MEEHANITE"; hay que decir "las fundiciones Meehanite", porque así como existe numerosas variedades de fundiciones, hay varias calidades o grados de fundiciones "Meehanite".

Es posible clasificar estas fundiciones en cuatro grandes categorías:

1- Fundiciones para mecánica general

GM-GA-CAH-GB-GC-GD y GE

Ordinariamente no aleadas, siendo "G" el símbolo de uso general.

Calidades vistas: Buena resistencia, capacidad de amortiguamiento y maquinabilidad.

2- Fundiciones resistentes en caliente (de bajo contenido de Cromo o al Niquel-Cromo):

HA-HR-HC-HD-HE-SC.

Siendo "H" el símbolo de "Heat resistencia"

Calentamiento contínuo o intermitente, resistencia al inflamiento a las deformaciones y a ciertas corrosiones en caliente.

3- Fundiciones resistentes al desgaste (Fundiciones al cobre, al niquel-Cromo de estructura sorbítica o martensítica.)

WA-WAH-WB-WBC-WEC-WH.

Siendo W el símbolo de resistencia al desgaste (WEAR)

La abrasión, la erosión, la fricción de rodamiento y la fricción de resbalamiento no se producen.

4- Fundiciones resistentes a la corrosiones alcalinas o ácidas, con contenido en elemento aleante variable según las corrosiones previstas.

CB - KC y CC.

Cada categoría comprende cierto número de grados.
Cada grado corresponde, en general, a un espesor medio de pieza el inoculante utilizado en proporciones variables según los grados, es el silico-calcio. La elección de una categoría y de un grado de Meehanite, es decir la elección de las características físicas y del análisis químico de la fundición, debe ser fijada con el trazado de la pieza en colaboración estrecha entre el cliente y el fundidor.

Estas disposiciones preliminares que son tomada, el moldeo de la pieza y la elaboración del metal, se efectúan en las empresas de fundición "Meehanite" en principio a título de control en todos los

estados. Estos controles permiten establecer estadísticas de donde se sacan enseñanzas para operaciones venideras de fundición.

PARTE CUARTA (IV)

TEORIA PROVISIONAL DE LA INOCULACION.

Diversas teorías han sido propuestas para explicar el mecanismo de la inoculación, pero ningupa parece enteramente satisfactoria en la actualidad. Se admite que la inoculación trata de provocar los gérmenes de grafitización que harían falta. Estos gérmenes podráin ser, por ejemplo de partículas sub-microscópicas de óxidos, cuyo sistema cristalino es tal que podrían exitar la cristalización del grafito (que se produce en el sistema exagonal). Este papel podrían ser desempeñado por la sílice, el aluminio, óxidos diversos, el grafito mismo y según ciertos autores, por inclusiones como de carburos, nitruros, cianuros, etc.

No obstante es clásico que las fundiciones que han sufrido un sobrecalentamiento a temperatura elevada (por encima de 1450°C aproxim.) tienen una tendencia marcada a la sobrefusión, lo que en la teoría procedente se explica por una destrucción progresiva de gérmenes de cristalización inestables por encima de esta temperatura crítica. Se puede advertir en efecto, que las fundiciones líquidas contienen siempre una abundante proporción de átomos de carbono que pueden reducir todos los óxidos mientras la temperatura sea suficiente.

Esta propiedad está representada de manera particularmente clara sobre el diagrama de la figura 5 que da en funciób de la temperatura la variación de energía libre AG, acompañado la fijación de una molécula de O_2 por diferentes elementos.

Entre mayor sea el valor absoluto de A, que es negativo, mayor es la tendencia a realizarse la reacción; la afinidad de una reacción que es precisamente medida por la expresión A=AG.
Para todos los óxidos metálicos, la afinidad de dormación disminuye con el aumento de la temperatura, a causa del término de variación de entropía AS que es negativo (absorción de moléculas gaseosas en un producto sólido).

$$= G = - H + T S$$ (H=variación de de entalpia)

Pero para la formación de CO la variación de entropía es positiva,

(aumento del número de moléculas gaseosas) y A aumenta con la temperatura; la afinidad termina entonces por ser más fuerte que la de cualquier óxido metálico.

Según el diagrama teórico de la figura 5, la SiO_2 sería reducida hacia 1500-1550°C, para el MnO la reducción se sucedería hacia 1400°C; así parece ser efectivamente en las fundiciones.

Como por otra parte, el grafito se disuelve a alta temperatura, se comprende que el sobrecalentamiento puede hacer desaparecer los gérmenes pero no da conocimientos precisos sobre su naturaleza.

La solidificación se hace entonces con un retardo importante en la temperatura del intervalo eutéctico, las células eutécticas son poco numerosas (por tanto de grandes dimensiones) y el grafito aparece (al menos en su centro, donde la cristalización ha comenzado) bajo una forma muy fina y muy ramificada.

La inoculación tendrá entonces por objeto, incorporar al baño "desoxidado" a alta temperatura elementos susceptibles de fijar el oxígeno y de reemplazar los gérmenes destruídos. El mecanismo de su acción, supone entonces la presencia de una atmósfera oxidante; experiencias recientes de laboratorio han demostrado en efecto, que los inoculantes no tienen efecto en fusiones al vacío (con adiciones igualmente al vacío). Este hecho constituye una observación interesante en favor de la teoría procedente que se encuentra igualmente confirmada por una observación práctica sobre la ausencia del efecto de inoculación en un baño de fundición elaborado en atmósfera reductora o confinado al horno eléctrico. El efecto puede entonces restablecer por adición en el baño, antes de la inoculación, de una cierta cantidad de mineral que aporte el oxigeno necesario.

Por otra parte, se ha mostrado con ensayos sistemáticos, que el silicio químicamente puro no tiene efecto inoculante; se entiende que sea así a alta temperatura en las condiciones donde los gérmenes de silicio no puede existir en el estado estable en el baño de fundición, debido a la reducción por el carbono. La presencia de ciertos elementos externos, parece necesarioa para la eficacia inoculante del ferro-silicio; en particular el aluminio y el calcio; es interesante anotar que estos elementos son muy hábidos de óxido y forman óxidos que no son reducidos por el carbono en las condiciones habituales de elaboración de las fundiciones (fig.5) Hay que pensar entonces que estos

reductores fuertes no actúan como desoxidantes de la fundición, si no por el contrario, como fijadores de oxígeno, que proviene del exterior. Se ha señalado en particular que las partículas de Al_2O_3 pueden servir de gérmenes.

Esta teoría se encuentra no obstante con algunas dificultades para explicar principalmente el desvanecimiento del efecto de inoculación, fenómeno que se produce en un tiempo variable del orden de algunos minutos a una media hora, por ejemplo, y que es acelerado por un sobrecalentamiento.

Es necesario suponer entonces, una desnaturalización progresiva de los gérmenes producidos por reacciones químicas o por fenómenos físicos secundarios en el seno del metal líquido.

Se puede imaginar por ejemplo que se puede producir una coalescencia de partículas, siendo la pérdida del efecto de germinación paralela a la disminución del número de gérmenes. También se puede atribuir el desvanecimiento a un simple ascenso de las partículas redondeadas de óxidos por decantación debido a su forma, los gérmenes de grafito tendrían menos movilidad en el baño, lo que explicaría la persistencia del efecto relacionado con el borboteo.

Por otra parte es bien conocido que las fundiciones "oxidadas" y frías tienen tendencia a solidificarse en estructura blanca, tal vez aun con neutralización de los gérmenes. Según las hipótesis avanzadas por ciertos autores, podría formarse una reacción de las partículas de óxido FeO o MnO con los gérmenes SiO_2, dando por resultado la formación de partículas de silicato de hierro o de manganeso que no tienen las caracteristicas cristalográficas necesarias para provocar la cristalización del grafito.

La explicación propuesta es evidentemente muy esquemática y se deduce fácilmente que la multitud de compuestos complejos que pueden formarse en una fundición inoculada expuesta al aire, varías según las condiciones experimentales resultando la realidad mucho más complicada.

El factor temperatura en particular juega evidentemente un papel preponderante en la inoculación, pero los datos al respecto parecen aun muy divergentes.

Se señala finalmente que el caso de las fundiciones de grafito esferoidal, que parece implicar fenómenos particulares de germinación, no se trata en el presente artículo.

ELEMENTOS ACTIVOS DE LA INOCULACION.

Entre los elementos que acompañan al silicio y que están presentes en contenidos variables en los inoculantes usuales, dos parecen jugar un papel particularmente activos: el Aluminio y el Calcio.

a) Aluminio.

Las adiciones de silicio químicamente puro, no tienen poder inoculante y el ferro-silicio parece igualmente sin efecto si a la vez está desprovisto de aluminio y de calcio.

Los ensayos realizados para determinar el poder inoculante del Aluminio puro, son aun poco concluyentes. Las adiciones en muy bajos contenidos (0,005 a 0,08%) han tenido poco efecto sobre el número de células eutécticas, pero permiten un aumento de la resistencia a la tracción, con un resultado óptimo.

Para una adición de 0,04% de Aluminio. Contenidos más altos resultan sin efecto sobre las características mecánicas, pero una adición de 0,5% de aluminio produce una reducción sensible de la profundidad de temple. Este fenómeno había sido ya señalado por A. LE THOMAS en 1933. No obstante, la influencia sobre la forma del grafito y la eliminación del grafito y la eliminación del grafito D en particualr, parece incierta. Resultados más positivos corresponden al empleo de ferro-silicio que contenga simultáneamente ciertas proporciones de aluminio y de calcio; al respecto se dan algunos conceptos en el parágrafo siguiente:

En cambio, todos los autores concuerdan en reconocer que la presencia de pequeñas cantidades de aluminio en la fundición, causa frecuentemente la aparición de películas de alúmina así como de picaduras en las piezas moldeadas en arena verde. Estas picaduras serían debidas a la aptitud particular que tiene la fundición cargada de aluminio para fijar el hidrógeno, en particular el que es producido durante el llenado del molde por la descomposición de la humedad de la arena (Pero puede igualmente ser introducido en otro orden de operaciones) Este gas, tomado fuera del metal en la solidificación, produciría entonces, cavidades de forma redondeada, de pared interior brillante

y dispuesta en red más o menos densa bajo la piel de las piezas. Los contenidos de aluminio en la fundición más desfavorables para las picaduras, están comprendidos entre 0,01 y 0,1%.

Por consiguiente la utilidad, por una parte, de controlar cuidadosamente las cantidades de ferro-silicio adicionadas, sea en el lecho de fusión, sea en el canal como inoculante y por otra parte, de utilizar un ferro-silicio con contenido limitado de aluminio. Se cree que sería deseable que la proporción de este elemento en un ferro-silicio de 75% no sobre pasa de 1,5 a 1,7% al máximo. (Por lo demás se señala que las picaduras de aluminio tienen más tendencia o producirse en las fundiciones que contienen magnesio, tales como las fundiciones tratadas para la obtención del grafito esferoidal).

B. Calcio

El calcio puro, según trabajos americanos, tendría un efecto inoculante mayor y permitiría, con adiciones entre 0,1 a 1% suprimir totalmente el grafito D, una proporción de 0,75% daría entonces características mecánicas óptimas. Pero otros trabajos, no confirman enteramente estos resultados y concluían una eficacia demasiado limitada para el calcio solo. Lo que es cada vez admitido de manera general, es que el calcio es un elemento necesario en los inoculantes, en que el aumenta siempre la eficacia, asegurando la realización de todas las características de las fundiciones inoculadas. Poca profundidad de temple, grafito en láminas regulares, aumento del número de células eutécticas y mejoramiento de la resistencia mecánica.

Parece ventajoso utilizar inoculantes que contienen a la vez aluminio y calcio; muy buenos resultados han sido obtenidos por ejemplo con los ferro-silicios siguientes:

Silicio	Aluminio	Calcio
80	1,4	0,8
85	1,25	0,6

Buenos resultados experimentales, han sido igualmente obtenidos con el empleo de ferro-aleaciones con contenidos menores de aluminio (0,5) y mayores de calcio (2,4 a 6,8%). Como por otra parte el calcio no tiene tendencias a producir picaduras en las piezas, se ve que no trae sino ventajas su presencia en los inoculantes del comercio.

Por otra parte, la eficacia inoculante del sílico-calcio es de manera general, considerada superior a la del ferro-silicio, lo cual ha sido confirmado por ensayos hechos en el Centro Técnico de la Fundición de Francia.

No obstante, el sílico-calcio tiene el inconveniente de una baja densidad reduciendo el rendimiento de su introducción en la fundición líquida e igualmente una producción abundante de escorias que son susceptibles de ser introducidas en el metal moldeado. De ahí la necesidad de tener precauciones particulares (Cucharas, teteras, tampas de escorias, coladas restringidas con dispositivos de obstrucción, etc.)

Por otra parte, un autor japonés señala que la inoculación del sílico-calcio en una fundición nitrurada, es muy eficaz pero que hay el riesgo de formarse la cianamida cálcica ($Ca\ CN_2$) que puede descomponerse posteriormente con liberación de nitrógeno, ocasionando picaduras.

Se señala en fin, que el sílico-calcio no produce efecto inoculante sobre las fundiciones previamente tratadas con magnesio (Fundiciones de grafito esferoidal.)

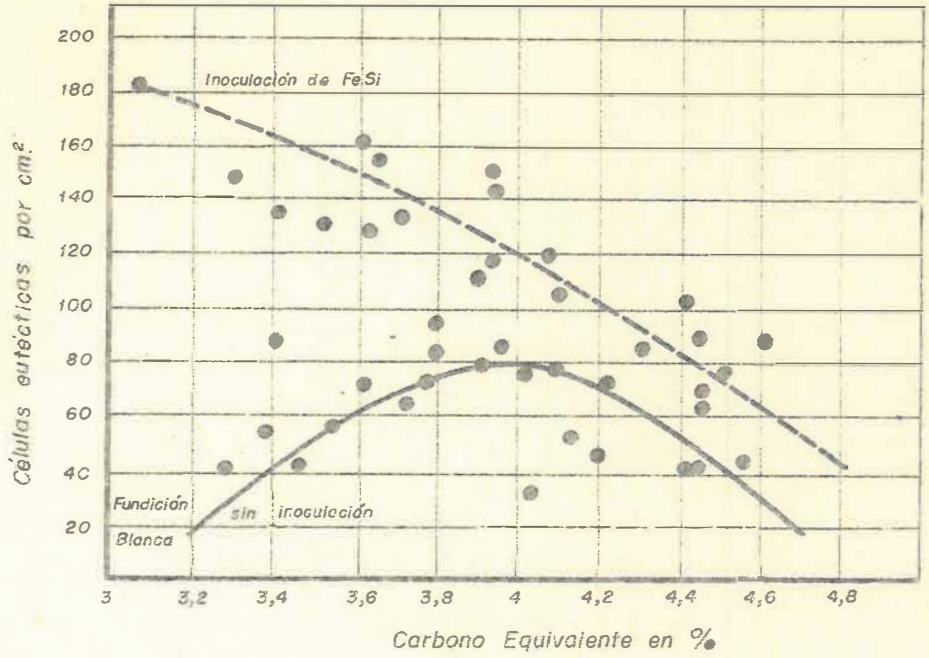


FIG. 1 – Relación entre las células eutécticas y el carbono equivalente en fundiciones inoculadas y no inoculadas.

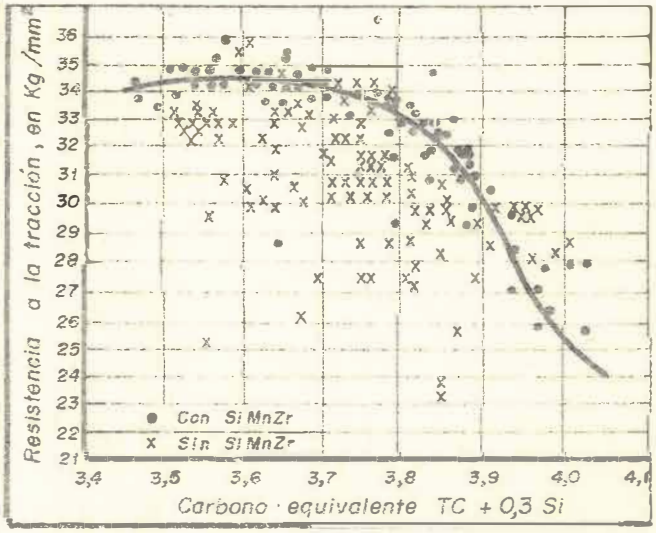


FIG. 2 – Resistencia a la traccion, en función del carbono equivalente para fundiciones inoculadas o no inoculadas.

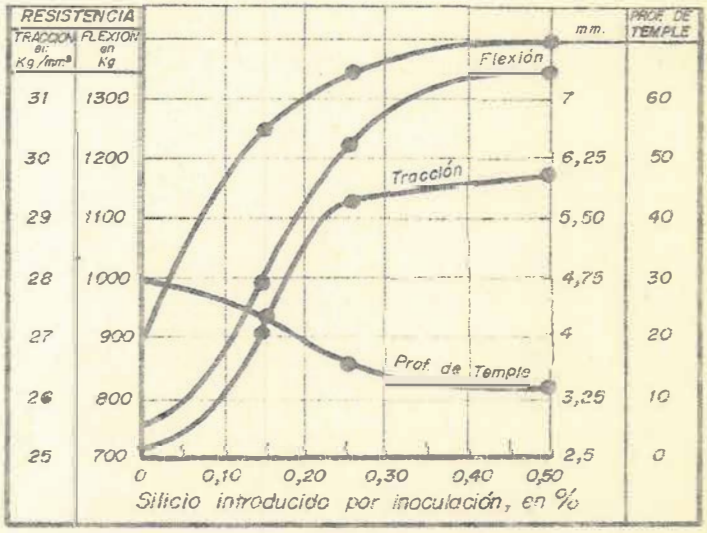


FIG. 3 – Modificaciones de las características de una fundición gris, en función de la inoculación (Ensayos segun la norma : ASTM A 48-56)

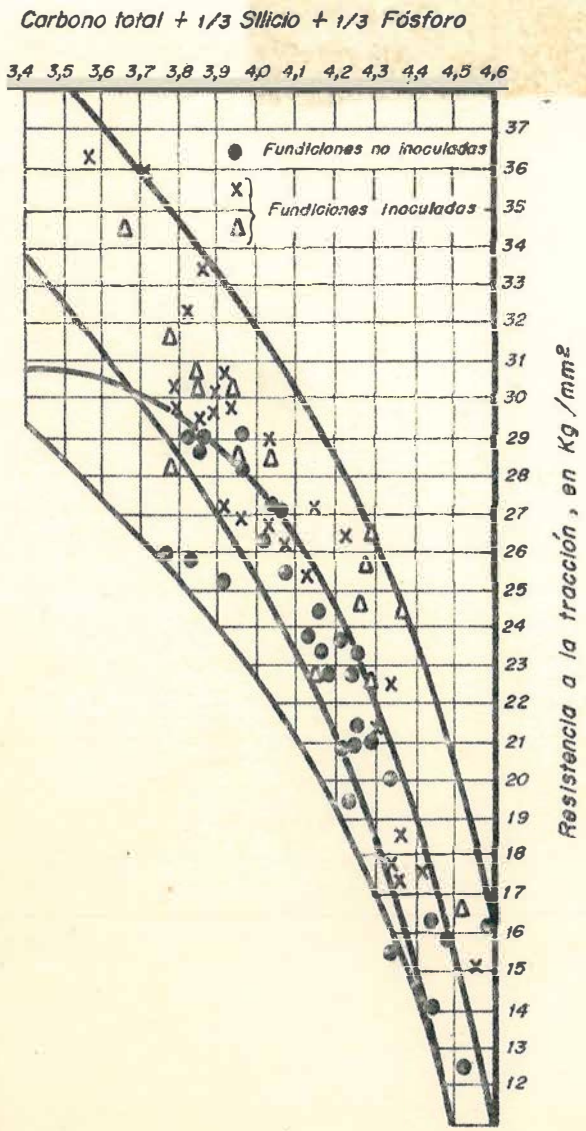


FIG. 4 — Relación entre el equivalente de carbono y la resistencia a la tracción de las fundiciones de base y las fundiciones tratadas con los inoculantes.

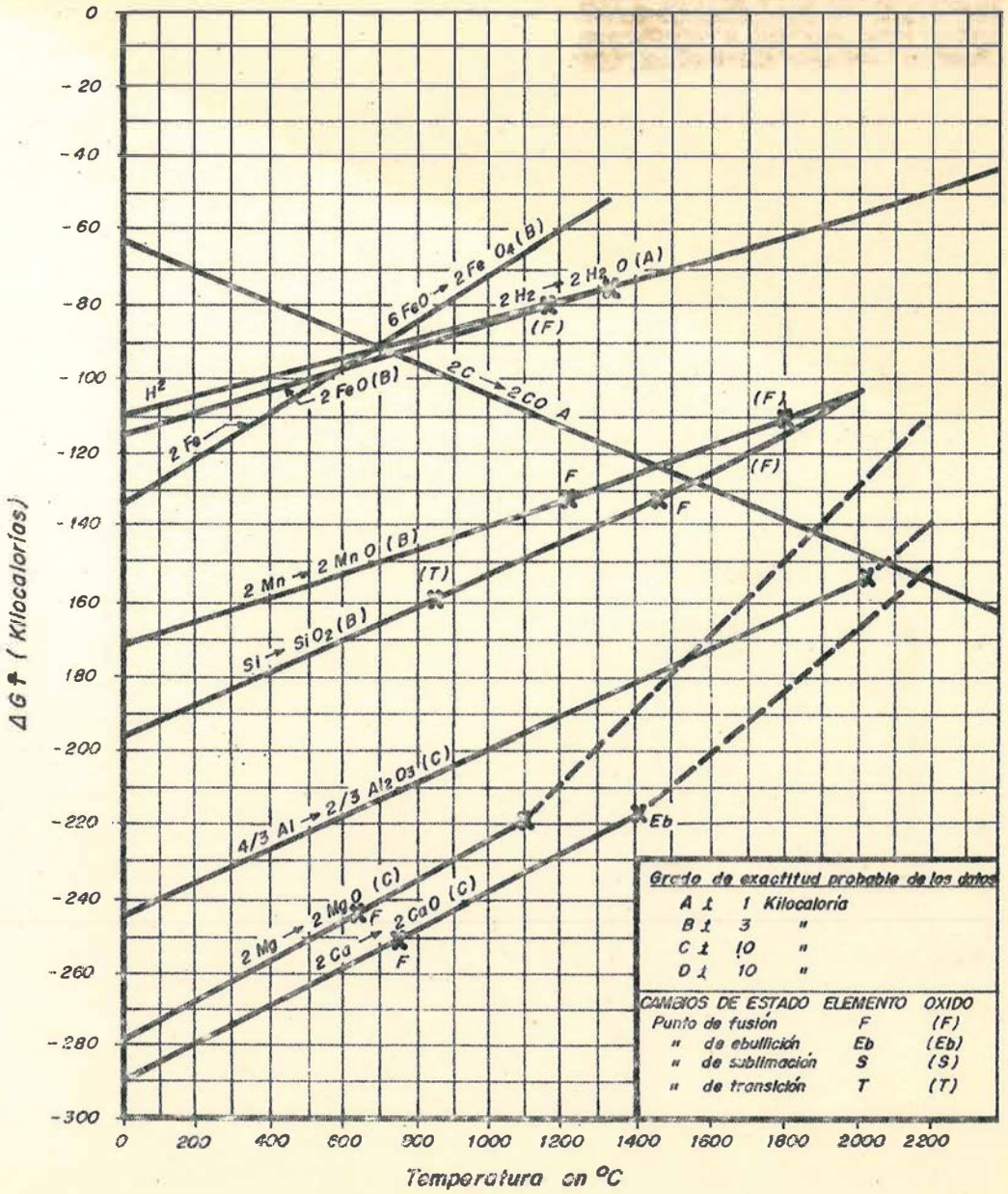


FIG. 5 — Variación de energía libre que acompaña la conversión en oxido de un mol de oxígeno.

SENA
CENTRO NAL. de FUNDICION

Fecha : Mayo / 76
Dibujó : J. F. M.
Revisó :