

Experiencias en Cuba de la producción de piezas fundidas de fundición gris esferoidal (FGE), un material de elevadas cualidades y propiedades.

MSc. Francisco Mondelo García¹ y MSc. Carlos Díez Cicero²

1 Prof. Auxil. Dpto. Metalurgia (UDM). Fac. Mecánica. ISPJAE. Tel. 6828768, 8624287. E mail: fmondelo@udm.cujae.edu.cu

2 Prof. Auxil. Mecánica aplicada y gráfica. Fac. Mecánica. ISPJAE. Tel. 2602267. E mail: ccicero@mecanica.cujae.edu.cu

Resumen.

El trabajo expone alternativas posibles de acceder a fabricar fundiciones grises esferoidales (FGE), así como conocimientos, experiencias y métodos empleados en su producción en Cuba, contando por lo tanto con un material de elevadas cualidades y propiedades tecnológicas en explotación. Se dan materiales básicos utilizados en los procesos de obtención de la FGE, lo cual incluye el proceso de recarburación de estas aleaciones ferrosas, más las operaciones de nodulización e inoculación, junto a los controles bases en sus operaciones fundamentales, para fabricar piezas con la calidad y certificación requeridas. Se tienen resultados experimentales productivos de estas fundiciones nodulares, con marcas de diversas estructuras, propiedades mecánicas y composiciones. Se valora además resultados de la sustitución de piezas de aceros por FGE con posibilidades de obtener, por tratamiento térmico los hierros austemperados (ADI) y elementos económicos comparativos de la factibilidad de fabricación de la fundición sintética en piezas FGE con chatarras de aceros básicamente y recarburantes nacionales de carbón vegetal, como variante alternativa.

Introducción

Sabemos las condiciones que generaron la aparición de las fundiciones grises esferoidales (FGE) o nodulares en 1926 en EE UU y paralelamente en Europa, donde el desarrollo tecnológico e industrial y de hecho el militar necesitaba de materiales y aleaciones de menor peso, costo y mayores propiedades mecánicas y de explotación, para hacer frente al desarrollo de los nuevos equipos y tecnologías que demandaba el mercado internacional, se lograron primero con los procesos de inoculación, por la MEEHANITE y sus hierros de alta resistencia mecánica patentados. Estas aleaciones ferrosas tienen una limitante de nula elongación, solo característico hasta ese momento de los aceros, es por eso la posibilidad de aparición de la FGE, potencialmente muy útil para la industria y la vida económico social en este punto.

La FGE o nodular es un nuevo material de mayor campo de aplicación comparable al de los aceros, con elevada resistencia mecánica, resistencia al desgaste con alta dureza, elongación y buenas propiedades de fundición. Tienen posibilidad de lograrse piezas fundidas de diversos espesores sin limitante de tamaño, una característica frenada en la fundición gris maleable (FGM), que tenía también altos consumos de tiempo y de energía, invertidos en su fabricación, algo ventajoso para la FGE, incluyendo a los propios aceros, los que han cedido terreno ante las nuevas posibilidades de las fundiciones nodulares. Actualmente estas FGE son tratadas térmicamente por austempleado con un revenido posterior en baños de sales, hasta lograr los ADI, una nueva gama de materiales con muchas mayores propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste, al aligerar en espesor aún más las piezas fundidas diseñadas, respecto al estado inicial de colada.

Para lograr estas aleaciones ferrosas son necesarias dos operaciones básicas: la nodularización y la inoculación, sin las cuales es imposible realizar y lograr con la debida

calidad las piezas con FGE, junto a una racional y óptima tecnología de fundición para lograrlas. Nuestro país no ha estado al margen de la posibilidad de lograr la FGE, para aplicarlas en piezas con mayor exigencia y requerimientos en diversos equipos. A pesar de los intentos antes del triunfo Revolucionario de 1959, solo a partir de 1959 el gobierno revolucionario ha emprendido variados programas de desarrollo de ramas diversas, que han necesitado siempre de materiales fundidos exigentes y procesos controlables, lo cual comenzó con el uso de aceros, aleaciones no ferrosas y posteriormente en nuestras industrias con los hierros grises producidos, cuyas propiedades no eran elevadas, lo cual dejaba poco margen a la calidad de las piezas fundidas. La etapa de los años 1980-1990, el auge industrial y la necesidad de aplicación de la fundición de elevada resistencia mecánica en ramas la como: automotriz, naval, petroquímica y mecánica ha requerido de la FGLaminar inoculada y la FGEsferoidal aleada, derivó que el país insertara la FGE en la industria cubana. Otro elemento importante es la necesidad de varios organismos como: SIME, MINAZ y MINBAS, para introducir y establecer la producción posterior de la FGE en Cuba.

Los primeros en comenzar a producir FGE experimentalmente en cubilotes (sin elevadas cualidades) entre 1960-1970 son fundiciones del MITRANS y el MICONS, En los años 1970-1980 ya organizados los ministerios y organismos, se cuentan con fundiciones comenzando a emplearse la FGE en piezas responsables. El mayor desarrollo de producción de la FGE y la FGL de alta resistencia se experimenta entre 1988-2002 en el SIME, con el auge de la producción de piezas automotrices, de alta responsabilidad y el desarrollo automotor nacional de piezas de repuesto a escala industrial, para la industria mecánica cubana. La producción representó en FGL el 70- 80% de su volumen y la FGE entre 30-20% del total. Se trabajaba ya con disciplina tecnológica, organización productiva y controles en proceso en piezas logradas por moldeo manual o mecanizado, empleando moldes en verde o en seco, junto al fraguado en frío en caliente, con arena-resina y el proceso arena-silicato-CO₂. La cultura tecnológica gestada se elevó, desarrollando pruebas tecnológicas a escala industrial con la FGE caracterizada, hasta obtener los hierros austemplados ADI. Posteriormente otras industrias del SIME han seguido el camino de la FA UNECAMOTO Lisa, son entre otras: FHA Holguín, Planta Mecánica Santa Clara, Planta Mecánica de Moa del MINBAS y Cubana de Bronce del MINAZ.

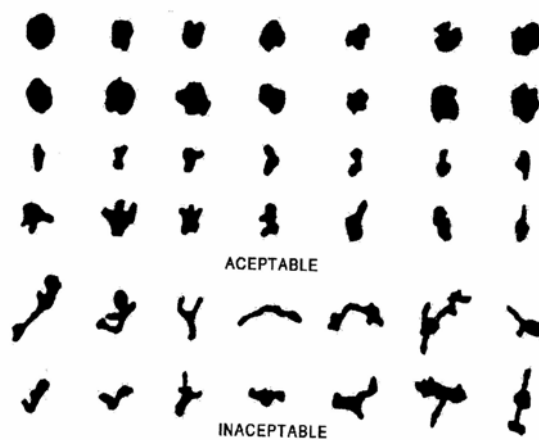
A partir de los años 1999-2002 la producción de los talleres de fundiciones del SIME y otros ministerios ha mermado, ocasionando paros o eliminación de muchas fundiciones por variados factores ya conocidos Las consecuencias han sido nefastas hasta el presente y aunque se ha comenzado un proceso de transformación y rescate de las producciones nacionales fundidas el camino es difícil para salvar y reconvertir esta industria, no obstante se dan pasos junto al proceso de perfeccionamiento empresarial y la capacitación del personal en nuestra institución (UDM) en temas de especialidad, así como la cooperación y asesoría a talleres en la experiencia de fabricación de FGE. Por tanto el trabajo tiene como objetivo exponer antecedentes, experiencias, posibilidades de fabricación y controles tecnológicos logrados en la producción de piezas fundidas de FGE en Cuba a partir de las propias posibilidades, condiciones de sus talleres y resultados económicos de su introducción. Por tanto estos resultados son de gran utilidad a muchos, incluso con limitados recursos para producir FGE.

Grafitización, composición, estructura e influencia de factores en la FGE.

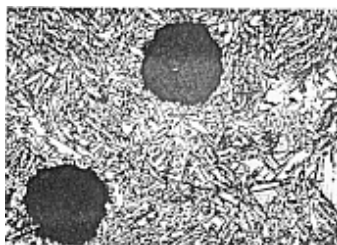
En los hierros grises la inclusión del grafito es beneficiosa, ayudando a soportar grandes vibraciones y absorberlas sin efecto negativo, son elementos de auto lubricación, para frenar la fricción y el desgaste de pares entre aleaciones, soportando cualquier tipo de desgaste variado. Son muy buenos en la resistencia a la corrosión ínter cristalina por tiempo prolongado. Las propiedades mecánicas de los hierros fundidos crecen a medida que el tamaño de las inclusiones de grafito decrece, su número crece, su forma se esferoidiza, los espesores de pared en piezas son más finos y la matriz se hace más fina. Lo anterior permite diseñar piezas de estas aleaciones con menos peso, espesor y menor gasto de metal.

Los picos de tensiones crecen mientras mayor y más gruesas sean los granos de grafito, así como menor el número de estas inclusiones dispersas por la matriz. Los hierros modificados

hipoeutéticos o tratados, tienen de tamaño pequeño y fino estas inclusiones de grafito, aumentan su número y se hacen dispersas por toda la matriz, con lo que el pico de tensiones es menor, al igual que cuando son ovaladas o esferoidales esta inclusiones, ya que la concentración de tensiones residuales disminuye, su incidencia es más uniforme y racional sin llegar a crear micro fisuras y grietas posteriormente que deterioren el material. Los hierros vermiculares y nodulares conservan estas propiedades y tienen mayores propiedades mecánicas con las formas regulares (Dib. 1), las irregulares las concentran más, siendo estas últimas negativas en la FGE con calidad. La influencia en el caso de la estructura para la FGE esta dado por la estabilidad de los elementos aleantes y/o bases (C+Si) a estabilizar componentes estructurales (Dib.2) como: la Perlita (Pe), Ferrita (Fe) u otras componentes (Bainita, martensita, etc.), salvo que contribuyan con la grafitización o la faciliten en la cristalización primaria o secundaria.



Dib. 1 Grado de regularidad de las inclusiones de grafito de la Fundición esferoidal.



A) FGE Acicular (ADI)



B) FGE Ferrítica no atacada



C) FGE Perlito Ferrítica

Dib. 2 Estructuras metalográficas de la FGE

Elementos grafitizantes y perlitizantes, que además no afectan la inoculación los tenemos a diversos espesores de paredes. Ver tabla 1. En la práctica experimental de nuestras industrias y talleres de fundición se ha trabajado, para lograr piezas de fundición gris de altas cualidades y propiedades mecánicas como las FGE inoculadas (ver Dib. 3 b), objeto de este trabajo.

Tabla 1 Perlitizantes en relación al espesor de pared de pieza y el por ciento empleado.

Espesor de pared	% de Níquel (Ni)	% de Cobre(Cu)	% de Estaño(Sn)
Fino	1	0.5	0/0.1
Mediano	2	1	0.1
Grueso	3	1.5	0.1

Experiencias de fabricación de FGE y métodos empleados.

La producción se inició con el método de nodulización en cámara presurizada, utilizando Mg metálico puro, promovía pérdidas elevadas y bajo rendimiento muy tempranamente en su empleo, además de lo costoso del proceso, altos mantenimientos, deterioro de las juntas y la cámara, así como altos requerimientos durante el proceso, lo cual supuso su sustitución por el método de nodulización en cazuela (abierta o cerrada), utilizando prealeaciones de Mg con FeSi, que además de ser más eficientes y dar más rendimiento de Mg al metal del baño líquido, durante la nodulización, desprenden menos efecto pirotécnico de vapores de Mg, por tener en la composición del nodulizante (prealeación) de bajo a muy bajo por ciento de Mg con menos costo y gastos de fabricación. Por lo tanto este método de nodulización en cazuela, queda generalizado por excelencia en nuestras fundiciones, utilizándolo regularmente, para fabricar FGE en la entidad Sidero Libertad y en general en el resto de las fundiciones de piezas del país, incluida la F. Automotor UNERCAMOTO.

La primera variante se empleo con el método Sandwich propiamente, el cual recubre el nodulizante con chatarra fina o de recortería de acero, pero si no se tiene control del la relación D/H de la cazuela puede tenerse fluctuaciones de la calidad de la FGE obtenida como pasaba en la fundición FA UNECAMOTO, para lo cual se utilizó una variante de método de cazuela abierta, pero no Sandwich, sino el nodulizante aglomerado, llamada Tigger. En nuestro caso específico el método tigger combina nodulizante aglomerado con capa protectora de mezcla de arena – resina, colocada sobre el nodulizante echado en el fondo de la cazuela. Con esta forma se eliminaron fluctuaciones de composición, propiedades y estructura en el metal obtenido. El nodulizante granulado, se adiciona a la cazuela previamente preparada en proporción variable entre 2-3,5% del metal líquido. En el hierro tratado un Mg residual mínimo de 0.03 – 0.04%, es positivo para producir el grafito esferoidal, obteniendo la mejor combinación de características mecánicas. Se han empleado nodulizantes aglomerados, compactados o granulados y suelto, pero el objetivo es siempre el mismo la obtención de FGE con la calidad requerida. El método de obtención de FGE por proceso Inmold fue aplicado raramente para obtener FGE, aunque se tuvieron, resultados positivos experimentales en la F.A. UNECAMOTO y en otra fundición ya desaparecida como Calabazar “Osvaldo Sánchez”. Los nodulizantes utilizados básicamente en la producción de FGE son productos importados y certificados, para uso en cazuela del tipo:

- Nodulizante Mg (4-7%): FeSiMg, FeSiMgCe.
- Metal base: alto %C, bajo %Si, %S 0,06 max.

Otros factores a controlar en el proceso de nodulización empleados en nuestros talleres son:

- Nodularización modificante del metal en cazuela entre 1470-1500 °C.
- Obligatoria inoculación del metal, posterior a cada modificación entre 1390-1430 °C
- Desulfuración parcial del metal líquido antes de la nodularización por método:

*Tapón poroso (con N₂ y Ar soplado removido, el desulfurante Ca₂ C echado al baño).

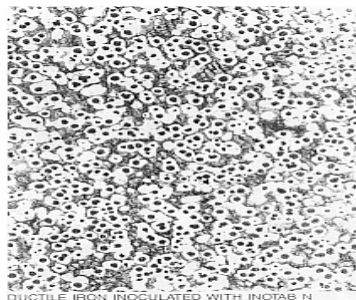
*Soplado en lanza (el desulfurante Ca₂C se insufla al baño con aire a presión)

Otra operación del proceso de fabricación de FGE con calidades es la inoculación, la cual procede después del tratamiento con magnesio, adicionando pequeñas y variables cantidades de inoculante granulado. En la FGE la ausencia de inoculación genera capas blancas de carburo aún con la presencia parcial de grafito residual (Dib. 3a). Al realizar la misma se genera mayor cantidad de nódulos de grafito tal como sucede en Dib. 3b, del metal no vertido a molde, sin perder el efecto u ocurra el desvanecido (retornando el efecto inverso con temple o

blanqueo). En este efecto de desvanecido o reacción inversa a esferoidización (faeding) se pierde el Mg residual libre en metal y se combina con carbono libre del metal, hasta formar carburos. Las cantidades o dosis de agentes inoculantes gráficos complejos es suficiente una adición de 0.09/0.25% (llega a 0,35-0,45%) del baño líquido y en los simples su cantidad varia hasta 0,5-1% y depende de la calidad de este, empleo, potencia. Entre los tipos de inoculantes tenemos: FeSi, SiCa, FeCrSi, SiMnZr, FeSiCe, etc. El tamaño de las mismas es de gran importancia y dependen del tamaño de la cuchara, tiempo de permanencia en la misma y tipo de inoculante. El inoculante empleado ha sido simple y complejo, siendo este tipo (Inoculin24-25) último el de más uso en fundición como el de siguiente composición: 60/65%Si, 2%Mn, 2/4%Zr, 1,5/3%Al, 1-2%Ca, 0,3%Mg y el resto Fe base. Su tamaño de grano está entre 4-7 mm. En las fundiciones cubanas como en la Fundición Automotor de la Lisa, perdidas considerables de temperatura por $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en cazuelas, le hacen emplear temperatura de inoculación cercanas a los 1400°C , empleando proporciones de inoculante entre 0,3-0,4% del metal a tratar (incluso al utilizar Inoculines 24,25, 65 y 80, SiCa, etc.).

A modo de resumen las experiencias de nodulización en nuestras empresas y talleres de FGE se enmarcan en los siguientes elementos claves:

- Nodulización: Bajo Mg (3-7%), bajo Ce (0,75-1,5%) y alto Si (45-55%).
- Granulado 4-15 mm.
- Temperatura $1470-1510^{\circ}\text{C}$. Usa 2,4-3,4% de nodulizante
- Metal base de %C alto, Si 0,9-1,4% y %S 0,06 máxima
- Usan cazuelas abiertas de dimensiones prefijadas en altura y diámetro, con cajón para nodulizante.

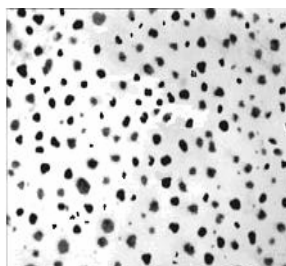
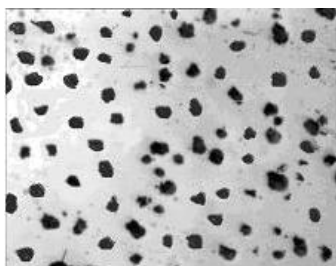


A) FGE no inoculada

B) FGE inoculada

Dib. 3 Evaluación de la FGE no inoculada (A) e inoculada (B)

Los métodos más usados de inoculación en nuestros talleres de producción de FGE por su acción decreciente en efectividad y en el conteo de nódulos son: Inoculación doble en cazuela (Dib. 4b), Inoculación simple en 2-3 partes, Inoculación simple en cazuela (Dib. 4a).



A) Simple inoculación

B) Doble inoculación

Dib. 4 Tratamiento de la FGE con simple (A) y doble inoculación (B). para evaluar el conteo de nódulos.

En el país nuestras fundiciones no usan la inoculación Inmold y sobre el chorro solo la usó temporalmente la FA UNECAMOTO, con muy buenos resultados. Este conteo de nódulos

también depende del tipo de nodulizante y el tipo de inoculante, además del método de nodulización e inoculación. Al emplear nodulizantes FeSiMgCe o FeSiCe se obtiene un mayor conteo de nódulos respecto FeSiMg, al igual que los inoculantes complejos del tipo FeSi con con Al, Ca, Zr, Ba, Sr y otros sobre los simples. En nuestras fundiciones se trabajan con inoculantes complejos en simple y doble inoculación preferencialmente, para distribuir la dosificación del inoculante. En nuestras fundiciones el inoculante se adiciona en dos partes, por inoculación doble o combinada, usando un 50/80% del inoculante inicial y luego el resto. Con la inoculación además se realiza una segunda desoxidación del baño, luego de esferoidizar con Mg. Los elementos básicos más importantes en la operación de inoculación y su control en nuestras fundiciones de FGE son:

- Inoculante: Alto Si (55-65%), con Sr, Ba, Mg, Al, Zr, etc. Tamaño 4-7 mm de este.
- Temperatura 1390-1430°C. Usa 0,35-0,4% máxima del metal.
- Limpiar de escoria al finalizar operación.
- Simple o doble inoculación. Aumenta conteo de nódulos.
- Metal final alto %C, Si(2,3-2,6%), %Mn 0,35 max., S 0,02%max. y P 0,08%max.

Los agregados térmicos más usados en el país, para la FGE son los eléctricos como: Horno de arco eléctrico (HAE) y el horno de inducción (HI) de variable frecuencia. Rara vez se han usado los hornos de tambor rotatorio y los de cubilotes, pues se necesitan procesos dúplex y/o cubilotes de soplo caliente. Normalmente se emplean revestidos refractarios ácidos en estos hornos a base de sílice o cuarzo y rara vez los revestidos básicos de magnesita.

La producción de hierro nodular se enmarca en dos periodos básicos bien definidos: Uno antes de 1991 (periodo especial) y otro hasta el presente posterior a este periodo. El primero que termina con la desaparición del campo socialista suministrador principal de materiales y materias primas para nuestras industrias de fundición. El Segundo periodo se enmarca posterior al periodo especial hasta la actualidad ha generado profundas diferencias y carencias, que determinaron la eliminación de importaciones, empleando hasta el presente como materiales de carga las chatarras de acero y un mayor empleo de recarburante respecto a los casos anteriores, incrementándose los consumos casi cuatro veces. Se inicia entonces el uso de recarburantes nacionales (carbón vegetal), sin disminuir la calidad de la FGE lograda.

➤ **1ra etapa hasta 1991.**

Carga metálica: Arrabio conversión P1-2, chatarra hierro, de acero, retorno nodular y ferro aleaciones. Además uso de arrabios LK y L.

Otros materiales: Recarburante (bajo %S e importado), fundente y coagulador de escoria.

Nodulizantes: Tipo FeSiMg y FeSiMgCe.

Inoculantes: Tipo FeSi Complejo o Inoculines 24-25.

➤ **2ra etapa hasta 2003.**

Carga metálica: Chatarra de acero, de hierro, retorno nodular y ferro aleaciones.

Otros materiales: Recarburante Carbón vegetal nacional, fundente, coagulante de escoria.

Nodulizantes: Tipo FeSiMg y FeSiMgCe.

Inoculantes: Tipo FeSi Complejo o Inoculines 24-25.

Los centros siguen la desulfuración con carburo de calcio Ca_2C y luego el carbonato de sodio NaCO_3 , cal, espato flúor y otros, acelerándola (eleva eficiencia) y empleando métodos de removido del baño al usar gas inerte o N_2 con el desulfurante, para %S base por encima del 0,06%. El desulfurante está entre 1-2% del metal a tratar. En la F.UNECAMOTO al usar refractario ácido nunca empleó la desulfuración del metal base, gracias a sus controles de metal base y de la carga, lo que determinó un metal base con %S por debajo de 0,06% máximo. Más adelante se da la composición a lograr en nuestras fundiciones (tabla 2 y porcentajes de influencia positiva y los elementos trampas, descodificadores o contaminantes de la FGE en tabla 3).

Tabla 2 Composición previa y final del metal para obtener la FGE.

En %	FGE
C	3,3 / 3,8 ($\pm 0,1$)
Si	0,8 / 1,4 (base) 2,3 / 2,8 (final)
Mn	0,3 / 0,5(base y final)
Cr	< 0,1-0,2 (final)
Ni (Mo)	< 0,1(<0,35)
Cu	0,7 / 0,9 – 1 / 1,5
Mg	<0,001(base) 0,03 / 0,08 (final)
S	< 0,05-0,06 (base) < 0,03(final)
P	< 0,07 (base y final)

Controles al proceso de obtención de FGE.

Los controles en el proceso de preparación de la FGE es muy completo y debe realizarse durante todo el proceso de fabricación de la aleación, a los materiales de carga, auxiliares, modificadores, nodulizantes y otros y posterior a este conforman todos los controles, junto a los que se deben realizar a las piezas de estas aleaciones durante su proceso de explotación-servicio para retroalimentarse, si necesita de mejoras o modificaciones del diseño de pieza, la aleación u otros elementos. Por tanto lo anterior por tanto nos remite a los siguientes tipos de controles:

- Control de inicio a materiales y materias primas que intervienen en el proceso productivo.
- Control durante el proceso productivo y en cada operación tecnológica de fabricación de la FGE.
- Control final al productivo obtenido de cada colada en piezas fundidas y probetas de lotes.
- Control post productivo o de explotación, durante el proceso de servicio de las piezas obtenidas en equipos y dispositivos a diversos medios de trabajo.

Tabla 3 Valores permisibles de elementos nocivos o no para la FGE.

Elemento	Admisible %	Matriz Perlita	Matriz ferrita
Al	0.08	0.08	0.02
Sb	0.02	0.003	0.002
As	0.02 / 0.1	0.02	0.1
Bi	0.003	0.003	0.001
Cd	0.01	-	-
Cu	1.5/2	1.5	0.15
Sn	0.1	0.1	0.02
Pb	0.005	0.005	0.002
Se	0.03	-	-
Te	0.02	-	-
Ti	0.04/0.05	0.05	0.04
Zn	0.1	-	-
Zr	0.1	-	-
Ni	2/3	2	0.15
S	0.02	0.02	0.02
V	0.1	0.1	0.02
Cr	0.15	0.1/ 0.15	0.05
W	0,1	0,15	0,005
B	0,02	0,005	0,005
Mo	0.1	0,3	0.02

A continuación se da un resumen de los controles más importantes, que se realizan en proceso y a materiales durante la preparación y obtención de la FGE en la F. A. UNECAMOTO.

➤ **Los controles se realizan a:**

***Carga metálica:** Chatarras de acero, de hierro y retorno nodular.

Tipo de control: Composición química, estado, peso de carga y tamaño.

***Metal base:** Composición química, peso, temperatura de vaciado, recalentado, vertido y limpieza del baño líquido.

***Nodulización e inoculación:** Composición del metal base a tratar, peso y volumen del mismo, tipo de nodulizante e inoculante, proceso empleado, su granulometría y temperatura de tratamiento.

***Metal final:** Composición química, limpieza, metalografía, dimensiones de piezas con este metal, acabado superficial de las mismas y propiedades mecánicas (de muestra de pieza y de probeta fundida aparte).

***Materiales auxiliares:** Estado técnico, conservación y preparación para utilizar de los nodulizantes, inoculantes, recarburantes, fundentes, coagulantes, etc.

***Tipos de control:** Composición química, granulometría, contaminación, temperatura de secado, masa a usar, etc.

Adicionalmente a los controles de proceso, se hacen otros en mezclas de moldes y machos como: humedad, promover gases, propiedades mecánicas de mezclas y de resistencia a la penetrabilidad, a la acción del metal y su empuje, acabado superficial y otros. Los controles finales a la aleación y las piezas que con ella se obtienen se toman por lote producido y por hornada o colada, para mejor control de fallas y defectos en procesos. Los mismos residen en los siguientes puntos:

- Composición química de muestra de pieza y probeta.
- Estructura metalográfica en probeta y en muestra de pieza.
- Propiedades mecánicas de probetas y de muestras de pieza.

Recarburación de la FGE y la Fundición Sintética.

La recarburación se realiza tanto en la carga sólida que se prepara, como en la carga líquida refundida. Trabajar con carga líquida entraña, que las adiciones de recarburante se dificulta adicionarlas, sobre todo cuando el %C base es alto, el recarburante es más ligero y volátil que el metal, por lo que en este caso es necesario métodos para empujarlo al fondo del baño, con soplo de gas a presión, con trozos de chatarra que lo empujan al fondo o el interior del baño. Al utilizar recarburante nacional de carbón vegetal, como importado en nuestras fundiciones es fue más factible y económico, incluso con mayor rendimiento de recarburación el empleo de adición de esta a la carga sólida en camadas para una mejor asimilación. La recarburación se facilita en estado líquido del metal al introducirlo con removido del baño, para mejorar disolución, dando mejor rendimiento de esta operación en hornos eléctricos como el de inducción. El rendimiento del proceso de recarburación, se concentra entre 55-61% en HAE, donde el removido está ausente y el rendimiento se dificulta con el metal líquido, mientras en el HI que si tiene removido del baño líquido está en el orden del 75-81% el rendimiento de la recarburación, mientras que con carga sólida el rendimiento es algo menor pero no menos del 10% respecto a cuando el metal es líquido. La granulometría empleada de recarburante es combinada entre 1-8 mm promedio. La temperatura de recarburación se realiza por debajo de los 1500-1510 °C, para evitar oxidaciones excesivas del carbono durante su introducción y recalentados del metal líquido. Partiendo de nuestra experiencia nacional se dan elementos resumidos del proceso de recarburación para la FGE.

➤ **Recarburación:** Aportan al baño metálico aumento del valor de Cfinal.

*Se realiza a temperaturas por debajo de los 1500-1510 °C max.

*Esencial recarburante de bajo %S importado y carbón vegetal cubano (más barato).

*Adicionado a carga sólida, camadas alternas con esta y metal líquido sumergido con carga o soplado.

En el caso de la fundición sintética con chatarra de acero y fuertes proporciones de recarburante de bajo %S (máximo 0,1-0,15% S en recarburante), se logra un metal base de alto %C y bajo %Si previo a la operación de nodulización. A continuación se dan algunos elementos bases en este proceso de fabricación de metal base para obtener FGE de alta calidad.

- **Fundición sintética:** Básicamente chatarra de acero, poca cantidad de hierro o retorno nodular con recarburante.

*Chatarra de acero 30-100% y el resto chatarra de hierro o retorno, hasta 90% de chatarra de acero y 10% o menos de chatarra de hierro o retorno

*Recarburante entre 2,5-6,5% del metal a tratar y granulado a tamaño 1-8 mm (ambos caso del punto anterior). Se emplea recarburante importado y en el caso específico nuestro carbón vegetal nacional.

*Usan hornos eléctricos de tipo: HAE o HI, ácidos solos o combinados.

Resultados experimentales productivos de FGE en el país.

Exponemos resultados, similares en varias empresas que han fabricado FGE, representadas en general por la F. Automotor UNECAMOTO, con amplia experiencia de FGE (más de 12 años de producción), Para obtener estructuras en piezas como: las sorbíticas FGE 80-2 o las bainíticas (ADI) tabla 4, logradas a pequeña escala industrial o semindustrial, requerimos de talleres de tratamiento térmico. En tabla 5 se observa un compendio de las marcas de FGE logradas en fundiciones del país, que generaba en La Lisa un 20-30% del volumen productivo de esta fundición automotriz.

- **Piezas fabricadas de FGE con estructura (bruto de colada).**

Ferríticas de marca FGE 38-17

Perlito Ferríticas de marca FGE 50-6

Perlíticas FGE 60-3 y 70-2

Sorbíticas de TT FGE 80-2

- Piezas responsables: Automotores, naval, petroquímica y mecánica responsable.
- Piezas de poca y alta complejidad de diseño, espesores estables o variables.
- Piezas en moldes arena (verde-seco) y metal.
- Piezas de tamaños variables desde 1Kg hasta 1000 Kg.
- Usan FGE aleadas con: Ni, Cu, Sn, Mo.
- Piezas reciben TT y recuperación por soldadura (Fe-Ni, FeNiCu y NiCu).
- Experiencias con TT, logrados hierros austemplados-aciculares (ADI) en baños de sales marcas: ADI 2-4.
- Se han sustituido variadas piezas de aceros al carbono y medio aleados por FGE, con resultados positivos.

Estructuras de piezas de FGE.

FGrís ESFEROIDAL (Nodular) de colada:

*Perlítica (Pe<70 al 95% y Fe< 30 al 5%).

*Ferrítica (Fe min. 70-95% y Pe max.25-30%).

*El grado de nodularización >85 – 95%.

*Forma del grafito tipo F VI, V.

*Tamaño de las inclusiones de grafito T 5–7.

*Cuento de nódulos: 120 a 300 nod / mm². ± 20-40 nodulos(depends del espesor de pieza y otros)

*Elevada nodularidad y % Si alto da % Pe menor que % Fe.

*Ausencia de esteadita y carburos.

*Tiempo de vertido es < de 12 min(máximo).

*Dureza en norma con rangos entre 200–280 HB para perlíticas o intermedias.

*Dureza en norma con rangos entre 140-190 HB para ferríticas o intermedias.

Cuento de nódulos de FGE no aleadas

- Aleación (simple inoculación) Dib.4a.

*Cuento de nódulos-----140 nod /mm²

*Área ocupada por grafito: más del 5% hasta 8%

*Dmáx de los nódulos-----100 MK

➤ Aleación (doble inoculación) Dib.4b.

*Conteo de nódulos-----240 nod /mm²

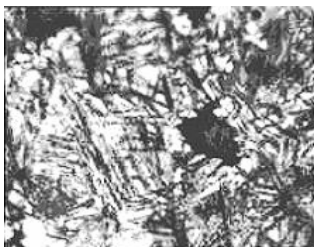
*Área ocupada por grafito: del 3% al 5%

*Dmáx de los nódulos-----de 40 a 60 MK

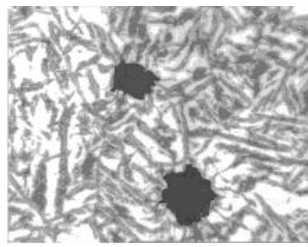
Tabla 4 Propuestas de normas de ADI según normas ASTM

Tipo de ADI	R Tracc. 103 psi(Mpa)	Límite elástico 103 psi(Mpa)	Alargamiento En %	Dureza HB (Bhn)	Resiliencia Min(ft – lb)
1	125(860)	85(585)	10	269 / 331	80
2	150(1035)	100(690)	7	302 / 363	65
3	175(1200)	120(830)	4	341 / 401	45
4	200(1380)	140(965)	2	375 / 461	30

Las FGE aleadas no se diferencian de las no aleadas por el conteo de nódulos, ya que este valor varía solo según el proceso de inoculación empleado. Las FGE tratadas por procesos de austemperizado o austemplado, tienen valores aún mayores de propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste (los ADI), permitiendo sustituir piezas de acero incluso bajo o medio aleado, con rediseño y pasar las FGE a austempladas. En muestras de piezas con este procedimiento observamos sus resultados de propiedades mecánicas y estructuras, con variable conteo de nódulos. Las FGE (ADI) del Dib. 6 se acercan a la marca ADI 2 (tabla 4) y las del Dib. 5 a la marca ADI 3-4.



Dib. 5 FGE–ADI austenizado a 925 °C y revenido en sales a 310 °C 30 min.
Bainita Inferior.



Dib. 6 FGE–ADI austenizado a 925 °C y revenido en sales a 370 °C 30 min.
Bainita Superior.

FGE-ADI con propiedades mecánicas (Dib5 y 6)

➤ **FGE-ADI** con 925°C austenizado, 370°C revenido 30 min. en sales:

Simple inoculación: Rtr1036,3Mpa, A4,8%

Doble inoculación: Rtr1036,3 Mpa, A6,2%

Dureza: 300-380HB. Bainita Superior.(Dib. 6)

➤ **FGE-ADI** con 925°C austenizado, 310°C revenido 30 min. en sales:

Simple inoculación: Rtr1284 Mpa, A4,6%

Doble inoculación: Rtr1358,7 Mpa, A4,8%

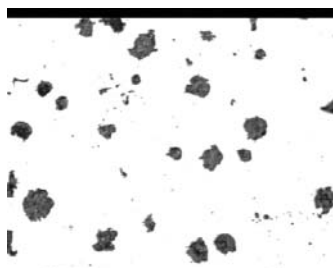
Dureza: 400-480HB. Bainita Inferior. (Dib. 5)

Tabla 5 Propiedades mecánicas, composición y estructura de FGE.

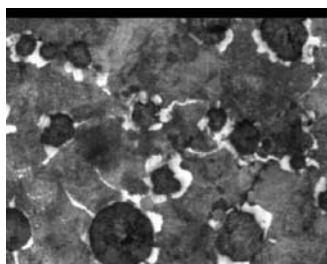
Marca, estructura FGE.Prop.Mec.	FGE 38-17 Fe	FGE 42-12 Fe	FGE 45-5 Pe Fe	FGE 50-3 Pe Fe	FGE 60-2 Pe	FGE 70-3 Pe	FGE 80-3 Pe
Dureza HB	140/170	140/200	160/220	180/260	200/280	229/275	220/300
Rb kgf/mm ² min	38	42	45	50	60	70	80
A (δ) %	17	12	5	3	2	3	3
C	3.4/3.8	3.4/3.8	3.4/3.8	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6
Si	2.1/2.8	2.1/2.8	2.1/2.7	1.9/2.4	1.9/2.4	2.6/2.9	2.5/2.8
Mn max.	0.4	0.4	0.4	0.5/0.8	0.5/0.8	0.6/0.9	0.6/0.9
P max.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
S max.	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cr max.	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ni	-	-	-	-	0.2/0.8	0.2/0.8	0.2/0.8
Cu	-	-	-	-	0.6/1.5	0.6/1.5	0.6/1.5
Mo	-	-	-	-	0.2/0.6	0.2/0.6	0.2/0.6

Elementos Económicos de FGE.

El efecto económico es muy visible al disminuir sus espesores respecto al original con un rediseño de las piezas. Además el costo de fabricación y el consumo energético bajan considerablemente si sustituimos el proceso convencional de fabricación de FGE por proceso de hierro sintético, empleando mayor cantidad de recarburante nacional de bajo %S (CV) carbón vegetal, sin alterar las cualidades de la FGE, en hornos eléctricos de revestido ácido sin desulfuración del metal base, según tabla 6. Los resultados se observan en Dib.7, cuyas propiedades mecánicas y micro estructural no se diferencian.



Sin atacar 100 x



Con ataque 200 x

Dib.7 FGE aleada y medio aleada con carbón vegetal (perlítica).

En H I (UM/ton)

P1	Chatarras	
Arrabio	C Importado	C nacional
470,6	334,6	280,6
571,44	435,44	381,44
Ahorros	136	190

En H A E (UM/ton)

P1	Chatarras	
Arrabio	C Importado	C nacional
543,8	413,8	348,8
664,8	534,8	469,8
Ahorros	130	195

Tabla 6 Ahorros comparativos de C. Importado y C. Vegetal en varios hornos eléctricos.

Indicadores a valorar	H Arco Eléctrico				H Inducción			
	Recarburante importado		Recarburante nacional		Recarburante importado		Recarburante nacional	
	FGL	FGE	FGL	FGE	FGL	FGE	FGL	FGE
Precio recarburante (UM/ton.)	250	1200	100	100	250	1200	100	100
Gasto recarburante (kg./ton.)	47,8	53,8	60,6	68,2	35,6	40,7	46,7	52,7
Costo (UM/ ton.) de metal)	11,95	64,56	6,06	6,82	8,9	48,84	4,67	5,25
Ahorro total UM/ton			5,89	57,74			4,23	43,59
% ahorro de costo de CV-CI			49,3	89,4			47,5	89,2

Conclusiones

- La FGE posee base productiva, de conocimiento y experiencia en Cuba para fabricarlo.
- Tiene amplias cualidades y posibilidades de explotación en varias ramas.
- Se produce a partir chatarras de acero en su mayoría con recarburante de carbón vegetal nacional (otros usan recarburante importados) en fundición sintética.
- Se obtiene de nodulización e inoculación en cazuelas con aleaciones especiales FeSiMg o FeSiMgCe.
- Sustituye piezas de acero con tanta o más calidad a menos costo y peso por pieza, por rediseño a menor espesor.
- Sus elevadas propiedades mecánicas y al desgaste, se amplían con austemperado (ADI).
- El conteo de nódulos eleva propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de FGE.
- La FGE requiere permanentes controles en su fabricación.
- Su calidad se certifica en marcas: Propiedades Mecánica, composición y estructura.

Recomendaciones

- Reanimar producción de FGE en talleres del país, por la importancia que reviste.
- Activar fundición sintética con chatarras de acero y recarburante nacional (CV), para abaratar costos.
- Desarrollar experiencias de sustitución de piezas de acero por FGE, evaluando el diseño.
- Establecer controles permanentes en la FGE, para obtener piezas con calidad.

Bibliografía consultada.

1. A.I.Gabertsettel, P.A. Korostilenko. Fusión y vaciado del horno No.9/. Editorial Construcción de Maquinaria. Leningrado 1980.
2. A. Moore. Selección de Recarburantes para fundición obtenida en Hornos eléctricos./ James Durrans and Sons Limited. Rev. Fundición No.227 de sept /1979.
3. A.M. Mijailova. Manual de tecnología de fundición. Editorial construcción de maquinaria. Moscu 1987.
4. C. Cicero, F. Mondelo y otros. Influencia del conteo de nódulos en las resistencia mecánica de la FGE austemperadas. Revista MECANICA 2004.
5. C. Cicero, F. Mondelo y otros. Influencia del conteo de nódulos en las resistencia al desgaste de las FGE austemperadas Revista MECANICA 2004.
6. E. Dotsch y H. Doliwa. Fusión económica en el H.I. de crisol de baja y media frecuencia.. Revista B.B.9 1987.
7. F. Mondelo. Análisis de deficiencias tecnológico-productivo-cualitativas de la fundición de piezas de hierro en cubilote. 1998-2002.
8. Proyectos Integrados de maestría de especialidad. 2do Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuba 1998.

9. F. Mondelo. Posibilidades de fabricación de piezas de FGL y FGE, empleando recarburante de carbón vegetal cubano. METANICA 2000 y MATERIALES 2002.
10. F. Mondelo y W. Suwardjo. Aplicaciones industriales del carbón vegetal cubano en la industria siderúrgica. METANICA 2003.
11. I. Masiero y J. Friedrech Reiner. Interacciones del refractario ácido con baño, carga y escoria, en Hornos de Inducción de crisol./. Revista Fundición No. 237 de 1980.
12. M.J. Selby. Algunos problemas que plantean los refractarios en Hornos de Inducción. Revista Fundición No. 222 marzo 1979.
13. N. Cornejo, N. Ayala, F. García y J. L. Enríquez. Fundición Sintética recarburante./. Revista Fundidores, mayo/1998.
14. R. Verriest. Datos recientes acerca de la recarburación en el Horno de Inducción. /. Fundición No.253 marzo-abril/1982
15. V.N. Ivanov. Manual Diccionario ilustrado de procesos de fundición. /1990/. Editorial construcción de maquinaria. Moscú 1990.
16. Documento de Desulco. (Superior./ Graphite Co.) 1992. Editora Firma.
17. Indicación e instrucciones tecnológicas de realización correcta de recarburación de hornos de fundición en hornos eléctricos y en cazuelas de vaciado 1997-2002./ Fundición automotor UNECAMOTO.