

# Prediciendo microestructura y propiedades mecánicas por análisis térmico

*Paper presentado en el 54th. Congreso Indio de Fundición de Pune 2006*



**Autores:** Ing. Sanjay Waghulde, V-SMART THERMOTECH PVT. LTD,  
**Traducción:** Juan E. Brignone, Brignone & Asociados

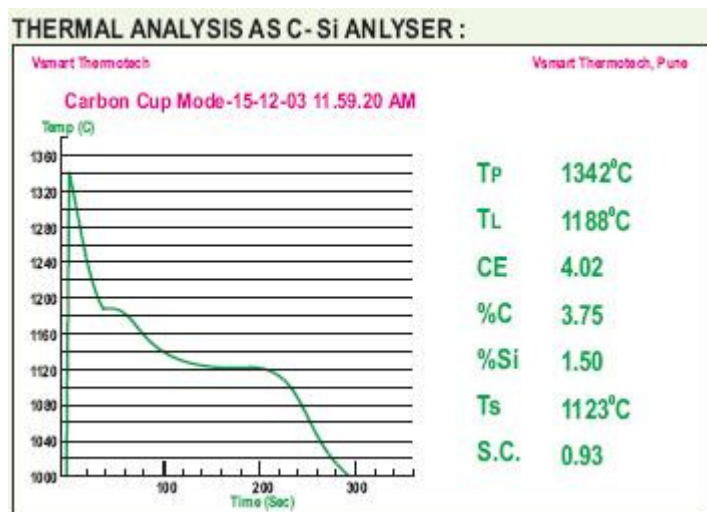
## Introducción:

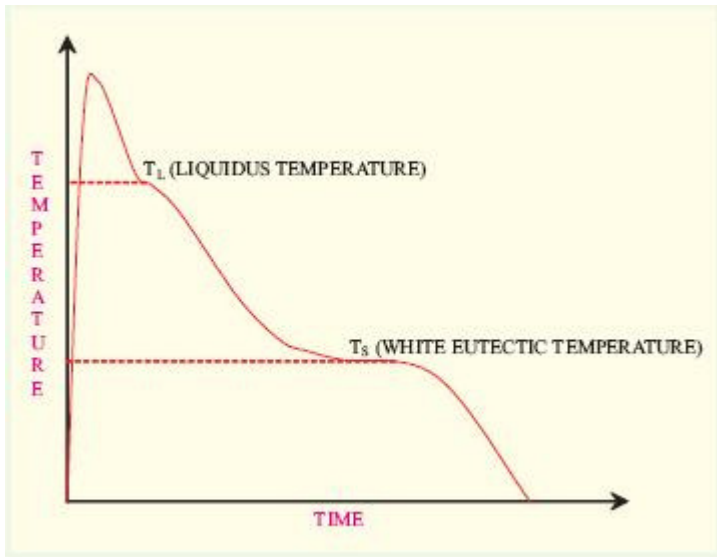
El panorama actual de la industria de la fundición muestra tremendos cambios por la competencia global, aumentando demandas y requerimientos para producir a tiempo y con precios muy competitivos.

El Sistema Avanzado de Análisis Térmico puede ayudar a mejorar la competitividad de la fundición actual, debido a un más efectivo control de proceso. Incluso pequeñas mejoras como la reducción del rechazo, tendrá un impacto sustancial en los beneficios y desde entonces las mejoras afectarán al total de tonelaje vertido. El Sistema Avanzado de Análisis Térmico puede ayudar a reducir el rechazo debido a causas metalúrgicas, a mejorar la producción, bajar las variaciones de las propiedades mecánicas, reducir los montos de inoculantes y las aleaciones de Mg.

El Análisis Térmico nos brinda información no solamente sobre Carbono Equivalente, % de Carbón, % de Silicio, también contribuye a la calidad de fundido para obtener resistencia a la tracción, dureza, microestructura, % de nodularidad, conteo de nódulos, efectividad de los inoculantes, conteo de celdas eutécticas. También nos brinda información sobre tendencia a la contracción, tendencia al acoquillado, índice de carburo, profundidad de cuña, etcétera.

## ANÁLISIS TÉRMICO PARA ANALIZAR C Y SI

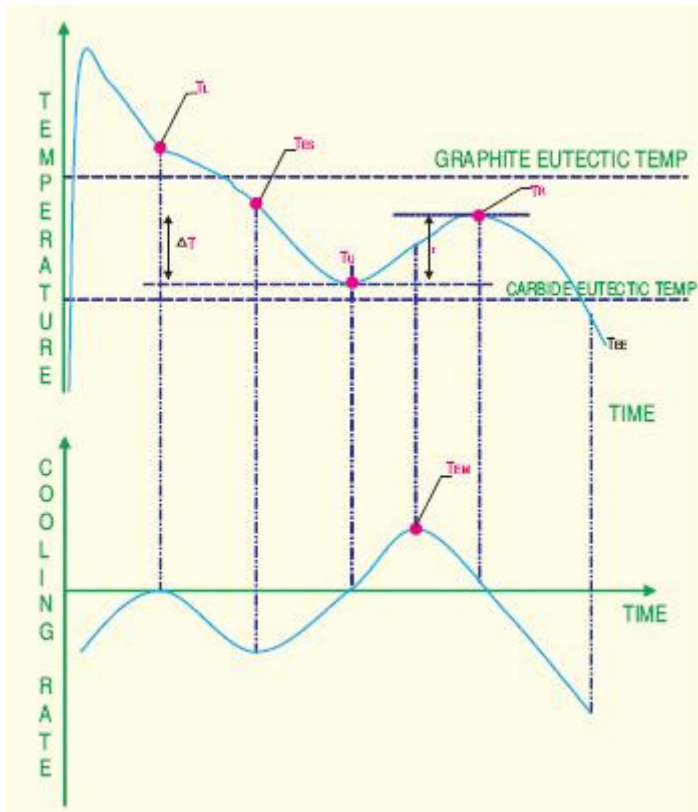




**Figura 1.**  
**Una típica curva de enfriamiento mostrando líquidos y temperaturas de eutécticos blancos conveniente para cálculos de carbono y silicio.**

Tradicionalmente el Análisis Térmico fue usado para mostrar dos distintos puntos térmicos. Primero la Temperatura del Liquidus y segundo la temperatura del eutéctico blanco. Las copas cubiertas de telurio son usadas para determinar la temperatura del eutéctico blanco de esas dos temperaturas y el % de CE, el % de C y el % de Si pueden ser determinados.

### **ANÁLISIS TÉRMICO PARA MONITORIAR EL ESTADO DE NUCLEACIÓN DEL BAÑO LÍQUIDO**



**Figura 2.**  
Una típica curva de enfriamiento y su primera derivada para la solidificación hipoeutéctica del hierro gris.

- $T_L$**  = Temperatura del Liquidus
- $T_{ES}$**  = Temperatura de comienzo de la solidificación eutéctica
- $T_{ES}$**  = Temperatura de subenfriamiento eutéctico
- $T_R$**  = Temperatura de recalcencia
- $T_{EE}$**  = Temperatura del final de la solidificación
- $T_{EM}$**  = Índice de máxima recalcencia
- $r$**  = Recalcencia
- $\Delta T$**  = Grado de subenfriamiento

El líquido enfría a una velocidad determinada por la geometría del componente y el método de colado seleccionado. Una vez que el hierro líquido fue vertido dentro del molde, se enfría continuamente hasta que la temperatura  $T_{EM}$  sea alcanzada cuando los núcleos empiezan a crecer en forma de dendritas; durante el enfriamiento adicional, el calor latente dispersa lentamente el índice de enfriamiento tal como muestra la figura 2.

El líquido continúa enfriando hasta de que la  $T_{ES}$  sea alcanzada, cuando los núcleos eutécticos comienzan la formación de células eutécticas acompañada por la liberación de calor latente, hasta que el enfriamiento quede detenido en la  $T_U$ .

Luego de eso, el crecimiento de las células eutécticas comienza a establecerse e inicia la recalcencia. Esto es acompañado por la reducción de la "driving force" antes que un constante estado de crecimiento de la temperatura  $T_R$  sea establecido como resultado del balance entre calor desarrollado y el calor quitado por enfriamiento.

Cerca de la compleción de la solidificación eutéctica, el calor latente liberado reduce gradualmente y la temperatura cae.

La solidificación está completada a la temperatura  $T_{EE}$

La ubicación de estas temperaturas y, por ende, de las características estructurales del hierro, son determinadas por varias partículas presentes en el líquido, que actúan como nucleantes para la

solidificación primaria y eutéctica. En orden de obtener la estructura del hierro necesaria para satisfacer las propiedades especificadas del componente, un fundidor debe controlar las variaciones de contenido de varios elementos como C, Si, Mn, S y P, de elementos menores como Al, Cu, Mg, Ce, Sr, Ti, Bi, etcétera y procesos variables como condiciones de moldeo, temperaturas de vertido, inoculación, potencial de grafitación, índice de enfriamiento, etcétera. Así, los métodos de monitoreo del proceso de solidificación son esenciales características del hierro fundido.

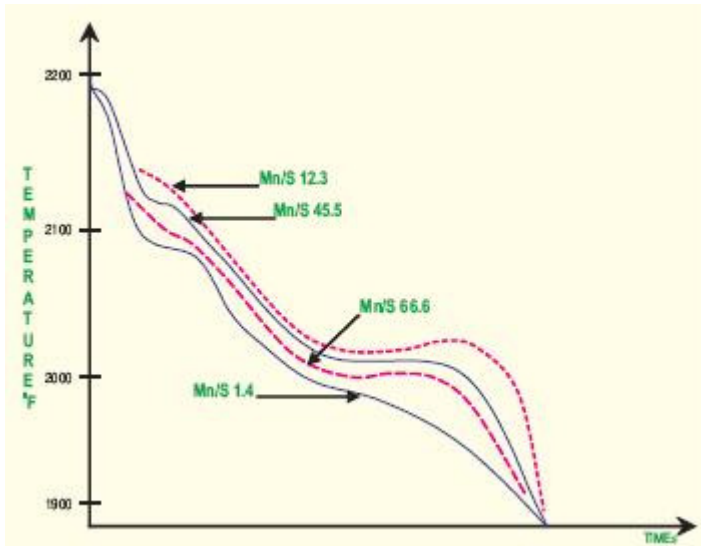
### **ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE LA SOLIDIFICACIÓN DEL HIERRO FUNDIDO**

Una curva de enfriamiento tiene la habilidad de grabar e identificar todos los eventos que ocurren durante el proceso de solidificación y ofrece la oportunidad de evaluar el efecto de los cambios hechos por el fundidor en la estructura primaria de solidificación.

La carga original de los elementos de mayor contenido (C, Si, Mn, S etc) en el fundido, el método de fusión y el tratamiento del metal líquido produce un hierro líquido con una potencial seguro de grafitización y con un nivel base de nucleación.

La solidificación del hierro sin inoculación o tratamiento nodulizante puede ser visto la curva de enfriamiento mostrada en la figura 2.

El primer evento de solidificación es la nucleación y el crecimiento de dendritas de austenita que comienzan en la temperatura  $T_L$ . El segundo evento significativo es la nucleación del eutéctico a  $T_{ES}$ . La ubicación de  $T_{ES}$  y de  $T_{ES}$  depende del nivel de nucleación en el líquido. Ha sido demostrado que en el hierro no inoculado, el más efectivo nucleante para el grafito son las partículas MnS. Así entonces, la relación Mn:S es significativa.



**Figura 3.**  
Efecto de S y Mn en la curva de enfriamiento de un hierro gris no inoculado con composición C 3,4 %, Si 1,9 % y P 0,07 %

**Tabla 1.**

|                            |    |      |     |     |
|----------------------------|----|------|-----|-----|
| Inoculant % CaSi           | 0  | 0.05 | 0.1 | 0.2 |
| Eutectic Undercooling°C    | 24 | 15   | 4   | 4   |
| cell count/cm <sup>2</sup> | 55 | 108  | 160 | 215 |

La influencia de la inoculación en la nucleación y el subenfriamiento en una lámina de hierro.

**Tabla 2.**

|                                      |    |     |     |     |
|--------------------------------------|----|-----|-----|-----|
| Cooling rate C/min                   | 60 | 120 | 200 | 375 |
| Eutectic Undercooling <sup>o</sup> C | 12 | 14  | 18  | 22  |
| cell count/cm <sup>2</sup>           | 57 | 75  | 94  | 113 |

### La influencia de la curva de enfriamiento en la nucleación y el subenfriamiento en una lámina de hierro.

Los efectos de la inoculación del hierro líquido son evidentes en las curvas de enfriamiento en la figura 3.

Cuando la relación Mn:S es alta el Mn y S están desbalanceados y el hierro está mal inoculado. Ambas  $T_U$  y  $T_R$  están bajas y la lámina de grafito es de tipo D.

Bajando la relación Mn:S sube el número de núcleos (conteo de células), también  $T_U$  y  $T_R$  crecen y la morfología de la lámina gradualmente cambia a tipo A.

Sin embargo, la más baja relación Mn:S deja libre S en el líquido, lo que promueve aumentos de la inoculación en el nivel de nucleación y aumenta todas la temperatura por encima de la eutéctica, cuya graduación dependerá del monto y tipo de inoculante. También promueve estructura de grafito del tipo A. Este efecto está ilustrado en la tabla 1.

Por otra parte, como está indicado en la tabla 2, el incremento de la curva de enfriamiento aumento el nivel de nucleación pero baja las temperaturas de la curva de enfriamiento.

La morfología del grafito en una lámina de hierro cambiará al tipo D con un moderado aumento del índice de enfriamiento.

Un aumento posterior conduce al hierro blanco a estar debajo de la temperatura Fe-Fe C del eutéctico.

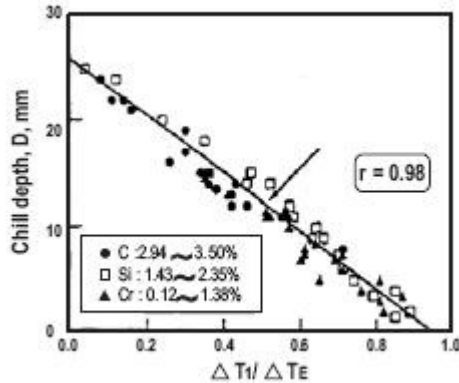
Este líquido es subenfriado significativamente con respecto a la temperatura del eutéctico grafitico y el eutéctico granítico puede nuclearse y crecer. El calor latente asociado con estos eventos, incrementa la temperatura del líquido remanente por debajo de de la temperatura Fe-Fe C del eutéctico. El líquido solidifica gris.

El acoquillado total ocurre con un rápido índice de enfriamiento. El hierro líquido enfría rápidamente bajo la temperatura Fe-Fe C del eutéctico a un índice suficientemente rápido como para prevenir recalescencia, creciendo la temperatura sobre la temperatura meta-estable de la temperatura eutéctica.

La tendencia al acoquillado aumenta tal como disminuye el valor de C.E.. por la fracción del líquido eutéctico y, por lo tanto, el calor latente desarrollado desminuye. Estas adiciones en la forma de moderados aumentos de O y S en hierros, con una relación Mn:S, reduce el subenfriamiento de la nucleación grafitica e incrementa el conteo de células por una más efectiva nucleación heterogénea. Los inoculantes tienen un efecto similar.

Por otra parte, adiciones de mayor monto de S, N y algunos elementos menores, combinados con un aumento en el índice de enfriamiento, aumentan el conteo de celular, pero con un enfriamiento aumentado. Esto es debido a la generación de subenfriamiento constitucional por las soluciones adicionadas y al subenfriamiento térmico que incremente los índices de enfriamiento. Si este subenfriamiento es extensivo, forma carburo meta estable.

La tendencia de chilling puede ser aumentada o disminuida por el ajuste del potencial de grafitización en el líquido. Esto es logrado con aleantes, que influyan en las dos temperaturas eutécticas. El comportamiento indicado en la figura 4 es para una normal concentración de soluto, usada en hierros fundidos.



**Figura 4.**  
Efectos o  $\Delta T_1 / T_E$  en la profundidad de cuña para varios elementos, C, Si y Cr.

Los elementos de grafitización aumentan o disminuyen la temperatura del eutéctico granítico y la temperatura del carburo eutéctico, respectivamente. Los estabilizadores de carburo disminuyen la temperatura del eutéctico granítico y aumentan la temperatura del carburo eutéctico.

Es importante analizar que la formación de carburos ocurre por diferentes razones y los remedios son diferentes. Aumentar el nivel de grafitizadores en el hierro es efectivo en reducir "chill". Sin embargo no es necesario, el mejor método es evitando carburos intercelulares porque los grafitizadores segregan alejándose de los bordes de grano.

La solución más efectiva es reducir el nivel de carburos estabilizadores, particularmente aquellos que segregan fuertemente.

La relación entre las características de la curva de enfriamiento y la microestructura del ejemplo puede ser estudiada, por las características de la curva de enfriamiento, para ser usadas en la predicción de la micro estructura del ejemplo. Esto prevé un rango de calidad en los testeos de control que puede ser aplicado rápidamente en cualquier estado de la preparación del hierro líquido en la fundición.

### **PREDICCIÓN DE LA TENDENCIA A LA CONTRACCIÓN Y DE LA DUREZA BRINELL**

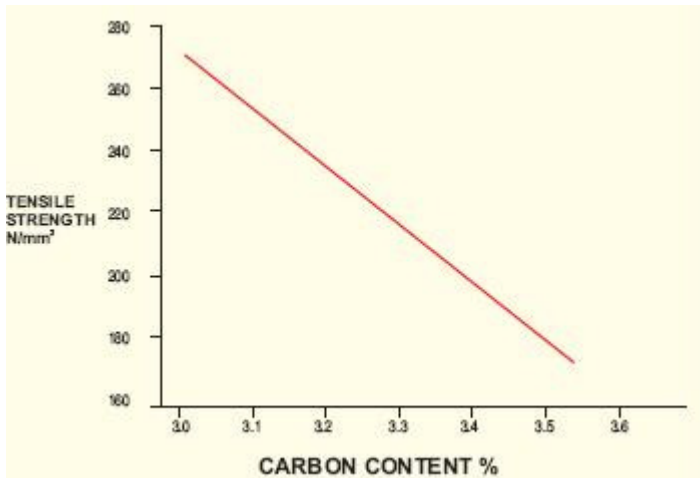
La mayoría de las normas de material especifican el hierro gris en referencia a su resistencia cuando son colados en probetas de un diámetro fijo. Para obtener varios grados de fundición, una variación en la composición química es necesaria.

Se puede considerar como fundición no aleada la compuesta por hierro, carbono, silicio y fósforo. Estos elementos tienen mayor efecto en la determinación de la dureza y de la resistencia del hierro fundido en un tamaño determinado.

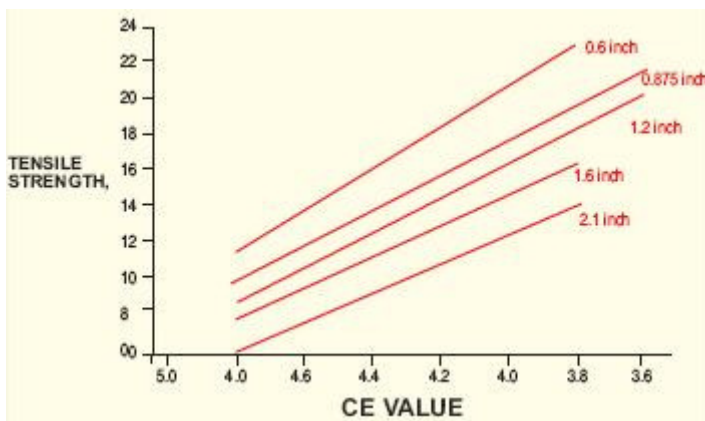
Las fundiciones utilizadas en ingeniería tienen valores de CE por debajo de 4.3%. Ante un incremento en la proporción de dentritas primarias presentes, así el valor de CE cae por debajo de 4,3%, y la resistencia y la dureza del hierro gris aumentan, respectivamente.

Así el valor de CE es un índice útil para la resistencia del hierro en un sector determinado de la pieza fundida. Para predecir resistencia y dureza más precisamente, es esencial un monitorear el conteo de células eutécticas, además del valor del CE.

El efecto del valor de contenido de carbono y carbono equivalente (CE) y la resistencia a la tracción puede ser ilustrado en un diagrama simple. Las figuras abajo muestran la conexión entre estos parámetros en el hierro gris.



**Figura 5**  
Efecto en la resistencia a la tracción ante un aumento del contenido de carbón en hierro gris.



**Figura 6**  
Resistencia a la tracción como función del valor de Carbono Equivalente en hierro gris.

### **MEDICIÓN DEL CONTEO DE CÉLULAS EUTÉCTICAS**

Para la medición del ECC (conteo de células eutécticas), tenemos que solidificar en gris, por lo que habrá que usar copas sin telurio. Una típica curva de enfriamiento está mostrada en la figura 2. Aquí podemos ver la temperatura de subenfriamiento (TU), recalescencia (r), y el índice de máxima recalescencia (TEM) en la primera derivada. Usando esta información, el ECC puede ser determinado.

El valor del conteo de células eutécticas puede ser usado para:

- Predecir la microestructura del hierro gris por la forma del grafito y distribución.
- Predecir la tendencia al acoquillado (Tendencia al acoquillado en hierro gris aumenta para niveles altos de células).
- Optimizar al inoculación
- Estudiar/Chequear la efectividad de la inoculación
- Comparar comportamiento de dos diferentes inoculantes.

### **FACTOR DE DECISIÓN SOBRE LA INOCULACIÓN**

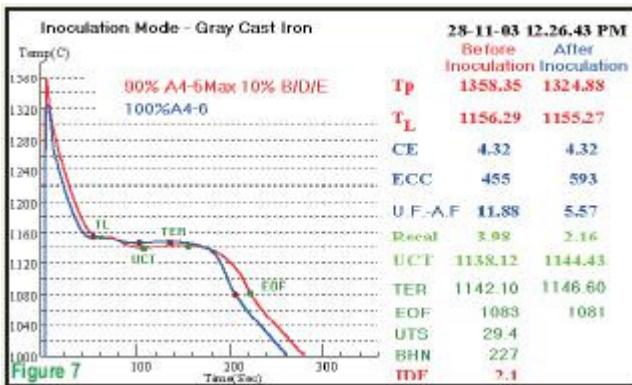
El factor de decisión sobre la inoculación (Inoculation deciding factor - IDF) nos brinda información sobre si el inoculante es usado efectivamente o no por las condiciones dadas del metal base. El efecto de la inoculación depende del nivel de nucleación del metal base y del tipo de inoculante.

$$\text{Inoculation Deciding factor (IDF)} = \frac{\text{Graphite Eutectic Temp.} - \text{TU of uninoculated metal}}{\text{Graphite Eutectic Temp.} - \text{TU of inoculated metal}} = \frac{\text{UIF}}{\text{AIF}}$$

**Fórmula 1**

- Si IDF es igual a 1: El efecto de la inoculación es nulo.
- Si el valor de IDF es menor a 1.3: Bajo contenido de cristalizadores efectivos en la mezcla durante la fusión. Equivocado material y/o errada inoculación.
- Valor de IDF entre 1.3 y 2.6: En caso de una inoculación perfecta, puede ser que haya una carencia en la lectura de la inoculación del hierro y otros factores que están influyendo en el hierro fundido.
- Valor de IDF entre 1.6 y 2.6: Caracterizan el mejor rango de operación. Buena relación entre la entrada y salida de inoculación.
- Valor de IDF mayor a 2.6: Son obtenidos con un alto número de cristalizadores efectivos. Peligro de inoculación excesiva, como así también de la gran posibilidad de “piping”. Si el valor es mayor a 2.6, entonces el hierro está “sobre inoculado”.

Así, variando el monto de inoculante en el nivel de nucleación del metal base, usted puede reducir los defectos de fundido y las variaciones de las propiedades físicas.



**Figura 7**



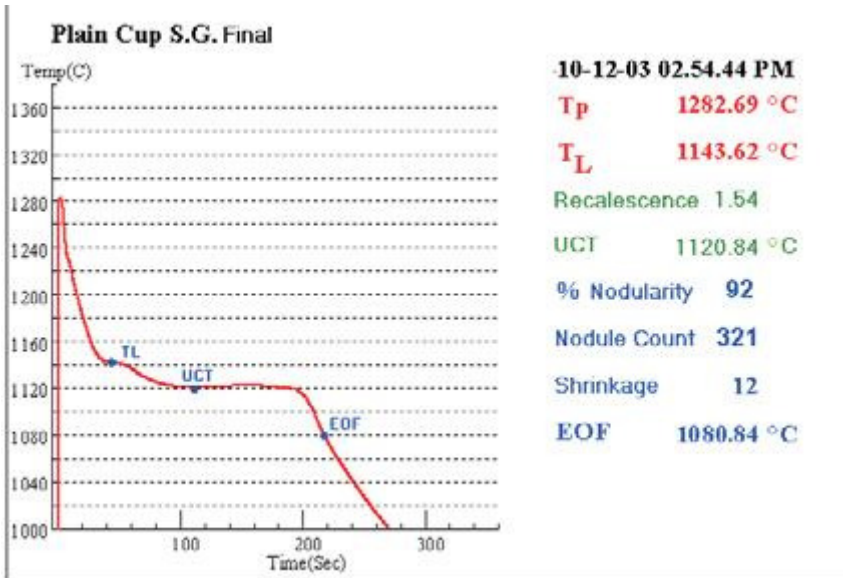


Figura 8.

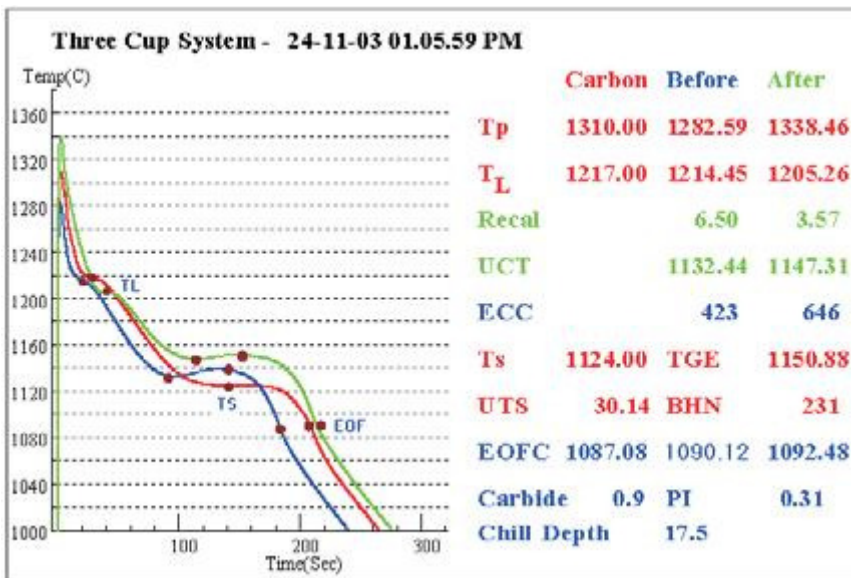


Figura 9

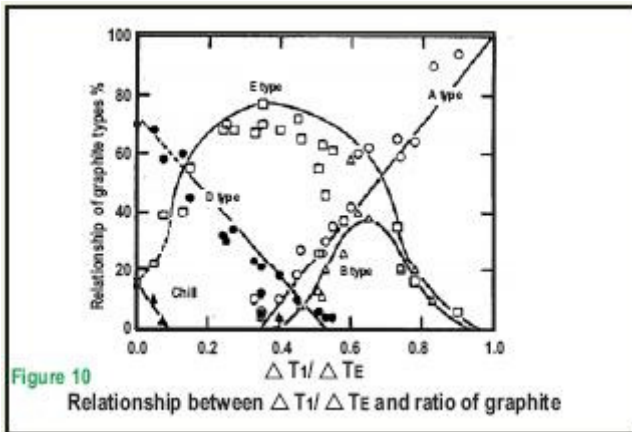


Figura 10

## CONCLUSIONES

El Sistema de Análisis Térmico Avanzado puede ser utilizado para:

- Determinación de CE, %C, %Si.
- Mostrar y almacenar las curvas de enfriamiento en tiempo real
- Predicción de la resistencia a la tracción y dureza Brinell para hierro gris.
- Predicción de la microestructura por la distribución y tamaño del grafito.
- Medición del conteo de células eutécticas.
- Medición del eutéctico granítico y la temperatura del carburo eutéctico.
- Efectividad de la inoculación, comparación de dos inoculantes.
- Predicción del % de nodularidad, conteo de nódulos y tendencia al acoquillado.