



## Tecnología para la producción del acero SAE 1039\*

**Koffi Kadjo Jean Baptiste**

**Francisco Peña Betancourt**

Carrera: Ingeniería Metalúrgica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** En el presente trabajo se expone la tecnología de producción del acero SAE 1039. Se planificó la ejecución de todas las tareas relacionados con la obtención de este acero en la empresa Acinox Las Tunas. Se concluyó que para la producción de 350 coladas en 6 meses se necesitaron 35 510 t de carga metálica y para la fusión de la carga se añadió 39 781,800 *kg* de C-III y 423 983 *kg* de FeSiMn. Se obtiene un total de 8 525 335, 000 USD para las 350 coladas realizadas.

**Palabras clave:** Acero; carga metálica; Acero SAE 1039; tecnología de producción; coladas.

---

\* Trabajo tutorado por el ing. Osmar Ramón Reyes.

Recibido: 25 noviembre 2012 / Aceptado: 28 diciembre 2013.

## Technology for the production of SAE 1039 steel

**Abstract:** This investigation presents the technology for the production of SAE 1039 steel. An execution plan for all the activities related to the production of this steel was implemented in the company Acinox based in Las Tunas. It was observed that for producing 350 tonnes of cast steel in 6 months, 35 510 t of metal loads were required in addition to 39 781,800 kg of C-III and 423 983 kg of FeSiMn for casting the load. A total of 8 525 335, 000 USD from 350 castings were obtained.

**Key words:** Steel; metal load; SAE 1039 steel; production technology; casting.

## Introducción

El acero constituye el material más importante en el desarrollo industrial actual y futuro del mundo. Es enorme el significado que tiene en la economía. El nivel de potencia económica de uno u otro estado se determina por la capacidad de acero fabricado, puesto que sin él no puede progresar la industria minera ni la construcción de maquinarias (Kundrin, 1981).

Los métodos convencionales de producción de acero incorporan el ferromanganeso (FeMn) al horno para detener la oxidación del carbono y lograr la cantidad de manganeso requerida en la aleación; sin embargo, el alto costo de este compuesto ha llevado a la búsqueda de alternativas que disminuyan o eliminen su uso (Navas & Batista, 2003).

La necesidad de fabricar los diferentes aceros al carbono, aleados e inoxidables, principalmente en los países en vías de desarrollo con grandes yacimientos de hierro y níquel como Cuba, es de vital importancia. Por tal motivo, a partir de la década de los años 80 e inicios de los 90 del pasado siglo, se potencia en la provincia de Las Tunas la construcción de varias industrias y principalmente la siderúrgica, con el montaje y puesta en explotación de la planta productora de aceros inoxidables y al carbono ACINOX-Las Tunas.

En el trabajo se diseña el método de producción del acero SAE 1039 en la planta de ACINOX-Las Tunas y se planifica la ejecución de todas las tareas relacionadas con la obtención de este acero con el fin de mejorar la productividad y la eficiencia del proceso.

Con la utilización del acero SAE 1039 se pretende disminuir el tiempo de TAP-TO-TAP del horno arco eléctrico (HAE) en 10 *min* (10 %) y, por ende, el consumo de energía hasta 75 *kWh/ton*, de electrodos de 500 *mm* en 0,24 *kg/t* y de refractario 0,24, así como el tiempo total de proceso del horno cuchara (HC) hasta 36 *min*. A la vez, se reducirá el consumo de energía en el proceso de afino del HC en 34 *kWh/ton*, de electrodos en 0,324 *kg/ton*, de refractario en 2,50 *kg/ton* y de silicio en 1,93 *k/ton*.

## Clasificación de la chatarra de acero al carbono para la elaboración del SAE 1039

La chatarra de acero al carbono se clasifica de acuerdo a su tipo en:

- Chatarra al carbono externa, que constituye el 90 % de la carga. Dentro de la chatarra tenemos la chatarra al manganeso y de hierro fundido.
- Chatarra al carbono interna, que es generada internamente en la planta, como por ejemplo fondo de artesa, metal derramado, pedazos de palanquillas y cabillas procedente del laminador-200T.

La chatarra al carbono externa se clasifica de acuerdo a su densidad en:

- Chatarra al carbono externa ligera: es una chatarra de baja densidad como hojalaterías y carrocerías.
- Chatarra al carbono externa mediana: es la chatarra que tiene mayor densidad que la ligera, pero menor que la pesada (tubos y vigas de mediano tamaño, chasis de carros ligeros y pacas ligeras).
- Chatarra al carbono pesada: masa de centrales, vigas y tubos de gran tamaño, rieles, motores y ruedas de locomotoras.

La chatarra al carbono interna se clasifica de acuerdo a su densidad en:

- Chatarra al carbono interna ligera: tramos de cabillas provente del laminador 200T.
- Chatarra al carbono interna mediana: palanquillas (palastro) de mediano tamaño procedente del laminador 200T.
- Chatarra al carbono pesada: metal derramado en forma de tortas, fondo de artesa, palanquillas, palastros de tamaño grande.

a) Con el oxígeno de la atmósfera o con el inyectado para intensificar se forman óxidos en la escoria (Smirnov & Fanjul, 1984):





b) Con el oxígeno de la escoria, reduciéndose el hierro de la escoria: (Smirnov & Fanjul, 1984)



### **Calentamiento y afino del acero en el horno de arco eléctrico. Tecnología de Escoria Espumosa. Desfosforación y desulfuración del baño metálico**

Una vez fundida la tercera cesta al 80-90 % se inyecta por una lanza oxígeno y por la otra carbón grafito en la interface metal-escoria, con la formación de  $\text{CO}_{(\text{g})}$  a través de la reacción de  $[\text{C}] + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_{(\text{g})}$ , que espuma la escoria y cubre el arco de los tres electros, aprovechándose prácticamente toda la energía suministrada por el arco eléctrico en calentar el metal hasta la temperatura de vertido en un mínimo de tiempo, con importantes ahorro de energía eléctrica, electrodos de 500 mm y refractario.



### **Condiciones para que ocurra la desfosforación en el HAE**

1. Alto (% CaO) en la escoria, es decir, alta basicidad.
2. Alto (% FeO) en la escoria.
3. Baja temperatura entre 1 500 a 1 660 °C.

La defosforación ocurre a través de la reacción química:



Aunque la desulfuración del acero es favorecida por las altas temperaturas del acero, en el HAE no existen las condiciones reductoras necesarias para una profunda eliminación del mismo, realizándose en el proceso de ajuste y afino del HC, que existen las condiciones necesarias en el metal y la escoria. Durante el calentamiento y afino en el HAE se toman muestras de temperaturas y muestras de metal para saber la composición química (Smirnov & Fanjul, 1984).

### **Vertido del acero del HAE a la cuchara**

Antes del vertido del acero, la cuchara procedente del área de tapón poroso se coloca en el carro porta cuchara con ayuda de la grúa; se inspecciona el estado y temperatura del refractario. Inmediatamente se conecta la manguera de agitación para el insuflado de argón. Se comprueba el flujo de argón, y si está bien, se traslada a la posición de vertido para recibir el acero procedente del HAE.

Después se adiciona el carbón III para seguir la desoxidación; un 50 % de acero se desoxida. A las 40 t de acero vaciadas a la cuchara se adiciona el FeSiMn para el ajuste del Mn al 80 % de la marca y el 60-70 % se gasta en desoxidar el acero, pasando a la escoria de la cuchara en forma de SiO<sub>2</sub> y el resto es asimilado por el acero.

### **Condiciones que deben cumplirse para que ocurra la desulfuración**

- Alta (% CaO) > 50 % en la escoria.
- Bajo (% FeO) < 2 % en la escoria. Escoria desoxidada. El cumplimiento de esta relación permite mantener un equilibrio entre el medio básico y ácido de la escoria y proteger el excesivo desgaste al refractario de las cucharas, así se evita posibles averías por la zona de la línea de escoria de las cucharas.
- Alta temperatura del acero >1620 °C para romper el enlace iónico formado por el azufre y el hierro en el acero [FeS].
- La desulfuración ocurre a través de la siguiente reacción química:  
[FeS]metal + (CaO)escoria = (CaS)escoria + (FeO)escoria
- La basicidad de la escoria es muy importante para lograr un alto de desulfuración del acero. La misma comprende la relación existente entre los óxidos de calcio en la escoria básica y los óxidos de silicio en la escoria ácido (% CaO).
- $B = 2,2$ . Este valor garantiza la protección del refractario de las cucharas (% SiO<sub>2</sub>).
- B- Basicidad de la escoria.

## **Cristalización primaria, secundaria y enfriamiento terciario del producto terminado**

Una vez colocada la cuchara con acero líquido en el carro portacuchara en la máquina de vaciado (IVC), se posiciona en la línea de vaciado, encima de la artesa o distribuidor de acero. Luego entre la cuchara y la artesa se coloca un tubo de grafito que protege al acero del contacto con los gases de la atmósfera, por donde desciende el acero por gravedad hasta la artesa. La artesa tiene dos tapones para regular el flujo de acero que fluye desde la artesa a los cristalizadores a través de la buza.

La cristalización primaria del acero ocurre en los cristalizadores, donde se cristaliza el metal desde las paredes del molde hacia el centro. El nivel de acero en los cristalizadores se alcanza a los 10-12 s de haber abiertos las líneas. Entre el momento en el que arranca la máquina y comienzan a oscilar los dos moldes empieza a descender el metal cristalizado al 75-90 % hasta la zona de cristalización secundaria.

### **Materiales usados en el proceso**

Los principales equipos necesarios para la producción del acero SAE 1039 son:

- El horno arco eléctrico (HAE), con capacidad operativa de 60 t.
- Horno cuchara (HC), tipo LFS 060.
- Máquina de vaciado.
- Filtros de mangas.

Tabla 1. Composición química de la muestra en el HAE

<b>Composición química de la muestra (%)</b>								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
<b>Inicial</b>	0,32	0,30	0,035	0,06	0,07	0,11	0,14	0,032
<b>Final</b>	0,11	0,10	0,013	0,061	0,003	0,07	0,15	0,0318

### **Material de ajuste en el HAE y en el HC**

Carbón III, para la formación de la escoria espumosa.

El carbón IV, para la desoxidación.

El ferro silicio manganeso (FeSiMn) con 65 % Mn y 16 % Si.

El ferro manganeso alto carbono (FeMn HC) con 75 % de Mn y 7 % de carbono.

El ferro silicio 75 %, con 75 % de Si.

Cantidad de oxígeno para la elección de la variante de carbono, hierro fundido y cal a añadir para el ajuste:  $900 \text{ Nm}^3/h$ , implica que se debe cargar con  $250 \text{ kg}$  de carbono II y  $2200 \text{ kg}$  de cal.

### Determinación del carbono promedio en la carga

La determinación del total de carbono en la carga del HAE es de vital importancia para la determinación del oxígeno total a inyectar durante el proceso de intensificación para aumentar productividad y producir energía química y con ello disminuir el consumo de energía eléctrica.

### Determinación de la masa de carbono promedio contenido en la chatarra de acero

Al aplicar la regla de tres se obtiene:

$$63\,000 \text{ kg} \rightarrow 100\%; X \leftarrow 0,25\%C; X = \frac{63\,000 \cdot 0,25}{100} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \%}{\%}; X = 157,5 \text{ kg} \quad (16)$$

### Determinación de la masa de carbono promedio contenido en hierro fundido

$$4\,000 \text{ kg} \rightarrow 100\%; X \leftarrow 3,50\%C; X = \frac{4000 \cdot 3,50}{100} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \%}{\%}; X = 140 \text{ kg} \quad (17)$$

### Determinación de la masa de carbono promedio total

$$C_T = C_{\text{chatarra}} + C_{\text{Fe fundido}}; C_T = 297,5 \text{ kg} \quad (18)$$

$$C_{TF} = C_T + C_{\text{tecnología}}; C_{TF} = 547,5 \text{ Kg} \quad (19)$$

### Determinación de oxígeno total a inyectar

$$T_{\text{Oxígeno-Inyectar}} = \left[ \left[ \left( \frac{T_{\text{carbono-carga}} \cdot R_{\text{Carbono}}}{100} \right) - \left( \frac{C_{C-\text{Óptimo}} \cdot Q_{\text{Liq}}}{100} \right) \right] \cdot \frac{MA_{O_2}}{MA_C} \right] \cdot \frac{100}{R_{O_2}} \quad (20)$$

Donde:  $T_{\text{Carbono-Carga}}$ : Total de carbono en la carga al HAE,  $\text{kg}$ ;

$T_{\text{Oxígeno-Inyectar}}$ : Total de oxígeno a inyectar para oxidar el carbono requerido,  $\text{Nm}^3$ ;

$R_{\text{Carbono}}$ : Rendimiento del carbono ( $\approx 85 \%$ ), %;

$C_{C-\text{Óptimo}}$ : Contenido de carbono óptimo ( $0,12 \%$ ) para la realización de la escoria espumosa, %;

$Q_{\text{Liq}}$ : Masa de acero líquida a obtener,  $\text{kg}$ ;

$MA_{O_2}$ : Masa atómica del oxígeno ( $16 \text{ kg}$ ),  $\text{kg}/\text{átomos}$ ;

$MA_C$ : Masa atómica del carbono (12 kg), kg/átomos;

$CC_{O_2}$ : Coeficiente de conversión (0,72 Nm<sup>3</sup>/kg) o volumen que ocupa 1 kg de oxígeno, Nm<sup>3</sup>/kg;

$R_{O_2}$ : Rendimiento del oxígeno ( $\approx 75\%$ ) en función del carbono que oxida, %.

Al sustituir los valores en la ecuación (20) se obtiene:

$$T_{Oxígeno-Inyectar} = \left[ \left[ \left[ \left( \frac{547,5 \cdot 85}{100} \right) - \left( \frac{0,12 \cdot 60\,000}{100} \right) \right] \cdot \frac{16}{12} \right] \cdot 0,72 \right] \cdot \frac{100}{75} \cdot T_{Oxígeno-Inyectar} = 503,52 \text{ Nm}^3 \quad (21)$$

### Determinación del oxígeno a insuflar durante la fusión

$$60 \text{ min} \leftrightarrow 900 \text{ Nm}^3/h; \quad 55 \text{ min} \leftrightarrow X; \quad X = \frac{900 \cdot 55}{60} \cdot \frac{\text{Nm}^3 \cdot \text{min}}{\text{min}}; \quad X = 825 \text{ Nm}^3/h \quad (22)$$

### Determinación del oxígeno a insuflar para la formación de la escoria espumosa

$$60 \text{ min} \leftrightarrow 600 \text{ Nm}^3/h \quad 20 \text{ min} \leftrightarrow X; \quad X = \frac{600 \cdot 25}{60} \cdot \frac{\text{Nm}^3 \cdot \text{min}}{\text{min}}; \quad X = 250 \text{ Nm}^3/h \quad (23)$$

### Determinación del oxígeno a insuflar para oxidar el carbono en el HAE

$$V(O_2) = [(\%C_{muestra} - \%C_{deseado}) \cdot Q_L \cdot 13] - (\%Si_{muestra} \cdot Q_L \cdot 10) \quad (24)$$

Donde:  $\%C_{muestra}$ : Contenido de carbono en la muestra inicial, %;

$\%C_{deseado}$ : Contenido de carbono del cliente, %;

$Q_L$ : Cantidad de acero líquido, kg;

$\%Si_{muestra}$ : Contenido de silicio en la muestra inicial, %.

Entonces la cantidad de oxígeno a inyectar es de 503,25 Nm<sup>3</sup>.

Al sustituir los valores en la ecuación 24 se obtiene:

$$V(O_2) = [(0,32 - 0,4) \cdot 60000 \cdot 13] - (0,07 \cdot 60000 \cdot 10) \quad (25)$$

La cantidad de oxígeno total a insuflar es:

$$(O_2)_T = V(O_2)_{ESCORIA \text{ ESPUMOSA}} + V(O_2)_{FUSIÓN}, \quad (O_2)_T = 250 + 825(O_2)_T = 1075 \text{ Nm}^3/h \quad (26)$$

### Determinación de la cantidad de silicio total contenido en la carga

La cantidad de silicio total en la carga se determina mediante la ecuación:

$$T_{\text{Silicio-Carga}} = \left[ \frac{(T_{\text{chatarra}} \cdot L_{\text{Si-chatarra}}) + (T_{\text{HF}} \cdot L_{\text{Si-HF}})}{100} \right] \quad (27)$$

Donde:  $T_{\text{Silicio-Carga}}$ : Total de silicio que aporta la carga al HAE, *kg*;

$T_{\text{Chatarra}}$ : Total de chatarra de carga al HAE, *kg*;

$L_{\text{Si-Chatarra}}$ : Es el contenido de silicio promedio de la chatarra de carga al HAE, %;

$T_{\text{HF}}$ : Total de hierro fundido de carga al HAE, *kg*;

$L_{\text{Si-HF}}$ : Contenido de silicio en el hierro fundido de carga al HAE, %.

Al sustituir los valores se obtiene:

$$T_{\text{Silicio-Carga}} = \left[ \frac{(63000 \cdot 0,2) + (4000 \cdot 1)}{100} \right]; T_{\text{Silicio-Carga}} = 160 \text{ kg} \quad (28)$$

### Determinación del total de cal para neutralizar la acidez de la escoria

$$T_{\text{Cal}} = \left[ \left( \frac{T_{\text{Silicio-Carga}} \cdot M_{\text{N}_{\text{SiO}_2}}}{M_{\text{A}_{\text{Si}}}} \right) \cdot IB \right] \cdot \left( \frac{10000}{L_{\text{CaO-Cal}} \cdot R_{\text{Cal}}} \right) \quad (29)$$

Donde:  $T_{\text{Cal}}$ : Total de cal a añadir para neutralizar la acidez de la escoria, *kg*;

$T_{\text{Silicio-Carga}}$ : Total de silicio que aporta la carga al HAE, *kg*;

$M_{\text{SiO}_2}$ : Masa molecular del  $\text{SiO}_2$  (60 *kg*), *kg*;

$M_{\text{A}_{\text{Si}}}$ : Masa atómica del silicio (28 *kg*), *kg*;

IB: Índice de basicidad deseado (2,20) y es adimensional;

$L_{\text{CaO-Cal}}$ : Ley o contenido de CaO presente en la cal, %;

$R_{\text{Cal}}$ : Rendimiento de la cal como material, % (Smirnov & Fanjul, 1984).

Al sustituir los valores se obtiene:

$$T_{\text{cal}} = \left[ \left( \frac{160 \cdot 60}{28} \right) \cdot 2,2 \right] \cdot \left( \frac{10000}{100 \cdot 95} \right); T_{\text{cal}} = 793,985 \text{ kg} \quad (30)$$

### Determinación del rendimiento metálico

Para una carga metálica de 67 000 *kg* se tiene:

$$67000 \text{ kg} \rightarrow 100\%; 6000 \text{ kg} \rightarrow X; X = \frac{6000 \text{ kg} \cdot 100 \%}{67000 \text{ kg}}; X = 89,55\% \quad (31)$$

## **Cálculo de las cantidades de los elementos de ajuste empleada para la fabricación del SAE 1039**

### **Cálculo de las adiciones durante el vertido y en el proceso de HC**

El acero 1039 tiene en su composición química final un alto por ciento de carbono y de manganeso por lo que durante el vertido no se adiciona aluminio para la desoxidación primaria, solo se adiciona C-III de ajuste y FeSiMn al 80 % de la marca del SAE 1039.

### **Orden de adiciones durante el vertido**

De 3-5 t de vertido a la cuchara se adiciona el C-III y a los 3/4 parte, es decir, de 35-40 t de metal vertido a la cuchara, se adiciona el FeSiMn.

En el caso del SAE 1039 a las 3-5 t de metal vertido se adiciona el C-III. La masa del carbono III oscila entre 20 kg a 200 kg, por lo general 160 kg máximo.

Para el acero SAE 1039 el rango de temperatura de vertido es debido a las adiciones del C-III para el ajuste y el FeSiMn.

Se adiciona el C-III porque es el desoxidante más barato y el producto de la desoxidación es el CO, que va a la atmosfera. También realiza la desoxidación primaria.

### **Ajuste de la composición química en el vertido**

La realización de una desoxidación primaria del acero durante el vertido del horno de arco eléctrico a la cazuela es de gran importancia para el posterior tratamiento del mismo en el horno cuchara pues disminuye el tiempo de proceso, aumenta el rendimiento de los elementos aleantes y disminuye los índices de consumo, tanto de energía eléctrica como de electrodos y refractarios.

Para las adiciones en el vertido se utilizan los siguientes datos.

FeSiMn, 65 %; Mn, 16 %Si; FeMn (HC), 78 %Mn, 7 %C.

Rendimiento del silicio, R-Si=58 %.

### Determinación de carbono (III) a añadir en el vertido

$$Q_{(C-III)vertido} = \frac{([\%C]_{\text{óptimo}} - [\%C]_{\text{muestra}}) \cdot P(\text{ajuste}) \cdot QL}{85\% \cdot 95\%} \quad (32)$$

Donde:  $Q_{(C-III)vertido}$  : Cantidad de carbono de ajuste al vertido, *kg*;

$[\%C]_{\text{óptimo}}$  : Porcentaje de carbono final o del cliente, %

$[\%C]_{\text{muestra}}$  : Porcentaje de carbono en la muestra, %

$P(\text{ajuste})$  : Porcentaje de ajuste,  $p = 100$ , %

$QL$  : Cantidad de acero líquido, *kg*; 85 %- rendimiento, %; 95 %- ley.

Al sustituir los valores en la ecuación anterior se obtiene:

$$Q_{(C-III)vertido} = \frac{(0,41 - 0,11) \cdot 41,7 \cdot 60000}{85 \cdot 55}; \quad Q_{(C-III)vertido} = 160,556 \text{ kg} \quad (33)$$

### Determinación de la cantidad de carbono (III) con respecto a su ley

La cantidad de carbono (III) se determina al aplicar la regla de tres:

$$C - III(\text{ley}) = \frac{Q_{(C-III)vertido} \cdot \text{ley}}{100}; \quad C - III(\text{ley}) = 136,473 \text{ kg} \quad (34)$$

### Determinación de la cantidad de carbono (III) con respecto a su rendimiento

Como el carbono en el vertido tiene un rendimiento de 50-55 %, se tiene:

$$C - III(\text{rend}) = \frac{C - III(\text{ley}) \cdot \text{rend}}{100}; \quad C - III(\text{vertido}) = 75,060 \text{ kg} \quad (35)$$

### Determinación del aporte de carbono (III) al acero

$$\text{Para } 75,060 \text{ kg se tiene: } \% (C - III)_{\text{acero}} = \frac{C - III(\text{rend}) \cdot 100}{QL}; \quad \% (C - III)_{\text{acero}} = 0,125\% \quad (36)$$

### Determinación de las adiciones de FeSiMn 65 % en el vertido

$$Q_{(FeSiMn)vertido} = \frac{([\%Mn]_{\text{óptimo}} - [\%Mn]_{\text{muestra}}) \cdot P(\text{ajuste}) \cdot QL}{65\% \cdot 96\%}; \quad Q_{(FeSiMn)vertido} = 799,967 \text{ kg} \quad (37)$$

### Determinación de la cantidad de Mn contenido en el FeSiMn, 65 %

$$Mn_{(FeSiMn)vertido} = \frac{Q_{(FeSiMn)vertido} \cdot \text{ley}(Mn)}{100}; \quad Mn_{(FeSiMn)vertido} = 519,978 \text{ kg} \quad (38)$$

**Determinación de la cantidad de Mn aportado al acero**

$$\%(Mn)al\ acero = \frac{Mn_{(FeSiMn)vertido} \cdot 100}{QL}, \%(Mn)al\ acero = \frac{519,978 \cdot 100}{60\,000}, \%(Mn)al\ acero = 0,867 \quad (39)$$

**Determinación de la cantidad de Si contenido en el FeSiMn, 65 %, con 16 % Si**

$$Si_{(FeSiMn)vertido} = \frac{Q_{(FeSiMn)vertido} \cdot ley(Si)}{100}, Si_{(FeSiMn)vertido} = \frac{799,967 \cdot 16}{100}, Si_{(FeSiMn)vertido} = 127,995\ kg \quad (40)$$

Si tiene un rendimiento de 50-55 % durante el vertido, entonces se determina la cantidad de silicio contenido en el 55 %.

$$Si_{(FeSiMn)vertido(55\%)} = \frac{Si_{(FeSiMn)vertido} \cdot ley(Si)_{55\%}}{100}; Si_{(FeSiMn)vertido(55\%)} = 70,397\ kg \quad (41)$$

**Determinación de la cantidad de Si aportado al acero**

$$\%(Si)al\ acero = \frac{Si_{(FeSiMn)vertido} \cdot 100}{QL}; \%(Si)al\ acero = 0,117 \quad (42)$$

El FeSiMn tiene alrededor de 2-2,5 %C por lo tanto se determina la cantidad de carbono contenido en él.

**Determinación de la cantidad de carbono contenido en el FeSiMn**

$$C_{(FeSiMn)vertido} = \frac{Q_{(FeSiMn)vertido(80\%)} \cdot ley(C)}{100}, C_{(FeSiMn)vertido} = \frac{799,967 \cdot 2,5}{100}, C_{(FeSiMn)vertido} = 19,999\ kg \quad (42)$$

**Determinación de la cantidad de carbono contenido en el FeSiMn para 65 %**

$$C_{(FeSiMn)vertido} = \frac{Mn_{(FeSiMn)vertido} \cdot 65}{100}, C_{(FeSiMn)vertido} = \frac{19,999 \cdot 65}{100}, C_{(FeSiMn)vertido} = 12,999\ kg \quad (43)$$

**Determinación de la cantidad de carbono aportado al acero**

$$\%(C)al\ acero = \frac{C_{(FeSiMn)vertido\ 55\%} \cdot 100}{QL}; \%(C)al\ acero = 0,022 \quad (44)$$

**Determinación de la cantidad de Si, Mn y C al inicio del HC**

$$[Mn]_{i\ HC} = [Mn]_{final\ HAE} + [Mn]_{FeSiMn}, [Mn]_{i\ HC} = 0,090 + 0,867, [Mn]_{i\ HC} = 0,967\ % \quad (45)$$

### Determinación de las cantidades de Si y C

$$[Si]_{i\ HC} = 0,118\%, \quad [C]_{i\ HC} = 0,257\% \quad (46)$$

### Ajuste del acero en el horno cuchara

Tabla 2. Composición química inicial del HC

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cr %	Ni %	Cu %
0,257	0,967	0,035	0,06	0,118	0,11	0,14	0,32

### Cantidad de acero líquido real

$$QL(real) = QL + m(C - III)añadido\ HAE + m(C - III)vertido + m(Mn)_{FeSiMn} + m(Si)_{FeSiMn}$$

$$QL(real) = 60804,445\ kg \quad (47)$$

### Determinación de la cantidad de carbono (III) en el HC

$$C_{(III)HC} = \frac{([\%C]_{\text{óptimo}} - [\%C]_{\text{muestra}}) \cdot P(\text{ajuste}) \cdot QL}{85\% \cdot 100\%}; \quad C_{(III)HC} = 115,133\ kg \quad (48)$$

### Cantidad de carbono (III) en el HC, en función de la ley del carbono

$$C_{(III)HC(ley)} = \frac{C_{(III)HC} \cdot ley}{100}, \quad C_{(III)HC(ley)} = \frac{115,133 \cdot 85}{100}, \quad C_{(III)HC(ley)} = 97,863\ kg \quad (49)$$

### Determinación de la cantidad de carbono aportado al acero

$$C_{(III)aportado} = \frac{C_{(III)HC} \cdot 100}{QL(real)}, \quad C_{(III)aportado} = \frac{97,863 \cdot 100}{60\ 804,445}, \quad C_{(III)aportado} = 0,161\% \quad (50)$$

### Determinación del carbono total

$$C_{(total)HC} = C_{(aportado)} + C_{(inicio)HC}; \quad C_{(total)HC} = 0,418\% \quad (51)$$

### Determinación de la cantidad de FeSiMn a añadir en el HC

$$Q_{(FeSiMn)HC} = \frac{([\%Mn]_{\text{óptimo}} - [\%Mn]_{\text{muestra}}) \cdot P(\text{ajuste}) \cdot QL(real)}{65\% \cdot 94\%}; \quad Q_{(FeSiMn)HC} = 321,805\ kg \quad (52)$$

### Determinación de la cantidad Mn contenido FeSiMn a añadir en el HC, 65 %Mn

$$Mn_{(FeSiMn)} = \frac{Q_{(FeSiMn)HC} \cdot 65}{100}; \quad Mn_{(FeSiMn)} = 209,173\ kg \quad (53)$$

**Rendimiento del Mn al acero**

$$Mn_{(aportado)} = \frac{Mn_{(FeSiMn)} \cdot 100}{Ql_{(real)}}; \quad Mn_{(aportado)} = 1,053\% \quad (54)$$

**Manganeso total en el acero**

$$Mn_{(total)HC} = Mn_{(aportado)} + Mn_{(inicio)HC}; \quad Mn_{(total)HC} = 1,308\% \quad (55)$$

**Determinación del silicio contenido en el FeSiMn**

Con un 16 % de silicio se tiene:

$$m(Si)_{FeSiMn} = \frac{Q(FeSiMn) \cdot 16\%}{100}; \quad m(Si)_{FeSiMn} = 51,489kg \quad (56)$$

**Determinación de la cantidad de Si contenido en el FeSiMn para 55 %**

$$m(Si)_{55\%} = \frac{m(Si)_{FeSiMn} \cdot 55\%}{100}; \quad m(Si)_{55\%} = 28,319kg \quad (57)$$

**Aporte del Si al acero**

$$(Si)_{aportado} = \frac{m(Si)_{55\%} \cdot 100\%}{Ql_{(real)}}; \quad (Si)_{aportado} = 0,046\% \quad (58)$$

**Determinación de la cantidad de Si total contenido en el acero**

$$Si_{(total)HC(final)} = Si_{(aportado)} + Si_{(inicio)HC}, \quad Si_{(total)HC(final)} = 0,046 + 0,118 \quad Si_{(total)HC(final)} = 0,165\% \quad (59)$$

Si el silicio total obtenido durante el ajuste no se encuentra en el intervalo de la composición química del cliente entonces hace falta ajustarlo. Para ello se tiene:

$$Q_{(FeSi)} = \frac{([\%Si]_{\text{óptimo}} - [\%Si]_{\text{muestra}}) \cdot P(\text{ajuste}) \cdot Ql_{(real)}}{75\% \cdot 60\%}; \quad Q_{(FeSi)} = 88,990kg \quad (60)$$

**Determinación de la cantidad de silicio contenido en el FeSi-75**

$$m(Si)_{(FeSi)} = \frac{Q_{(FeSi)} \cdot 75}{100}; \quad m(Si)_{(FeSi)} = 66,743kg \quad (61)$$

**Determinación de la cantidad de silicio rendido**

$$m(Si)_{rend} = \frac{m(Si)_{(rend)} \cdot Rend}{100}; \quad m(Si)_{(rend)} = 40,046kg \quad (62)$$

**Determinación de la cantidad de hierro contenido en el FeSi-75**

$$m(Fe)_{(FeSi)} = \frac{m(FeSi)_{75\%} \cdot ley(Fe)}{100}; \quad m(Fe)_{(FeSi)} = 22,251kg \quad (63)$$

**Determinación de la cantidad de FeSi-75**

$$m(FeSi) = m(Si) + M(Fe); \quad m(FeSi) = 62,302kg \quad (64)$$

**Determinación de la masa total de acero líquido**

$$QL_{final} = QL_{fin_{HC}} + m(FeSi) + m(FeSiMn)_{HC} + m(C - III)_{HC}; \quad QL_{final} = 61\,286,415 \text{ kg} \quad (65)$$

**Determinación del aporte de silicio al acero**

$$(Si)_{(aportado)} = \frac{m(Si)_{(rend)}}{QL_{final}} \cdot 100; \quad (Si)_{(aportado)} = 0,065\% \quad (66)$$

**Determinación del aporte de silicio total al final del HC**

$$(Si)_T = (Si)_{inico_{HC}} + (Si)_{final_{HC}}; \quad (Si)_T = 0,230\% \quad (67)$$

Tabla 3. Composición química final del acero SAE 1039

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	QI Final
0,40	1,288	0,013	0,035	0,230	0,069	0,147	0,311	61 286,415

**Diagnóstico del cálculo de carga**

$$R(\text{metálico}) = \frac{QL}{Q_{chatarra}} \cdot 100; \quad R(\text{metálico}) = 89,552\% \quad (68)$$

El rendimiento metálico del plan es de 88,55 %, por lo tanto, la chatarra usada para la producción del acero SAE 1039 es de buena calidad.

**Determinación de los índices de consumos de energía en el HAE**

Para el horno arco eléctrico, el consumo de energía está entre 25-30 MW. Para 60 t de metal líquido se tiene:

$$IC/E = \frac{CE(plan)}{Q_L} \cdot 100; \quad IC/E = 450 \frac{MW}{t} \quad (69)$$

El plan de consumo de energía en el HAE de la fábrica está entre 480-500 kW/h. Para la producción del SAE 1039 el consumo de energía es de 450 kW/t, el mismo está en el plan de consumo de energía.

**Determinación de los índices de consumos de energía en el HC**

El consumo de energía para la producción de una tonelada de acero es de 4,5 MW. Para la producción de 60 t de acero SAE 1039 se tiene:

$$\frac{IC}{E(HC)} = \frac{CE(plan)}{Q_1} \cdot 100; \frac{IC}{E} = 75 \text{ kW/h} \tag{70}$$

El plan de consumo de energía en el HC es de 75-85 kW/t y el consumo real es de 85 kW/t. El consumo de energía para la producción del SAE 1039 está en el plan.

**Diseño de la tecnología de carga de las cestas**

El cargamento de las cestas se realiza según la tecnología propuesta a continuación:

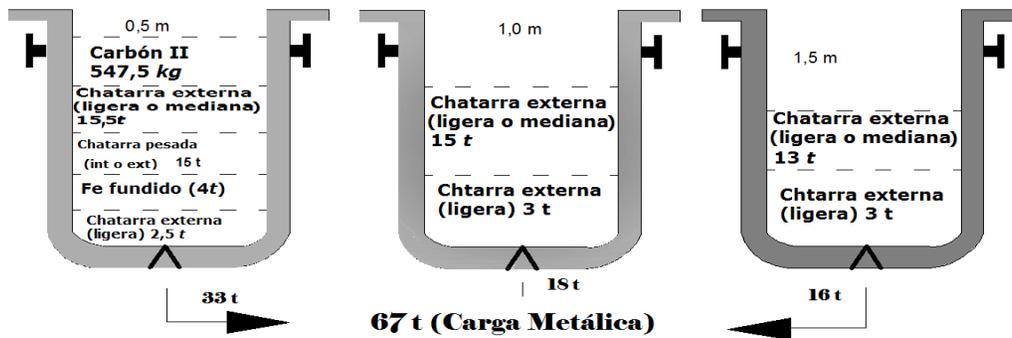


Figura 1. Tecnología de carga de las cestas.

**Diseño de la tecnología de la fusión de la carga metálica**

La fusión de la carga metálica desde el surgimiento de la metalurgia secundaria tiene como objetivo fundir la carga metálica de manera más eficiente y rápida posible. Por este motivo se mantiene el diseño expuesto en el flujo tecnológico.

**Diseño de la tecnología de vaciado del acero SAE 1039**

Condición inicial de vaciado: La coladas primaria y secundaria se hará a una temperatura de 1 590 +/- 5 °C. El nivel de la artesa será de 750 mm y la penetración del tubo de cobre chorro de 100 mm. El tiempo de llenado del cristalizador será de 8 a 12 s y la altura de vaciado de 680 mm.

Condiciones de partida del vaciado: La velocidad de partida estará entre 1,3 y 1,4. La velocidad nominal 2,3 y la velocidad máxima 2,5.

## Materiales a usar para la protección del acero durante el vaciado continuo

Material	Lugar	Cantidad
Ceniza de cascara de arroz	Cuchara	150 kg
Ceniza de cascara de arroz	Artesa	75 kg
Aceite o polvo	Cristalizador	0,2 l/t o 0,23 kg/t

## Enfriamiento primario

### Determinación de la temperatura del líquido

$$T(\text{líquido}) = 1536 - (65 \cdot \%c + 8 \cdot \%Si + 5 \cdot \%Mn + 25 \cdot \%S + 30 \cdot \%P + 2 \cdot \%Cr + 4 \cdot \%Ni + 2 \cdot \%Mo + \%Cu + 2 \cdot \%V + 90 \cdot \%N + 016 \cdot \%Nb); \quad T(\text{líquido}) = 1500,6^\circ\text{C} \quad (71)$$

### Determinación del flujo de agua en el molde

$$\text{Se tiene: } V(H_2O) = \frac{Q(H_2O)}{6 \cdot (S_w - S_{cr})} \text{ y } V(H_2O) = \frac{Q(H_2O)}{6 \cdot [(A_w - B_w) - (A_{cr} - B_{cr})]} \quad (72)$$

Donde:  $V(H_2O)$ : Velocidad del agua en el molde,  $m/s$ ;

$Q(H_2O)$ - flujo del agua en el molde,  $l/min$ ;

$S_w, S_{cr}$ : Áreas del *water jacked* y del cristalizador, respectivamente,  $cm^2$ ;

$A_w, B_w$ : Lados del *water jacked* y lado recto del *water jacked*, respectivamente,  $cm^2$ ;

$A_{cr}, B_{cr}$ : Lado del *water jacked* y del cristalizador, respectivamente,  $cm$ .

Para el SAE 1039 se tiene 130 X 130  $mm$  y  $A_w=16,45$ ;  $B_w=16,65$ ;  $A_{cr}=15,45$ ;  $B_{cr}=15,65$ .  $V(H_2O) = (7-12) m/s$

$$Q(H_2O) = V(H_2O) \cdot 6 \cdot [(A_w \cdot B_w) - (A_{cr} \cdot B_{cr})]; \quad Q(H_2O) = 9013,68 \frac{l}{min} \quad (73)$$

## Enfriamiento secundario

### Determinación del flujo de agua de acuerdo a la productividad de vaciado

$$\text{Se tiene: } Q(\text{acero}) = 591 \frac{kg}{min}$$

$$Q(H_2O) = Q(\text{acero}) \cdot \text{Coef específico}; \quad Q(H_2O) = 591 \cdot 0,81 \frac{kg}{min} \quad Q(H_2O)_r = 478,71 \frac{l}{min} \quad (74)$$

**Determinación del flujo de agua para cada línea**

$$Q(H_2O)_{línea} = \frac{Q(H_2O)}{2}; Q(H_2O)_{línea} = \frac{478,71}{2}, Q(H_2O)_{línea} = 239,4 \frac{l}{min} \tag{75}$$

**Determinación del flujo de agua del rodillo al pie**

$$Q(H_2O)_{rodillo} = \frac{Q(H_2O)}{25}; Q(H_2O)_{rodillo} = \frac{478,71}{25}, Q(H_2O)_{rodillo} = 19,148 \frac{l}{min} \tag{76}$$

**Determinación del flujo de agua del sector móvil**

$$Q(H_2O)_{sector\ móvil} = \frac{Q(H_2O)}{75}; Q(H_2O)_{sector\ móvil} = \frac{478,71}{75}, Q(H_2O)_{sector\ móvil} = 6,383 \frac{l}{min} \tag{77}$$

**Flujo de agua de acuerdo a las constantes *k* y de la velocidad**

$$Q(H_2O)_{KV} = K_1 \cdot V^2 + K_2 \cdot V + K_3; Q(H_2O)_{KV} = 405,80 \frac{l}{min} \tag{78}$$

**Determinación de la longitud metalúrgica**

La longitud metalúrgica se determina mediante la fórmula:  $L_{MET} = \frac{A^2}{4K^2} \cdot V$  (79)

Donde: *A* : Sección de la palanquilla, *mm*;

*V* : Velocidad de vaciado, *m/s*;

*K* : Constante (ACINOX-Tunas, 2000).

$23 \leq K \leq 31; mm/min$

Al sustituir los valores se tiene:  $L_{MET} = \frac{130^2}{4 \cdot 28^2} \cdot 2,5 \cdot \frac{mm^2}{mm^2} \cdot \frac{m}{s}; L_{MET} = 13,47 m$  (80)

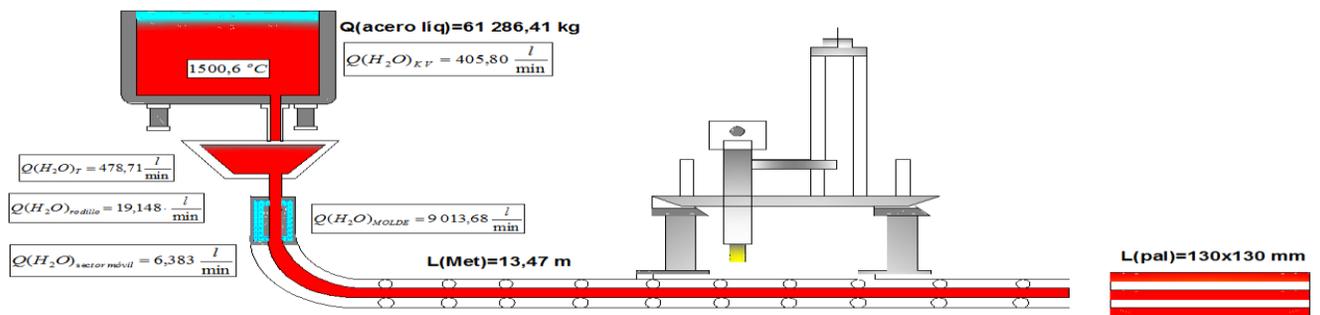


Figura 2. Diseño de la tecnología de vaciado continuo del acero SAE 1039.

## Conclusiones

Se diseñó la tecnología para la producción del acero SAE 1039.

Para producir las 350 coladas en 6 meses se utilizó 35 510 t de carga metálica y para la fusión de la carga se añadió 39 781,800 kg de C-III y 423 983 kg de FeSiMn.

Para las 350 coladas realizadas se obtiene un total de 8 525 335, 000 USD.

## Referencias bibliográficas

ACINOX-TUNAS. 2000: Control Estadístico y Pruebas Tecnológicas acumuladas durante 6 años en la elaboración de aceros al carbono. Grupo Técnico del Taller de Acería. 1994-2000.

SMIRNOV, N. & FANJUL, A. 1984: *Producción de acero*. Pueblo y Educación, La Habana.

KUNDRIN, V. 1981: *Metalurgia del acero*. Mir, Moscú.

NAVAS, E. & BATISTA, A. 2003: Utilización del mineral de manganeso (pirolusita) en la producción de aceros al carbono. *Minería y Geología* 19(3-4).