

1- Calculo de la producción en planta.

Para el cálculo de la producción requerida en planta para así diseñar el proceso de cementación y posteriormente el cálculo de la cantidad de calor que hay que suministrar al horno. El promotor del proyecto pide que sean 4000 piezas/día pero esto sí es así va muy justo y si hay un fallo en el proceso de cementación o temple ya no se llega a lo pedido, por eso se opta en introducir una variable que se llama coeficiente de sobreproducción que es un valor que como su nombre dice sobreproduce la cantidad de piezas del proceso para que por si hay un problema ya sea de suministro del combustible así como de un fallo de las maquinas que entran en el proceso la cantidad de piezas global no se sienta afectada.

Datos:

Producción diaria = 4000 piezas/día.

Horario de funcionamiento del Horno = 24 horas.

Coeficiente de sobreproducción = f (inspecciones de mantenimiento, rotura de maquinas, fallo de suministros de materias primas) = $365/300 = 1.2167$

(El coeficiente de sobreproducción hay que aplicarlo para que el funcionamiento de la empresa sea óptimo y pueda)

Cálculos:

Producción teórica diaria = 4000 piezas/día.

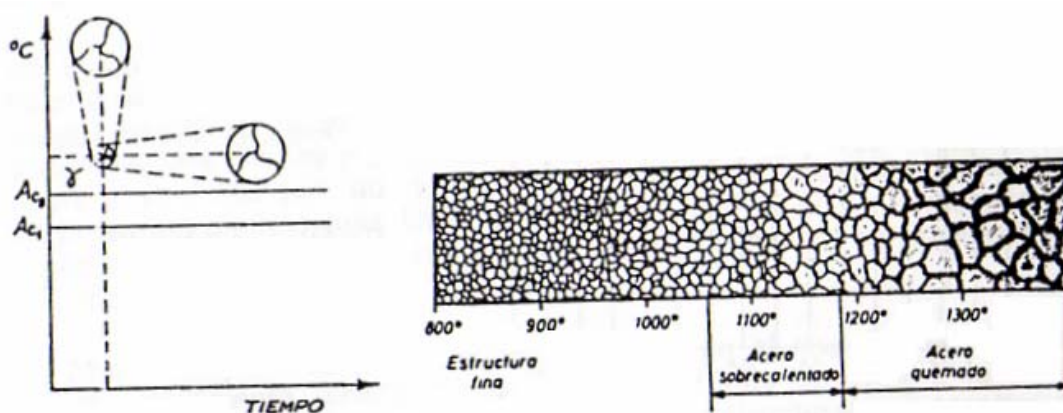
Producción real diaria = $4000 \times 1.2167 = 4866.8$ piezas/día que se redondea a 4867 piezas/día.

Producción real horaria = $4867/24 = 202.79$ piezas/hora que se redondea a 203 piezas/hora de trabajo.

2- Calculo de la temperatura de cementación óptima.

Para el cálculo de la temperatura optima de cementación, hay que evaluar cómo le afecta la temperatura a las propiedades del acero por una parte, también como es el horno en el que va a cementar las piezas y cuál es la curva de fase-trasformación del material que se va a utilizar para saber cuál es la temperatura de austenización del material sin cementar y de la periferia cementada para así evaluar que siempre se encuentre en la fase de austenita, para que la difusión del carbono así como el posterior tratamiento térmico se lleve a cabo bien.

Como máximo se va utilizar una temperatura de unos 1000 °C pero esta temperatura ya es excesiva por el crecimiento de grano como se muestra en el grafico siguiente que relaciona la temperatura a la que se somete el material con el tiempo al que se tiene a esa temperatura.



En el grafico se ve perfectamente que el tamaño de grano aumenta con la temperatura y con el tiempo de exposición, por eso mirando en las indicaciones del fabricante se propone una temperatura de entre 800 °C y 900 °C.

Mirando ahora el grafico de fases del material en cuestión, se ve que al tener una cantidad considerable de níquel que es un elemento gammageno (elemento estabilizador de la austenita) el campo de acción de la austenita es mayor y así lo que tiene es que se puede tener austenita a menor temperatura, con esto quiere decir que no hace falta aumentar mucho la temperatura para obtener austenita y así no afectar tamaño de grano. Pero por otro lado el proceso tiene que ser ligero ya que osino el horno tiene que tener unas dimensiones descomunales y eso no es económico.

Así que según lo expuesto se ha escogido una temperatura de 875 °C que es una temperatura idónea según el fabricante que expone que la temperatura de autenticación es



de cómo mínimo de entre 780°C sin cementar con 825°C cementado así que con esta temperatura va muy bien.

3- Proceso de cementación superficial.

La cementación es el proceso de aportación de carbono al acero para el requerimiento de propiedades mecánicas en la superficie de la pieza y con ello mejorar tanto la dureza como la resistencia al desgaste y no dañar la tenacidad del núcleo interior de la pieza.

Esto se hace aportando átomos de carbono que la pieza al estar a una concentración inferior que la atmosfera que se crea fuera de ella tiende a igualar esas concentraciones y lo iguala introduciendo carbono en la estructura de la pieza a la que se le está realizando el proceso.

Al proceso de cementación general (que no sea nada más que acero y carbono) se le llama difusión y le influyen muchas variable como se muestra en la fórmula para su cálculo como son la temperatura, la diferencia de concentraciones que es la fuerza impulsora del proceso, también le influye el tipo de material al que se va a cementar y el tipo de átomo que se va a introducir en su estructura, el tiempo al que se va a tener expuesto para difusión que a mayor tiempo mayor es la penetración del átomo difusivo en la estructura del elemento al que se le quiere introducir el átomo.

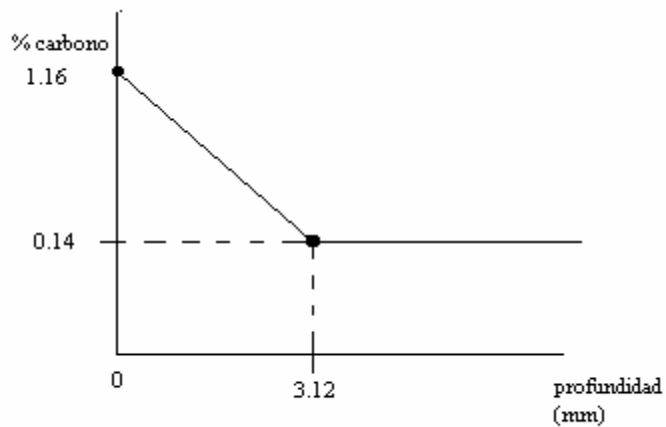
La formula de la difusión en estado no estacionario es la siguiente:

$$\left(\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0}\right) = \text{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right)$$

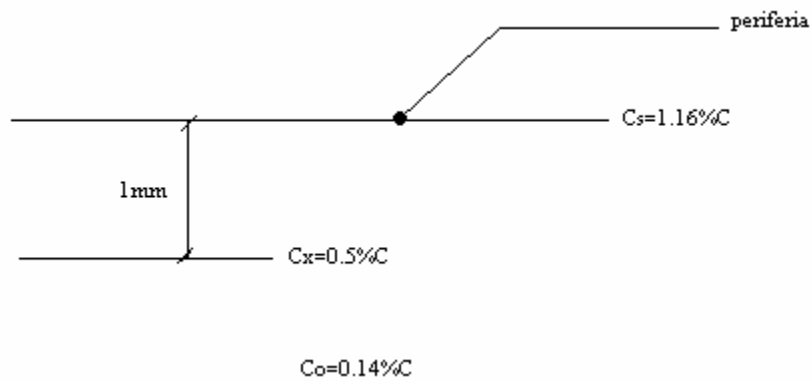
3.1- Tiempo de cementación.

Esquema de la periferia de la pieza:

Composición-profundidad



Calculo del tiempo de cementación para las condiciones siguientes:
Esquema de las condiciones de cementación:



$$\left(\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} \right) = \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

Datos:

$$C_s = 1.16 \%C \quad C_o = 0.14\%C \quad C_x = 0.5\%C \quad x = 1 \text{ mm}$$



Aportación de dureza superficial para una producción de piezas
Incógnita:



¿t? = tiempo

Calculo del coeficiente de difusión:

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$$

Donde D_0 y Q lo sacamos de la siguiente tabla:

| Metal | Elemento disuelto | D_0 en cm^2/s | Q en cal/mol |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------|----------------|
| Fe α | autodifusión | 2300 | 73200 |
| Fe γ | autodifusión | 5,8 | 74200 |
| Cu | autodifusión | 11 | 57200 |
| Ag | autodifusión | 0,89 | 45900 |
| Au | autodifusión | 0,16 | 53000 |
| Al | autodifusión | 0,10 | 32200 |
| Co | autodifusión | 0,37 | 67000 |
| Pb | autodifusión | 6,6 | 27900 |
| Zn // al eje c | autodifusión | 0,046 | 20400 |
| Zn \square al eje c | autodifusión | 91 | 31000 |
| Ag | Au | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | 26600 |
| Ag | Cu | $6,6 \cdot 10^{-5}$ | 24800 |
| Ag | Cd | 4,8 | 22300 |
| Cu | Zn | 0,78 | 43900 |
| Fe α | C | 0,02 | 20100 |
| Fe γ | C | 0,23 | 32900 |
| Fe α | N | 0,0047 | 18300 |
| Fe γ | N | 0,0034 | 34600 |
| Fe α | H | 0,0012 | 3600 |
| Fe γ | H | 0,0063 | 10300 |

Se elige de la tabla el valor correspondiente a hierro gamma con difusión de carbono y los valores son:

$$D_0 = 0.23 \text{ cm}^2/\text{s} \quad \text{y} \quad Q = 32900 \text{ cal/mol}$$

$$\text{Así el valor de } D = 0.23 \cdot e^{-32900/2.1148} = 0.23 \cdot e^{-14.33} = 1.3749 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D = 1.3749 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$$

Una vez que se tiene el coeficiente de difusión se calcula el tiempo de cementación.

Esta tabla da los resultados de la función error erf .

Tabla de la función error

| z | $\text{erf } z$ | z | $\text{erf } z$ | z | $\text{erf } z$ | z | $\text{erf } z$ |
|-------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|-----|-----------------|
| 0 | 0 | 0,40 | 0,4284 | 0,85 | 0,7707 | 1,6 | 0,9763 |
| 0,025 | 0,0282 | 0,45 | 0,4755 | 0,90 | 0,7970 | 1,7 | 0,9838 |
| 0,05 | 0,0564 | 0,50 | 0,5205 | 0,95 | 0,8209 | 1,8 | 0,9891 |
| 0,10 | 0,1125 | 0,55 | 0,5633 | 1,0 | 0,8427 | 1,9 | 0,9928 |
| 0,15 | 0,1680 | 0,60 | 0,6039 | 1,1 | 0,8802 | 2,0 | 0,9953 |
| 0,20 | 0,2227 | 0,65 | 0,6420 | 1,2 | 0,9103 | 2,2 | 0,9981 |
| 0,25 | 0,2763 | 0,70 | 0,6778 | 1,3 | 0,9340 | 2,4 | 0,9993 |
| 0,30 | 0,3286 | 0,75 | 0,7112 | 1,4 | 0,9523 | 2,6 | 0,9998 |
| 0,35 | 0,3794 | 0,80 | 0,7421 | 1,5 | 0,9661 | 2,8 | 0,9999 |

$$\text{Luego haciendo los cálculos } \left(\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} \right) = \frac{1.16 - 0.5}{1.16 - 0.14} = 0.6470$$

Buscando en la tabla si $\text{erf } z = 0.6470$ se tiene que $z = 0.6248$ y resolviendo que

$$0.6248 = 1 / (2 \cdot (D \cdot t)^{1/2}) = 1 / 2 (1.3749 \cdot 10^{-5} \cdot t)^{1/2} \quad \text{despejando } t \text{ se tiene que}$$

$$t = 46574.09 \text{ segundos} = \quad \quad \quad t = 12.9 \text{ horas}$$

3.2- Penetración máxima del carbono.

Lo que se pretende calcular es hasta que profundidad ha penetrado el carbono de la cementación, para saber cuál es la magnitud aproximada de la capa cementada.

Para ello se va a poner la condición de que la concentración a una cierta profundidad sea aproximadamente igual a la de la composición original de la pieza como se expone en el cálculo siguiente.

Formula de la difusión en estado no estacionario:

$$\left(\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o}\right) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{Dt}}\right)$$

Datos:

$$C_s = 1.16 \%C \quad C_o = 0.14\%C \quad C_x = 0.15\%C \quad x? \quad t = 12.9 \text{ horas}$$

$$D = 1.3749 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$$

Luego haciendo los cálculos correspondientes sale que la profundidad es de **3'12 mm**

4- Balance de materia del proceso.

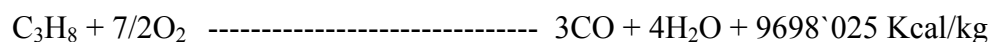
En este apartado se van a calcular los elementos creados en el proceso de cementación, las reacciones que se llevan a cabo y las pérdidas de elementos en el horno. También y es lo más importante el cálculo de todo lo referente al carbono que es el elemento más importante en la cementación y indirectamente el monóxido de carbono que es el que lo produce, y para todo ello hay que calcular la cantidad de carbono que consumen las piezas para evaluar el rendimiento del proceso.

4.1- Reacciones existentes en el proceso.

Las reacciones que se forman en este proceso son una primera de combustión incompleta y otra después de disociación del monóxido de carbono.

Primera reacción:

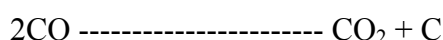
Reacción de combustión incompleta del propano.



Esta reacción de combustión es la responsable del calentamiento de las piezas.

Segunda reacción:

Reacción del monóxido de carbono.



Esta reacción es la responsable de la cementación ya que deja un átomo de carbono libre que es absorbido por las piezas.

4.2- Consumo de carbono por las piezas en el proceso.

4.2.A.- Cantidad de moles de carbono por pieza.

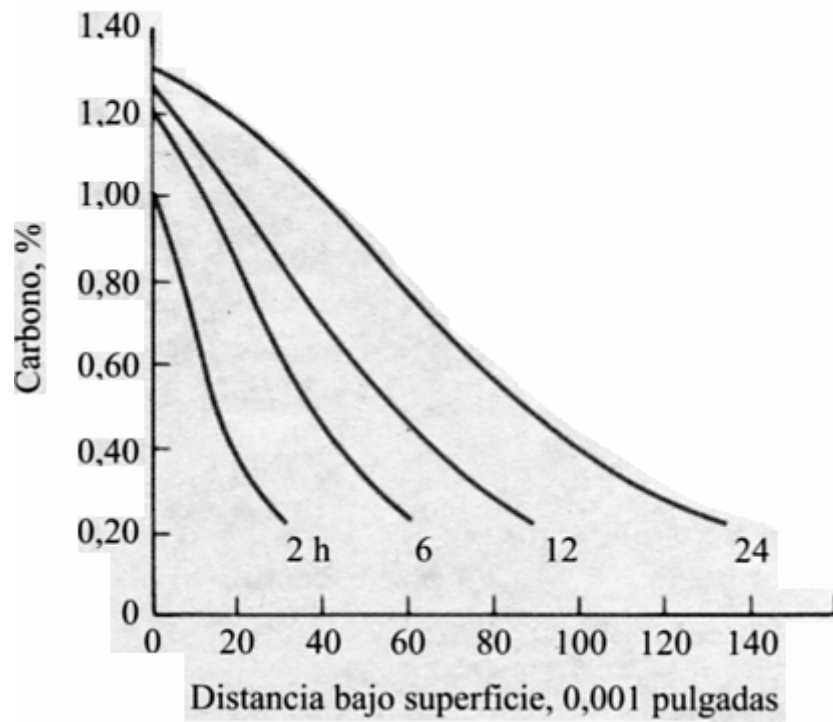
Para evaluar la cantidad de moles de carbono que consume una pieza en el proceso de cementación, hay que saber la variación de carbono que existe en la pieza después de cementar con respecto a la composición inicial de carbono que tenía la pieza, así que una vez que se tiene se puede calcular los átomos de carbono que se han introducido por el proceso por diferencia entre uno y otro.

$$\text{átomos introducidos} = \text{átomos de C finales} - \text{átomos de C iniciales}$$

El único problema es que la concentración de átomos de carbono no es constante en toda la profundidad de la pieza es una aproximación lineal así que hay que sumar cada capa diferencial de la pieza como se hace a continuación.

Antes de hacer esta suma, se va hacer la demostración de la aproximación lineal de la concentración de carbono en la pieza. Para esto hay que tener en cuenta que la pieza va a estar cementándose durante 12.9 horas que es un tiempo elevado.

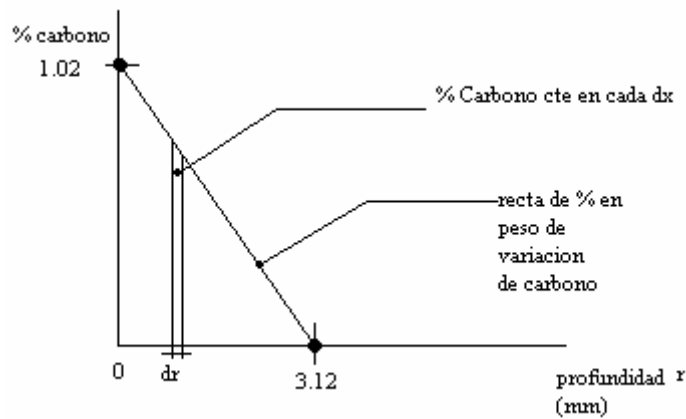
Primero se va a exponer unos gráficos de cómo es la composición de carbono en función de la profundidad a diferentes tiempos de cementación.



Como se puede ver en este grafico la aproximación a una recta es muy buena.

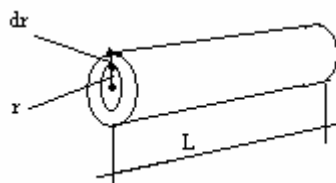
Esquema de la grafica de variación de composición de carbono con respecto al inicial:

Composición-profundidad



Formula para calcular el consumo de carbono:

Esquema de una capa diferencial de la pieza con concentración de carbono constante:



$$\text{Moles de carbono} = \int_{r_i}^{r_f} \% \text{ peso } C(r) \cdot dv \quad \text{con } dv = 2\pi r L dr$$

$$\text{Moles de carbono} = \frac{\varphi_{\text{acero}} \cdot 2\pi \cdot L}{12 \cdot 10^3} \left[\int_{r_i}^{r_f} \% \text{ carbono } (r) \cdot r dr - \int_{r_i}^{r_f} dr \right]$$

Datos: $\varphi_{\text{acero}}: 0.00785 \text{ g/mm}^3$

Se divide la pieza en cuatro partes las cuales constante son cilindros para facilitar los cálculos

1- cilindro de radio = 10mm y longitud = 30mm.

Recta de % en peso en función del radio (profundidad) = $0.326923 r - 2.2423$

$$\text{para } \begin{cases} r_f = 10 \text{ mm} \\ r_i = 6.88 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\frac{\varphi_{\text{acero}} \cdot 2\pi \cdot 30}{12 \cdot 100} \left[\int_{6.88}^{10} (0.326923 r - 2.24923) \cdot r dr - \int_{6.88}^{10} dr \right] = 0.009886$$

Luego son 0.009886 moles de carbono que hacen falta para cementar primer cilindro de la pieza.

2- Cilindro de radio = 11.5mm y longitud = 51mm

Recta de % en peso en función del radio (profundidad) = $0.326923 r - 2.73962$

$$\text{para } \begin{cases} r_f = 11.5\text{mm} \\ r_i = 8.38\text{mm} \end{cases}$$

$$\frac{\varphi_{\text{acero}} \cdot 2\pi \cdot 51}{12 \cdot 100} \left[\int_{8.38}^{11.5} (0.326923 r - 2.73962) \cdot r dr - \int_{8.38}^{11.5} dr \right] = 0.217159$$

Luego son 0.217159 moles de carbono que hacen falta para cementar el segundo cilindro de la pieza.

3- Cilindro de radio = 31.5 mm y longitud = 11mm

Recta de % en peso en función del radio (profundidad) = $0.326923 r - 9.278075$

$$\text{para } \begin{cases} r_f = 31.5 \text{ mm} \\ r_i = 28.38 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\frac{\varphi_{\text{acero}} \cdot 2\pi \cdot 11}{12 \cdot 100} \left[\int_{28.38}^{31.5} (0.326923 r - 9.278075) \cdot r \, dr - \int_{28.38}^{31.5} dr \right] = 0.020503$$

Luego hacen falta 0.020503 moles de carbono para cementar el tercer cilindro de la pieza.

4- Cilindro de radio = 10mm y longitud = 184mm

Recta de % en peso en función del radio (profundidad) = $0.326923 r - 2.73962$

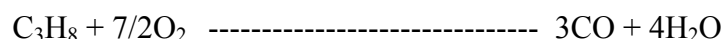
$$\text{para } \begin{cases} r_f = 11.5 \text{ mm} \\ r_i = 8.38 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\frac{\varphi_{\text{acero}} \cdot 2\pi \cdot 184}{12 \cdot 100} \left[\int_{8.38}^{10} (0.326923 r - 2.24923) \cdot r \, dr - \int_{8.38}^{10} dr \right] = 0.06063263$$

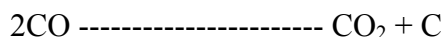
Luego hacen falta **0.06063263** moles de carbono para cementar el cuarto cilindro de la pieza.

El total de moles que hacen falta para cementar la pieza son = 0.112737526 así que son $0.112737526 \cdot 6.02214173 \cdot 10^{23} = \mathbf{6.78922135 \cdot 10^{22}}$ átomos de carbono por pieza.

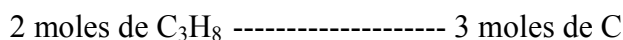
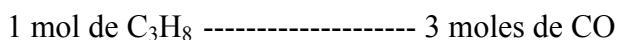
4.2.B.- Proporciones de moles producidas en las reacciones.



Luego en la reacción de combustión se producen por cada 2 moles de C_3H_8 6 moles de CO.



Luego en esta reacción por cada dos moles de monóxido de carbono se producen 1 mol de carbono libre disponible para la cementación de las piezas. Así que teniendo en cuenta estas proporciones se tienen la siguiente reacción:



4.2.C.- Cantidad de átomos de carbono consumidos por el caudal de piezas.

Caudal de piezas por hora = 203 piezas/hora.

Moles de carbono por pieza = 0.112737526

Se tiene que $203 \text{ piezas/hora} \cdot 0.112737526 = \mathbf{22.88571778}$ moles de carbono/hora.

4.3- Pérdidas de elementos en el proceso.

Las pérdidas hay que evaluarlas ya que su conocimiento mejoran el proceso y dan información de cuál es el porcentaje de pérdidas por cada lugar para ver cuál puede ser la causa de error en la cementación del horno ya que si se estudian bien esto se puede crear una herramienta de comprobación de la cementación de las piezas sin tener que hacer ensayos previos nada más con estudiar por ejemplo los elementos que salen por la chimenea.

Las únicas pérdidas de elementos en un horno son por la chimenea y por las puertas y orificios que tengan.

4.3.A- Elementos perdidos por la chimenea (Cpc).

Por la chimenea va a pasar un caudal que va a ser igual al caudal de entrada

menos los átomos de carbono libres que van a formar parte de la cementación de la pieza. Así que las moléculas que van a salir son CO según la curva de boudaurd, CO_2 como producto de la reacción de transformación del monóxido de carbono en carbono libre y dióxido de carbono, también saldrá H_2O producto de la reacción de combustión y por último salda nitrógeno procedente del aire para la combustión. Todo esto en una proporción adecuada así que se fija un marco y todo lo que se pase de ese marco o composición específica es que el proceso no está dando resultado y con esto se puede saber de dónde viene el problema pero esto no entra en el proyecto que se está llevando a cabo.

4.3.B- Elementos perdidos por las puertas y orificios (Cpp).

Según el fabricante del horno al que se le está haciendo el proyecto de funcionamiento, las pérdidas por las puertas y orificios están controladas y no suponen más estudio.

4.4- Conclusiones sobre la evaluación de las pérdidas.

Estas pérdidas se evalúan porque da información sobre el buen o mal funcionamiento del proceso de cementación ya que sabiendo lo que se le echa al horno y teniendo en cuenta las reacciones existentes y sabiendo lo que sale por la chimenea y lo que se escapa por las puertas se tiene que se sabe lo que se ha quedado dentro del material que se está cementando por diferencia entre uno y otro. Esto es un herramienta muy eficaz y a primera vista del funcionamiento del proceso de cementación ya que da información instantánea de los que está pasando en el horno y no hay que esperar que las piezas se enfríen para hacerle un ensayo que da lugar a una partida mala de piezas

mientras que se ha producido el defecto y se ha dado cuenta del error. Además esto como sugerencia al promotor del proyecto se podría poner un sensor que reconozca las concentraciones de elementos que se escapan y con un programa informático así poder automatizar el proceso de comprobación y marcar tanto el umbral de buen funcionamiento como los márgenes permitidos.

5- Balance de energía del proceso.

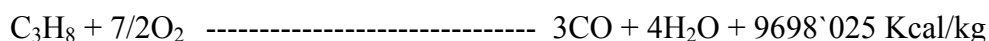
En este apartado se va a calcular todo lo referente a la energía que hay que administrar a las piezas para que se lleve a cabo el calentamiento de las mismas para que se lleve a cabo a cementación de las piezas. También así como las pérdidas que hay en el proceso para saber cuánto combustible se consume y las pérdidas que son fundamentales porque es por donde se puede atacar a la economía del proyecto para hacerlo más rentable.

5.1- Transferencia de energía en el proceso.

La transferencia de energía del proceso va a ser calorífica y va a ser la responsable del calentamiento de las piezas.

El tipo de combustible a utilizar es propano, que combustionando incompletamente (como se va a hacer en el proceso) da por kilogramo 9698.025 Kcal.

Reacción de combustión incompleta:



5.2- Calor consumido por el caudal piezas a cementar en el proceso (Qi):

Para este proyecto primero hay que evaluar en calor que consumen las piezas porque a este calor no le influye el horno sino la propia forma de la pieza, el material de la pieza y así como la cantidad de piezas que se quieren calentar.

En el proceso hay que calentar un flujo de las 203 piezas/hora de acero y 0.9633 kg cada una.

A continuación se muestran los cálculos:

$$\frac{\text{calor}}{\text{hora}} = mf \cdot Ce \cdot \Delta T \begin{cases} mf = \text{caudal de piezas} \\ Ce = \text{calor específico del acero} \\ \Delta T = \text{incremento de temperatura} \end{cases}$$

Datos:

$$mf = 203 \text{ piezas / hora} = 203 \cdot 0.9633 \text{ Kg/pieza} = 195.5499 \text{ Kg/hora}$$

$$Ce = 460 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\Delta T^\circ = (^{\circ}\text{T final} - ^{\circ}\text{T inicial}) = ((875 - 20) + 273) = 1128 ^\circ\text{K}$$

El resultado es:

$$\frac{\text{calor}}{\text{hora}} = 195.5499 \cdot 460 \cdot 1128 = 101466.93 \text{ kJ/hora}$$

Entonces:

$$Q_i = 101466.93 \text{ kJ/hora}$$

Esta cantidad de energía que se muestra es la marca el umbral de las pérdidas todo lo que se administre a partir de esta magnitud es energía perdida que hace encarecer el proceso de calentamiento y por consiguiente el de cementación.

5.3- Temperatura de combustión del propano:

La temperatura de combustión es la temperatura a la que se llegan a poner los productos de la combustión cuando esta se lleva a cabo.

$$T_{\text{combustion}} = \frac{\Delta H}{m_{\text{f combustion}} \cdot C_p} + {}^{\circ}T_{\text{inicial}}$$

$$T_{\text{combustion}} = \frac{9698.025}{4 \cdot 1 + 3 \cdot 0.25 + 14 \cdot 0.22} + 20 = 1258.5728 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\approx 1259 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5.4- Pérdidas de calor en el proceso.

Las pérdidas de calor en el proceso son más importantes que las pérdidas de moles de elementos ya que el calor va a ser el que marque el caudal de combustible que hay que introducir en el horno. Las pérdidas de calor van a ir enfocadas al cálculo de estas en el horno que es el lugar donde se llevan a cabo estas pérdidas ya que es lugar donde se hace el calentamiento.

5.4.A- Calor consumido por los elementos que no entran en el proceso de cementación (Qpn).

Los elementos que no entran en el proceso son las bateas transportadoras de piezas que son las responsables de mover las piezas por el interior del horno.

Datos:

Como el horno se ha pedido a medida del proyecto, las bateas transportadoras transportan cada una 203 piezas/hora.

Peso de la batea según el fabricante del horno = 41.67 Kg

Calor específico del material de la batea que es acero = 460 J/Kg·°K

Luego se calcula primero la cantidad de bateas que hacen falta para transportar la producción horaria real:

$$1 \text{ bateas/hora} \cdot 41.67 \text{ Kg/batea} = 41.67 \text{ Kg/hora}$$

$$\frac{\text{calor}}{\text{hora}} = m_f \cdot C_e \cdot \Delta T \begin{cases} m_f = \text{caudal de piezas} \\ C_e = \text{calor específico del acero} \\ \Delta T = \text{incremento de temperatura} \end{cases}$$

$$\frac{\text{calor}}{\text{hora}} = 125 \cdot 460 \cdot 1128 = 21621.73 \text{ kJ/hora}$$

Entonces:

$$Q_{pn} = 21621.73 \text{ kJ/hora}$$

5.4.B- Calor perdido por la chimenea (Qpc):

El calor perdido por la chimenea es una de las pérdidas más significativas que hay en el proceso de calentamiento de las piezas ya que los gases tienen que tener una cierta temperatura para que el tiro de la chimenea sea eficaz y así poder reponer los gases del interior del horno sin problemas.

Como se ha evaluado en el apartado segundo (balance de materia del proceso – elementos perdidos por la chimenea) el caudal de gases que salen por la chimenea es el mismo que el caudal de gases que entra por la combustión ya que las pérdidas por las puertas son insignificantes según el fabricante del horno.

$$\frac{\text{calor}}{\text{hora}} = m_{f \text{ chimenea}} \cdot C_e \cdot \Delta T \quad \begin{cases} m_{f \text{ chimenea}} = \text{caudal de gases} \\ C_e = \text{calor específico de los gases} \\ \Delta T = \text{incremento de temperatura} \end{cases}$$

Datos:

Para C_e aire:

$$C_e \text{ aire} = 0.24 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} = 0.2743 \text{ kJ / kg}^\circ\text{K}$$

Para ΔT :

El fabricante propone que los gases de salida tengan 300 °C de temperatura para

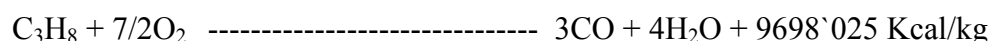
que el tiro de la chimenea sea óptimo. En este apartado hay que hacer mucho hincapié ya que la evaluación de esta pérdida hace referencia al buen rendimiento del proceso. Así se impone que la temperatura mínima para el buen tiro es de 300 grados para que las pérdidas de calor no sean tan pronunciadas.

Así que $\Delta T = 300 \text{ °C} = 573 \text{ °K}$

Para mf chimenea:

Como el mf chimenea = mf combustible + mf aire ya que en peso es lo mismo que calcular los productos de la combustión hace falta ver cuál es la cantidad de aire que hay que introducir en el horno que por supuesto está en función del caudal de propano (combustible) que se va a introducir en el horno.

El aire tiene un porcentaje en peso de $\begin{cases} 23.17\% \text{ O}_2 \\ 76.83\% \text{ N}_2 \end{cases}$ así que por cada kilogramo de aire se tiene 0.2317 kg de oxígeno molecular y 0.7683 kg de nitrógeno molecular.



$$\begin{array}{l} 1 \text{ kg de C}_3\text{H}_8 \text{ ----- } 7/2 \text{ kg de O}_2 \\ X \text{ kg de C}_3\text{H}_8 \text{ ----- } 7/2 \cdot X \text{ kg de O}_2 \end{array}$$

Entonces para

$$\begin{array}{l} 1 \text{ kg de aire ----- } 0.2317 \text{ kg de O}_2 \\ Y \text{ kg de aire ----- } 0.2317 \cdot Y \text{ kg de O}_2 \end{array}$$

Entonces una cantidad determinada de aire produce una cantidad de oxígeno que esta tiene que ser igual a las cantidad de oxígeno que hace falta para la combustión incompleta del propano, y esta a su vez va en función de la cantidad de propano que se introduce en el horno.

Por eso se tiene que:

$0.2317 \cdot Y = 7/2 \cdot X = Y = 15.10574 \cdot X$ esta función muestra la relación entre el combustible introducido y el aire que hace falta pero hay que sumarle la cantidad de propano que se introduce que es la unidad entonces que da que $X+Y = X + 15.10574 \cdot X = 16.10574 \cdot X$ que esta si es la cantidad real de kg que se introducen en el horno.

Hay que hacer una aclaración ya que en realidad la cantidad de kilogramos de los productos de la reacción no es igual a la cantidad de kilogramos de los reactivos como se muestra en la ecuación de Einstein y en la siguiente ecuación:

$$\text{Reactivos} \text{ ----- } \text{productos} + \text{energía y la energía} = m \cdot C^2$$

Esa m de la ecuación de Einstein marca la diferencia de peso que existe entre los productos y los reactivos pero como se fija es insignificante porque la velocidad de la luz es muy grande y además esta elevada al cuadrado. Así que se puede aproximar a que

la masa de los reactivos es igual a la de los productos en una reacción.

Entonces una vez calculado el caudal de combustible que le hace falta al horno para funcionar que son 26.481585 kg/hora de propano entonces se tiene que

$$Q_{pc} = 16.10574 \cdot 26.4815785 \cdot 0.2743 \cdot 573 = 67035.51994 \text{ kJ/hora}$$

Entonces:

$$Q_{pc} = 67035.51994 \text{ kJ/hora}$$

5.4.C- Calor perdido por las puertas y orificios (Q_{po}).

Según el fabricante hay que evaluarlo como un 10% del total del calor introducido por el horno.

$$Q_{pp} = 10\% Q_t = 0.1 \cdot m_f \text{ combustión} \cdot 40595.93$$

Como $m_f \text{ combustión} = 26.481589 \text{ kg / hora de propano}$

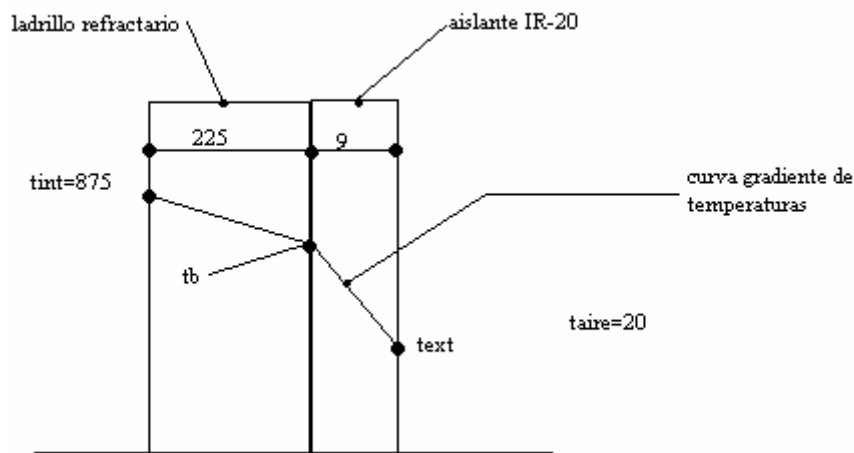
Entonces:

$$Q_{pp} = 1063314.7253 \text{ kJ /hora}$$

5.4.D- Calor perdido por las paredes del horno (Q_{pp}).

El horno consta de una capa de ladrillo refractario de calidad 1039 °C de espesor 225 mm y otra capa de ladrillo refractario aislante IR-20 de espesor 63 mm. La temperatura de la nave donde se cementan las piezas va a estar a una temperatura de 20 °C y el aire de la nave esta en reposo. Con estos datos se calcula el calor que se pierde el horno si la pared interior del horno esta a 875 °C ya que esta es la temperatura a la que el horno va a estar trabajando constantemente.

Esquema de la pared del horno:



Según los datos y las tablas que aporta el fabricante del horno, se va a calcular la conductividad calorífica de los materiales del horno para a continuación calcular el calor perdido por las paredes del horno.

Para calcular la conductividad térmica lo primero es calcular las temperaturas T_b y T_{ext} . Para esto el fabricante ofrece una tabla que relaciona la diferencia de temperaturas que existen entre las paredes del horno, todo esto se calcula para ver a cuáles son las temperaturas que trabajan los diferentes materiales del horno ya que conductividad calorífica de los materiales va en función de la temperatura a la que están trabajando.

Así que se tiene que $T_b = 650$ °C
 $T_{ext} = 100$ °C

Y con los siguientes datos:

$T_{int} = 875$ °C

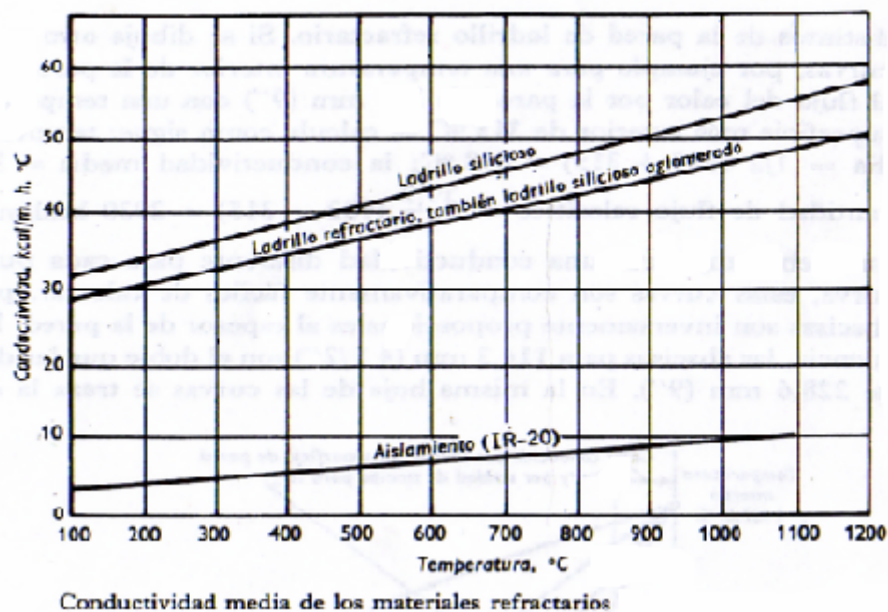
$T_{aire} = 20$ °C

Con estos datos se calcula la temperatura media de trabajo de los refractarios que son:

Para el ladrillo refractario es $\frac{875-650}{2} + 650 = 762.5^{\circ}\text{C}$ así mirando en la tabla la conductividad a esa temperatura es de $0.52 \text{ W / m }^{\circ}\text{C}$

Para el aislante es $\frac{650-100}{2} + 100 = 375^{\circ}\text{C}$ así mirando en la grafica la conductividad a esa temperatura media es de $0.21 \text{ W / m }^{\circ}\text{C}$

Tabla que proporciona el fabricante del horno para calcular la resistencia térmica de los materiales que se utilizan en éste en función de la temperatura a la que se trabaja.



Ahora se calcula otro coeficiente que se llama coeficiente de disipación del calor de la pared exterior y evalúa la disposición a la radiación y convección de la pared exterior del horno. Se calcula mediante una grafica que no se va a introducir en el proyecto pero el coeficiente tiene un valor de $14.4 \text{ W / m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Una vez calculado esto se aplican los datos a las ecuaciones:

$$q = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\frac{e_1}{c_1} + \frac{e_2}{c_2} + \frac{1}{K}} = 3837.251 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}$$

Como el horno tiene expuesto 200 m^2 se tiene que el calor perdido es

$$3837.251 \cdot 200 = 767450.2 \text{ kJ / hora}$$

Entonces:

$$Q_{pp} = 767450.2 \text{ kJ/hora}$$

5.5- Calor consumido por las piezas en el proceso real (Q_{tr}):

El calor consumido total real va a ser igual a el ideal más las pérdidas.

$$Q_{tr} = Q_{tl} + Q_{perdidas} = Q_{tl} + (Q_{pn} + Q_{pc} + Q_{po} + Q_{pp})$$

$$\text{Siendo: } \begin{cases} Q_{tr} = \text{calor total real} \\ Q_{tl} = \text{calor total ideal} \\ Q_{pn} = \text{calor perdido por elementos que no entran en el proceso} \\ Q_{pc} = \text{calor perdido por la chimenea} \\ Q_{po} = \text{calor perdido por las puertas y orificios} \\ Q_{pp} = \text{calor perdido por las paredes} \end{cases}$$

La ecuación va destinada a calcular el caudal de combustible que se introduce en el horno pero indirectamente vamos a calcular el caudal de gases de combustión que hay que introducir que nos da información del caudal de propano que hace falta.

Los datos son:

$$\Delta H_{C_3H_8} = 9698.025 \text{ kcal/kg} = 40595.93 \text{ kJ / kg}$$

$$C_e \text{ aire} = 0.24 \text{ cal / kg } ^\circ\text{C} = 0.2743 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{K}$$

$$Q_{tr} = m_f \text{ combustión} \cdot C_e \text{ aire} \cdot T_{\text{combustión}} = m_f \text{ combustión} \cdot 40595.93$$

$$Q_{ti} = 101466.93 \text{ kJ / hora}$$

$$Q_{pérdidas} = \begin{cases} Q_{pn} = 21621.73 \text{ kJ/hora} \\ Q_{pc} = m_f \text{ gases} \cdot C_{e \text{ aire}} \cdot \Delta T = m_f \text{ gases} \cdot 0.2743 \cdot 573 \\ Q_{po} = 10\% Q_{tr} = 0.1 \cdot (m_f \text{ combustión} \cdot 40595.93) \\ Q_{pp} = 767450.2 \text{ kJ/hora} \end{cases}$$

$$m_f \text{ combustión} \cdot 40595.93 = 101466.93 + 21621.73 + 16.10574 \cdot m_f \text{ combustión} \cdot 0.2743 \cdot 573 + 0.1 \cdot (m_f \text{ combustión} \cdot 40595.93) + 767450.2 =$$

mf combustión = **26.18851823 kg/hora de propano** (C_3H_8)

así que la potencia calorífica que hay que suministrarle al horno es de

$$Q_{tr} = 1063147.253 \text{ kJ/hora}$$

5.6- Rendimiento calorífico del proceso:

El rendimiento calorífico del proceso da información de cómo es de bueno el proceso en el sentido del calor, es decir cuánto calor es el destinado al fin del proyecto que es calentar las piezas y cuanto no. También da información de la rentabilidad es decir del dinero invertido en calentar las piezas ya que el dinero se gasta en combustible (propano) que es este el responsable del calentamiento de las piezas.

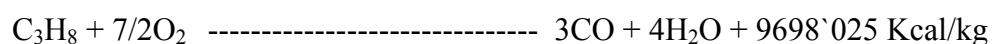
$$\eta = \frac{Q_{tl}}{Q_{tr}} = \frac{101466.93}{1063147.253} \cdot 100 = 9.544 \%$$

6- Caudal de combustible y de aire para el funcionamiento del horno.

El caudal de propano que le hace falta al horno para que cimente la producción de 203 piezas/hora y además de perder calor por los $875^{\circ}C$ a los que está el horno es de **26.4815785 kg/hora**.

Además de propano hay que echarle al horno aire que es junto al combustible el elemento que hace arder la mezcla para ello hay que ver la proporción de elementos que hay en aire en porcentaje en peso.

El aire tiene un porcentaje en peso de $\begin{cases} 23.17\% O_2 \\ 76.83\% N_2 \end{cases}$ por esto en la reacción de combustión siguiente



$$\begin{array}{l} 1 \text{ kg de } C_3H_8 \text{ ----- } 7/2 \text{ kg de } O_2 \\ X \text{ kg de } C_3H_8 \text{ ----- } 7/2 \cdot X \text{ kg de } O_2 \end{array}$$

Entonces para

$$\begin{array}{l} 1 \text{ kg de aire ----- } 0.2317 \text{ kg de } O_2 \\ Y \text{ kg de aire ----- } 0.2317 \cdot Y \text{ kg de } O_2 \end{array}$$

Entonces una cantidad determinada de aire produce una cantidad de oxígeno que esta tiene que ser igual a las cantidad de oxígeno que hace falta para la combustión incompleta del propano, y esta a su vez va en función de la cantidad de propano que se introduce en el horno.

Por eso se tiene que:

$0.2317 \cdot Y = 7/2 \cdot X = Y = 15.10574 \cdot X$ y entonces se tiene que introduciendo la cantidad de combustible que hay que introducir en el horno para calentar las piezas que es de 26.18852 kg de propano/hora se tiene que **395.5969741** kg de aire/hora.

7-Proceso de tratamiento térmico.

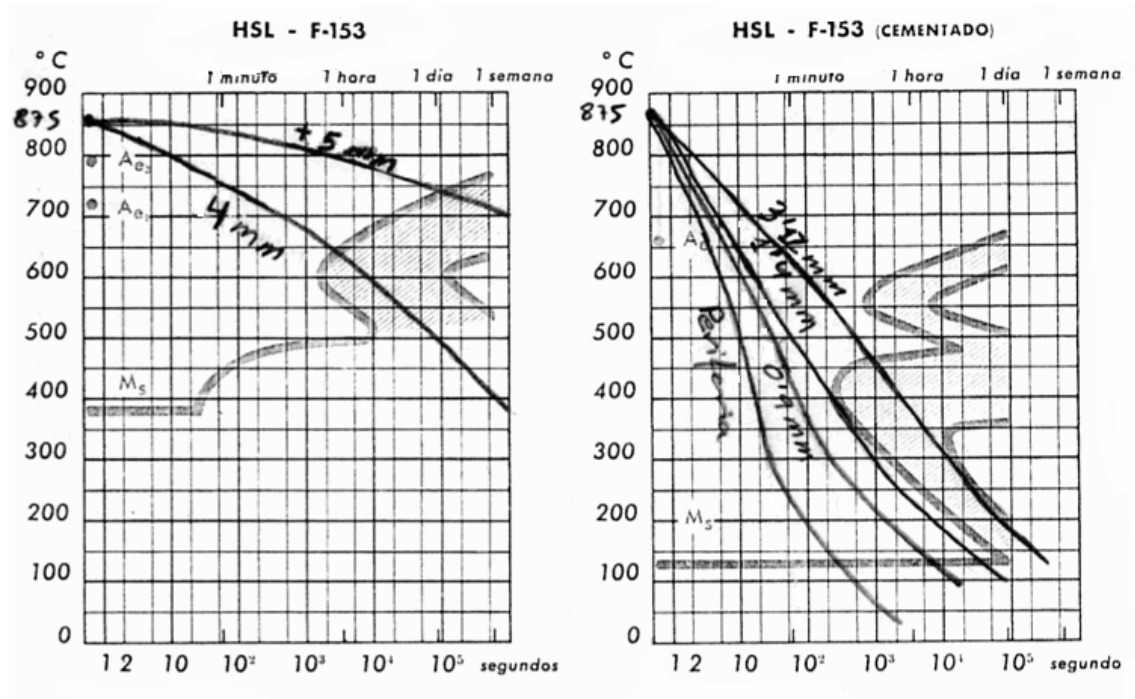
El tratamiento térmico es un proceso que se realiza al acero que bajo un enfriamiento se aumenta la dureza del acero así como su resistencia que son las propiedades que más se buscan con este proceso.

Según el fabricante, el acero con el que se está trabajando da una resistencia final del material que templado y normalizado que son tipos de tratamientos térmico es muy aproximada por su alta templabilidad y como para los requerimientos de resistencia de la periferia del proyecto y tenacidad en el núcleo basta con la que da el normalizado que además es un tratamiento mucho más barato y menos contaminante, así que este es el tratamiento el que se va a llevar a cabo.

7.1- Tipo de tratamiento térmico para el proyecto.

Según el material que se utiliza en el proyecto que es acero F-153 que es un acero de gran templabilidad. Para lo requerido en el proyecto solo hace falta un enfriamiento moderado para endurecer las piezas y que el núcleo de la pieza no sufra tratamiento alguno que es lo que se pide en el proyecto. Así que según las curvas de enfriamiento, la que más se acerca a lo requerido y la más económica es el enfriamiento al aire o normalizado ya que como muestra el fabricante en su catalogo el material se temple totalmente hasta el centro en agua con un diámetro de 175 mm y en aceite con un diámetro de 150 mm y según esto hay que coger un elemento con severidad de temple menos agresivo que va a ser el aire.

En la siguiente figura se va superponer las curvas de enfriamiento de aire en grados por segundo y a diferente profundidad con la curva de la s de transformación para así ver cuáles son la microestructuras que resulta de este tratamiento térmico.



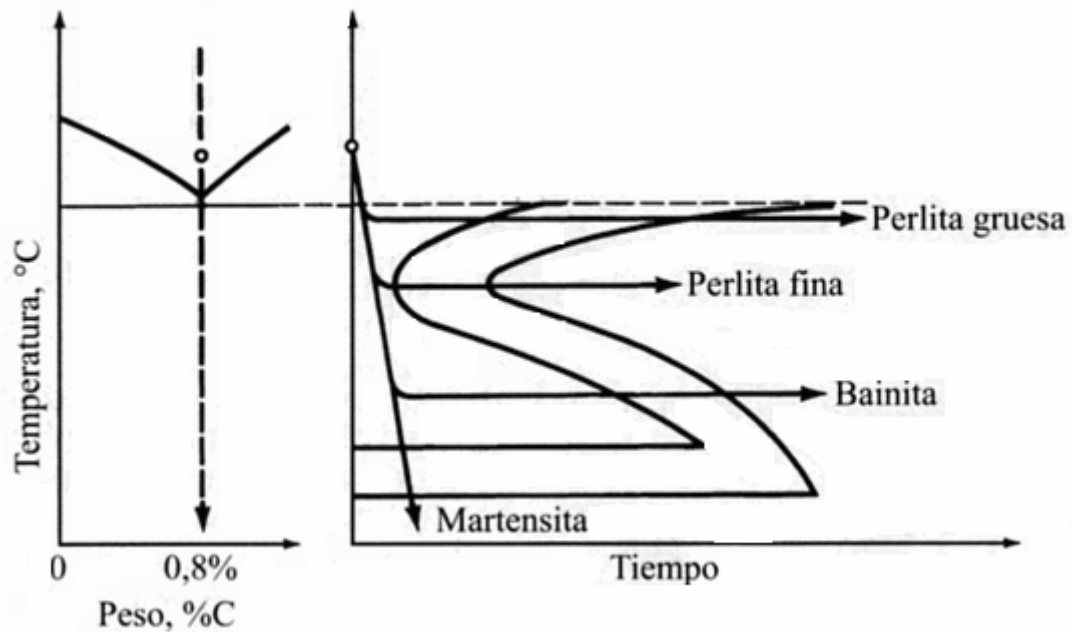
La grafica de la derecha muestra el material cementado, y las curvas que se superponen son las curvas que corresponden las enfriamiento al aire de la zona de la capa cementada que llega hasta los 3.12 mm que es la profundidad máxima de penetración del tratamiento.

Por consiguiente la curva de la izquierda muestra la curva de la s del material sin cementar y las curvas que se superponen son las que pertenecen a partir de la profundidad máxima de penetración del carbono en la cementación. Solo se han calculado dos curvas ya que son las más características, ya que una muestra el enfriamiento del principio de la zona no cementada y otra muestra el final de la zona afectada por el tratamiento térmico que como se muestra a partir de los 5 mm el tratamiento térmico de normalizado no le afecta a la microestructura del acero.

El estudio de estos gráficos se expone en el siguiente apartado.

7.2- Microestructuras resultantes en el tratamiento térmico realizado a la pieza.

Para saber nombrar cuál es la estructura que se forma al cortar la curva de enfriamiento a la curva de la s primero hay que mostrar un esquema que muestra como se llama esta estructura y esto se muestra en la grafica siguiente:



Con esta grafica y las graficas anteriores se puede ver cuál es la microestructura de las piezas ya tratada térmicamente.

La microestructura resultante del tratamiento térmico de normalizado se muestra en la esquema siguiente que representa la periferia de la pieza.

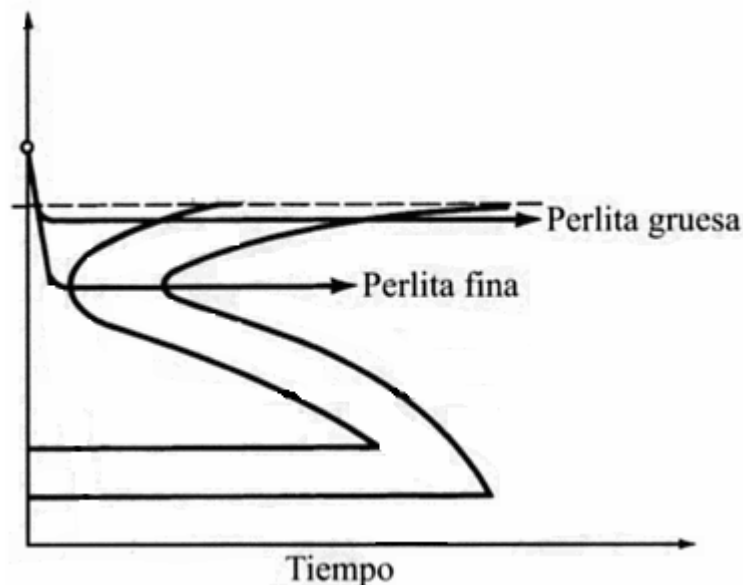
| | | |
|---|-----------------|------------|
| | 0mm | |
| MARTENSITA | 9mm | |
| MARTENSITA | 1.4mm | |
| BAINITA INFERIOR | 3.12mm | profundida |
| PERLITA FINA Y BAINITA SUPERIOR | 4mm | |
| PERLITA GRUESA Y PERLITA FINA | +5mm | |
| ZONA NO AFECTADA POR EL TRATAMIENTO TERMICO (estructura natural del acero F-153) | hasta el centro | |

Los párrafos siguientes muestran las microestructuras que se forman en el proceso de tratamiento térmico de normalizado:

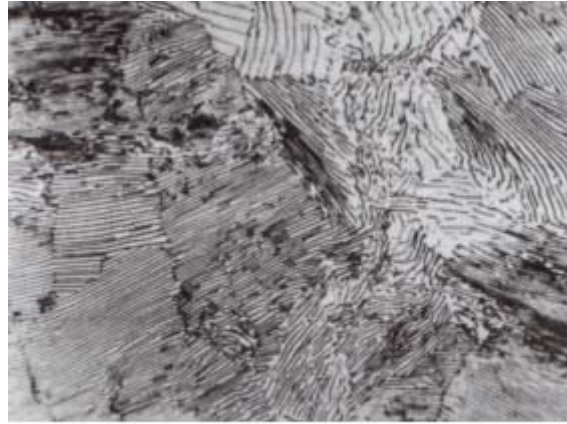
La perlita:

El constituyente estructural del acero que se llama perlita es el menos resistente de todos los que se puede obtener. Se obtiene por un enfriamiento lento y corta la curva de las s por la parte superior como se muestra en la figura de abajo. La perlita que se forma en el acero F-153 tiene una resistencia de $65-80 \text{ kg/mm}^2$ que es suficiente para lo que marca el promotor de 60 kg/mm^2 .

Como se ve en el gráfico existen dos tipos de perlita que son la gruesa y la fina. La fina con una resistencia mayor de 80 kg/mm^2 y la gruesa con una resistencia de menor de 65 kg/mm^2 .



Aquí se muestra una fotografía de la perlita laminar.

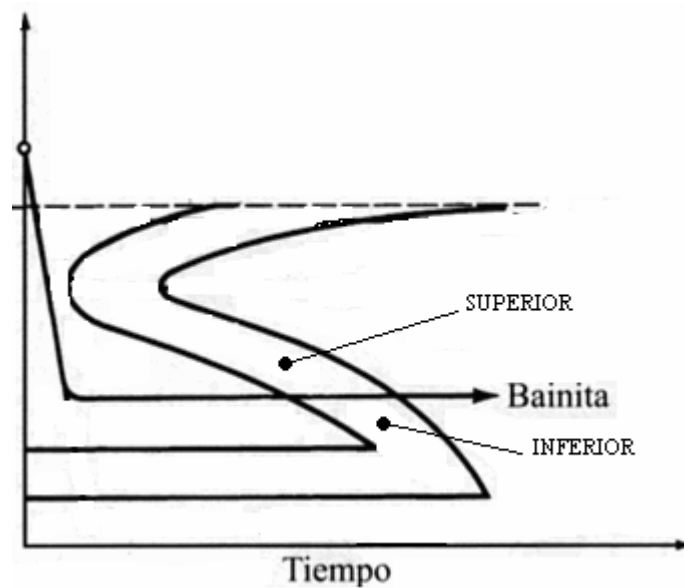


microestructura perlítica laminar, la fase oscura es cementita y la fase blanca es ferrita.

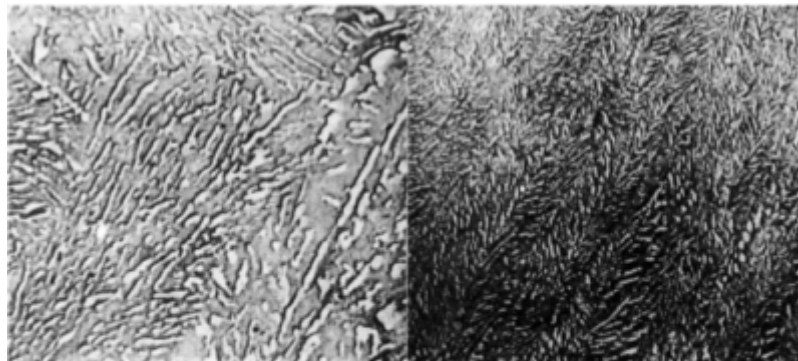
bainita:

Esta es una microestructura intermedia entre la perlita y la martensita así que su resistencia es un poco superior a la de la perlita fina llegando a los 100 kg/mm^2 en la bainita inferior y a unos 90 kg/mm^2 en la bainita superior esta resistencia que se muestra es superior a la que se requiere en el proyecto.

El enfriamiento que recibe el material para que se produzca los tipos de bainita se muestra en la siguiente grafica:



Las fotografías siguientes muestran las microestructuras de los tipos de bainita la fotografía A muestra la bainita superior con una resistencia inferior ya que se crea por un enfriamiento más lento, y la fotografía B muestra la bainita inferior que tiene un microestructura mas fina de la cementita y esto produce en la pieza que tenga mayor resistencia.



A

B

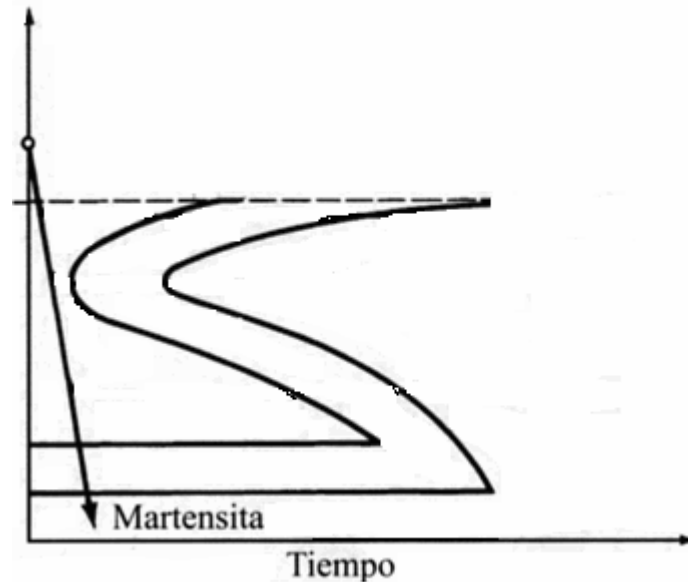
la fotografía A muestra la microestructura de la bainita superior.

la fotografía B muestra la microestructura de la bainita inferior.

En las fotografías la estructura blanca es cementita mientras que la estructura negra es ferrita.

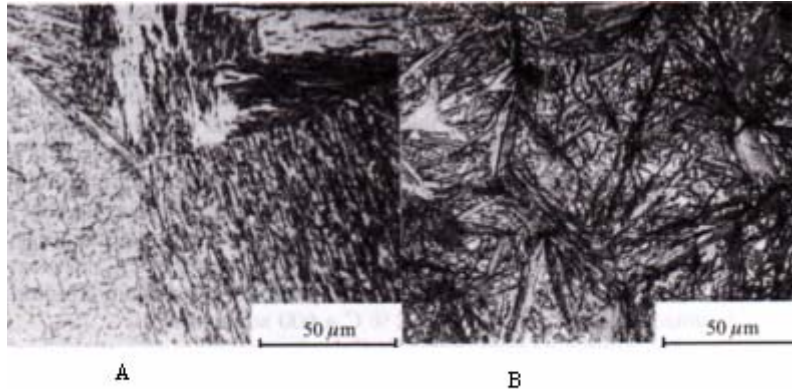
martensita:

La martensita es una microestructura que sale de darle un enfriamiento tal que no toca la nariz de la curva de la s, sino que llega a la parte baja de la curva que es donde sufre esta transformación como se muestra en el grafico siguiente.



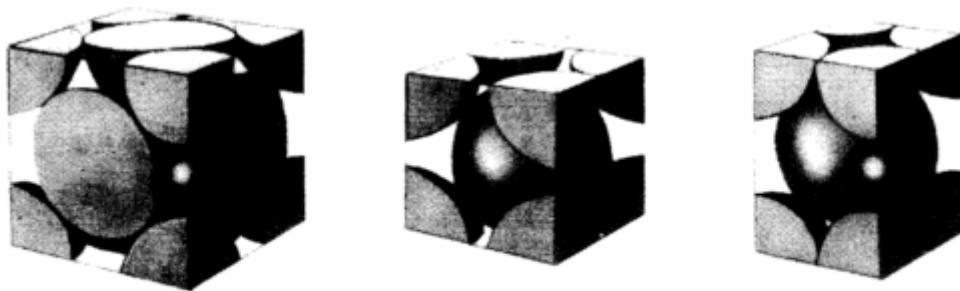
La martensita es el constituyente que más resistencia tiene y más dureza. En concreto al acero F-153 que es el utilizado en el proyecto con el normalizado adquiere una resistencia de 100 a 120 kg/mm² que da con creces los 100 kg/mm² que se pide para el proyecto.

Esta fotografía muestra la estructura de la martensita, como se ve es una caótica estructura la cual ese caos es el que da su resistencia ya que los planos de deslizamiento de los granos están totalmente anclados y el carbono al estar atrapado en un lugar que de forma natural no estaría hace que la deformación de la red del hierro a temperatura ambiente haga crecer la resistencia del material, esto se muestra y se explica muy bien en la siguiente figura.



la fotografía muestra la microestructura de la martensita, la fotografía A muestra la martensita tipo cintas y la fotografía B muestra la martensita tipo laminas.

El aumento de la resistencia en la martensita se ve muy bien en es muy intuitivo mostrando una fotografía esquemática a nivel atómico en el que se aprecia la deformación de la red del acero a temperatura ambiente. Por quedarse atrapado el carbono en un lugar que en estado natural no estaría, esto pasa porque la difusión del material es menor que la velocidad de enfriamiento al que se ha expuesto y el átomo de carbono no le da tiempo de salir corriendo y queda atrapado deformando la red del hierro.



fotografía que muestra la distorsion que produce un atomo de carbono en la red del acero cuando sufre un tratamiento termico de temple.