

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINERA Y
METALURGICA

“ COLADA CONTINUA HORIZONTAL DE COBRE Y SUS ALEACIONES EN
PRODUCTOS REDONDOS “

INFORME DE INGENIERIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA

Presentado por

ALFREDO ISRAEL AMORETTI ABURTO

LIMA – PERU

2000

Dedicatoria:

A mis padres y hermanos que
siempre me brindaron su apoyo.

COLADA CONTINUA HORIZONTAL DE
COBRE Y SUS ALEACIONES EN PRODUCTOS REDONDOS

1. INTRODUCCION	01
2. FUNDAMENTOS TEORICOS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	
2.1 Teoría de transmisión de calor	03
2.2 Propiedades térmicas de los materiales	06
2.3 Contenido calórico del cobre	15
2.4 Propiedades físicas de las aleaciones de cobre ...	17
3. LA COLADA CONTINUA HORIZONTAL	
3.1 La matriz	19
3.2 Preparación y armado de la matriz	23
3.3 La Máquina Extractora	28
3.4 La Línea de Agua de Refrigeración	30
3.5 Puesta en marcha del Proceso	31
3.6 El proceso de colada continua	36
4. COMPORTAMIENTO TERMICO DE LA MATRIZ	
4.1 Balance térmico en una matriz	43
4.2 Método para determinar el flujo de agua	
óptimo en una matriz	52
4.3 Suposiciones para el cálculo de transferencia	
de calor	55
4.4 Determinación de la zona de solidificación	57

4.5 Cálculo de la interferencia (i)	66
5. EVALUACION ECONOMICA	71
6. CONCLUSIONES	73
7. RECOMENDACIONES	75

1.- INTRODUCCIÓN

En Colada Continua existen tres tipos de procesos los cuales son definidos por la dirección y sentido en que son extraídos sus productos a través de su matriz, es así como se tienen la Colada Vertical (semicontinua, vertical-descendente), la Colada Horizontal y el Up Cast (vertical ascendente). La primera es utilizada para la obtención de tochos que van normalmente de 3" a 8" de diámetro. El Up Cast es utilizado generalmente para la producción de varillas menores de 1 pulg. y su extracción se realiza en líneas múltiples. **La Colada Horizontal** es usada para la producción de tochos de diámetros que van de 1 a 8 pulg., extrayéndose en varias líneas las medidas menores.

Este último proceso será el tema que se desarrollará en el presente texto ya que del cual se dispone de poca información especializada, sobretodo de las matrices.

Durante el desarrollo de este trabajo se hará una descripción tanto del proceso productivo como de la preparación de los equipos, en especial de la matriz; luego seguirá la parte mas importante que es el estudio

de la transferencia de calor que ocurre en la matriz con lo cual se podrá determinar un parámetro importante de la fabricación y armado de la misma como es la interferencia de diámetros de ensamble molde-enfriador en su estructura cilíndrica.

El estudio de transferencia de calor esta basado en el intercambio térmico entre el material que solidifica al pasar por la matriz y el agua de refrigeración correspondiente, los cuales relacionándolos con la teoría de transmisión de calor se llega finalmente a determinar el valor de la interferencia " i " óptima que debe existir en la fabricación y armado de la matriz.

•

2. FUNDAMENTOS TEORICOS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

A continuación se presentaran los principios de la teoría de transmisión de calor y las propiedades térmicas y termodinámicas del cobre, así como de los demás elementos que participan en la fabricación de la matriz y en el cálculo de balance térmico.

2.1 TEORIA DE TRANSMISION DE CALOR

Aquí se citará un subcapítulo del texto "Transferencia de Calor" de los autores Donald Pitts y Leighton Sissom que corresponden al caso de las matrices de sección circular para colada continua horizontal de productos redondos (tochos).

CONDUCCION.-

Un gradiente de temperatura dentro de una substancia homogénea ocasiona una tasa de transferencia de energía dentro del medio que puede ser calculada por:

$$q = - k A \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{----- (Ley de Fourier) -----} \quad 2.1.1$$

donde $\partial T / \partial r$ es el gradiente de temperatura en la dirección normal al área A . La *conductividad térmica* k es una constante experimental para el medio en referencia, y puede depender de factores como la temperatura y la presión. Las unidades de k en el sistema métrico es $W/m-K$.

Esta ley de Fourier es extensiva a los sistemas de paredes compuestas según la siguiente expresión:

$$\text{Flujo de calor conductivo} = \frac{\text{Diferencia total de temperatura}}{\text{Suma de resistencias térmicas}} \quad \text{-----} \quad 2.1.2$$

SISTEMAS RADIALES CON TEMPERATURAS SUPERFICIALES FIJAS.-

La figura 2.1.1 representa una pared cilíndrica de capa simple de un material homogéneo de conductividad térmica constante y de temperaturas interior y exteriormente uniformes. Para un radio dado el área normal al flujo radial de calor por conducción es $2 \pi r L$, donde L es la altura de cilindro. Sustituyendo este flujo radial

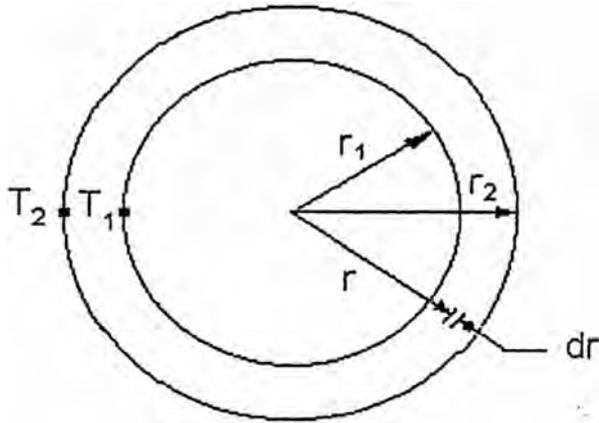


Fig. 2.1.1

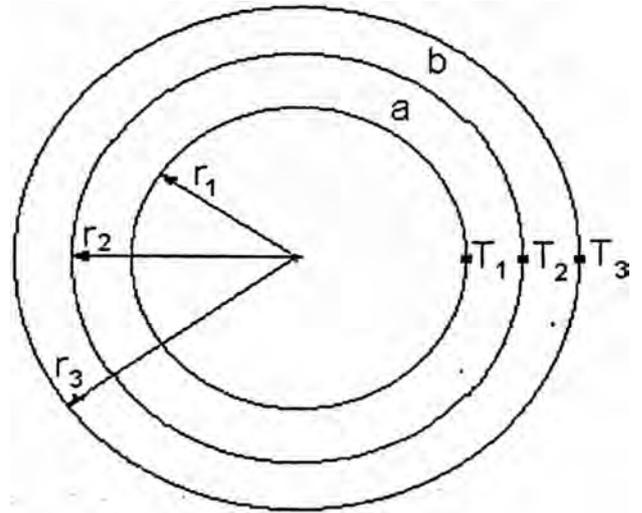


Fig. 2.1.2

en la ec. 2.1.1 e integrando con q constante, tenemos

$$q = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = - \frac{q}{2\pi kL} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$T_2 - T_1 = - \frac{q}{2\pi kL} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad 2.1.3$$

$$\text{ó } q = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad 2.1.4$$

De la ec. 2.1.4 tenemos que la resistencia térmica de un cilindro de una capa es $[\ln(r_2 / r_1)] / 2 \pi k L$. Para un cilindro de capa doble (Fig. 2.1.2) la tasa de transferencia térmica es, usando la expresión (2.1.2) ,

$$q = \frac{2 \pi L (T_1 - T_3)}{\frac{l}{k_a} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{l}{k_b} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad \text{-----2.1.5}$$

2.2 - PROPIEDADES TERMICA DE LOS MATERIALES

En esta parte presentaremos dos factores que definen el comportamiento del cobre, aleaciones de cobre y del grafito como son conductividad térmica (k) y dilatación (e).

2.2.1 Conductividad Térmica

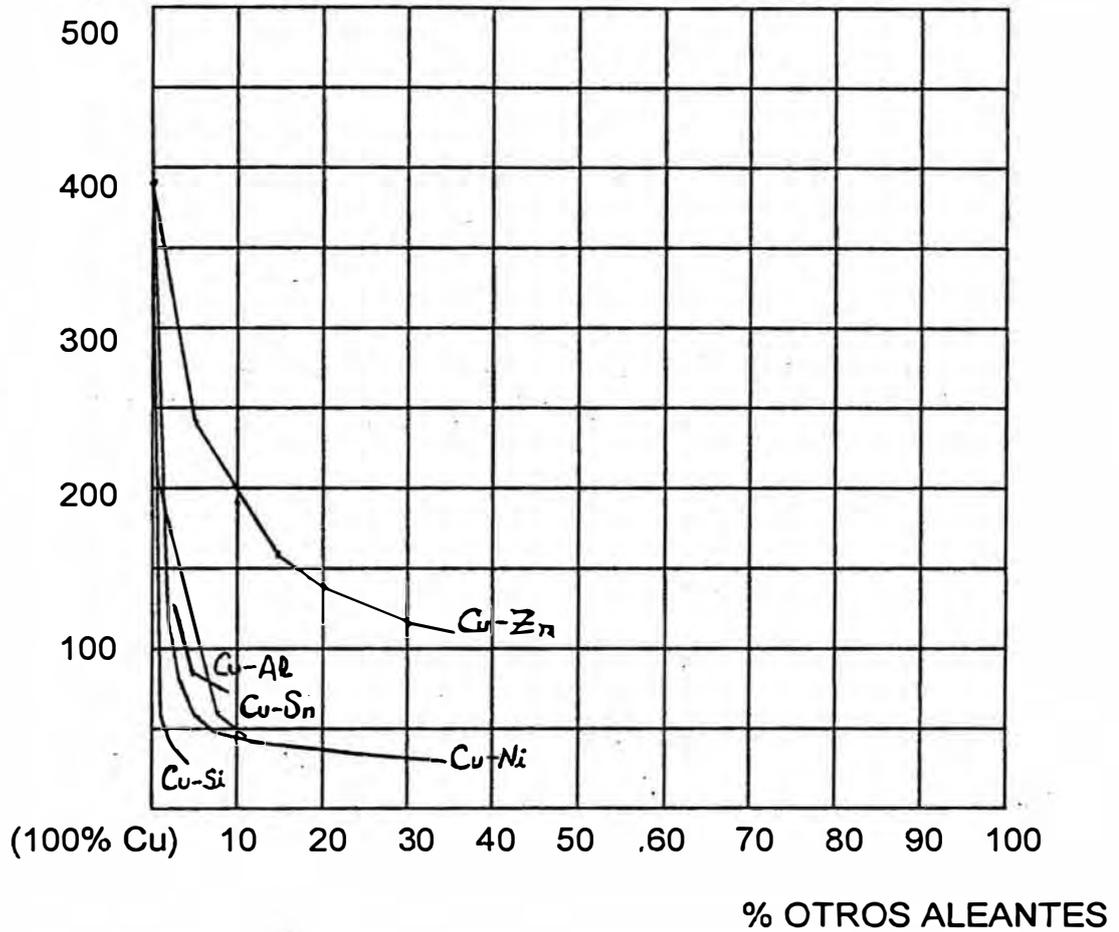
Con la finalidad de estudiar la variación del factor k del cobre en función de sus aleaciones que se pueden formar se presentan los siguientes cuadros (datos de Handbook de ASM)

% Cobre	k(W/mK) a 20°C
99.99	391
99.95	386
99.88	377
99.70	346

ALEAC. de Cu	K (W/mK) a 20°C
95 Cu- 5 Zn	234
90 Cu- 10 Zn	189
85 Cu- 15 Zn	159
80 Cu- 20 Zn	140
70 Cu- 30 Zn	120
65 Cu- 35 Zn	116

Aleación de Cu	k(W/mK)a 20°C
99Cu-1Cd	360
99 Cu-1Cr	171
99 Cu-1Pb	377
98.7 Cu- 1.3 Sn	208
92 Cu- 8 Sn	62
90 Cu- 10 Sn	50
95 Cu- 5 Al	79.5
95 Cu- 5 Al	69
98.5 Cu- 1.5 Si	57
98.5 Cu- 1.5 Si	36
90 Cu- 10 Ni	40
80 Cu- 20 Ni	36
70 Cu- 30 Ni	29

Conductividad k
($W/m \cdot ^\circ K$)



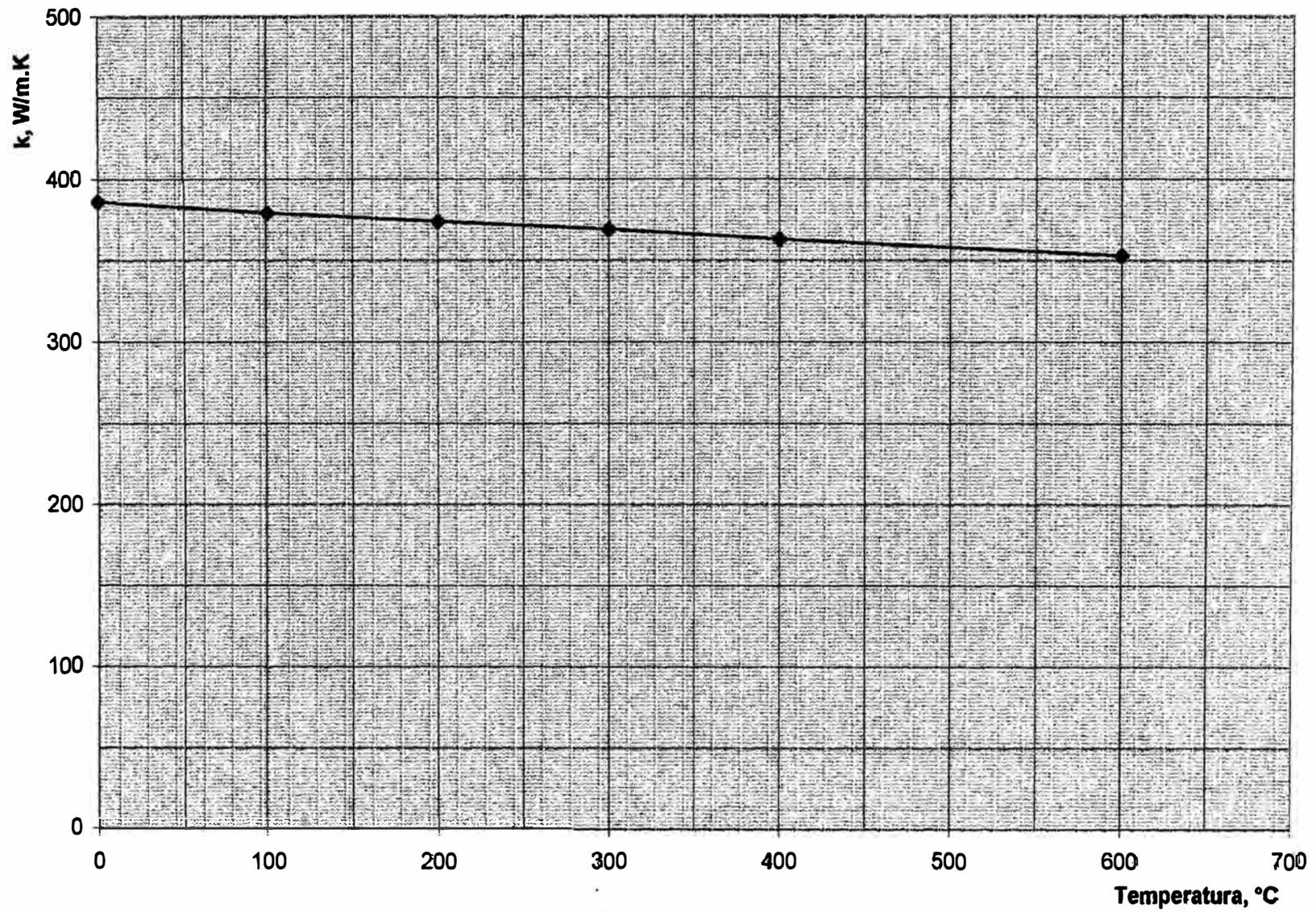
CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL COBRE
EN FUNCION DE SUS ALEANTES

De lo anterior se observa que ningún aleante mejora la conductividad térmica del cobre, por el contrario lo bajan notablemente. Este es el motivo por el cual se emplea el cobre sin alear para la fabricación de enfriadores de colada continua.

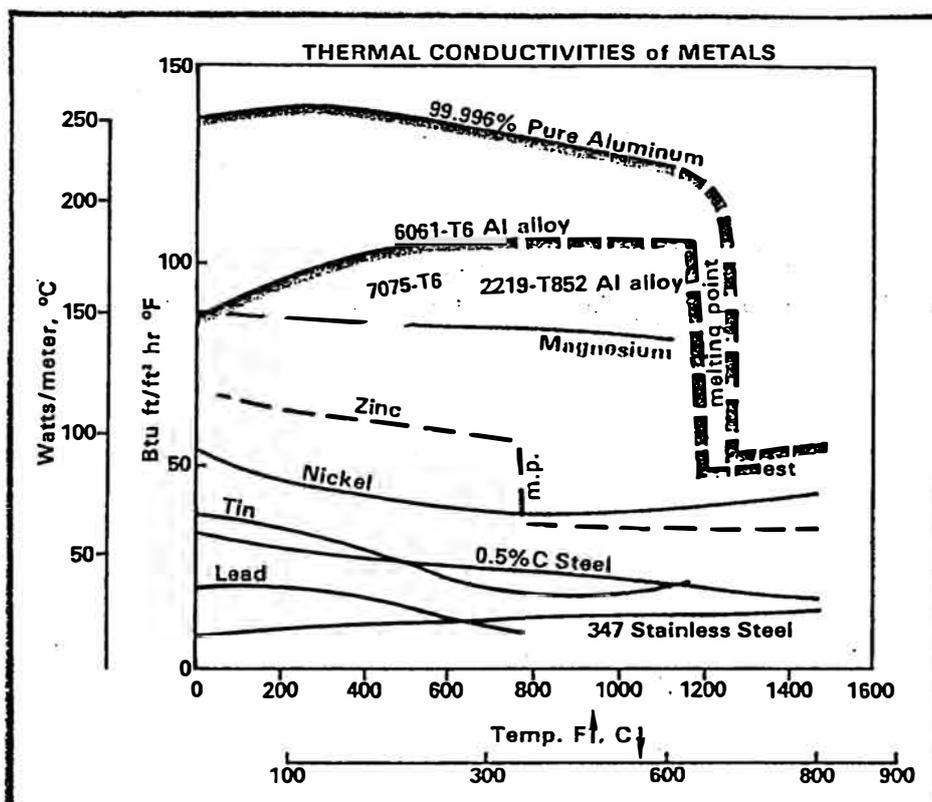
La variación del factor k en función de la temperatura se observa en el siguiente cuadro (datos de transferencia del calor por B.V. KARLEKAR y R.M. DESMOND):

Conductividad Térmica k , W / m K

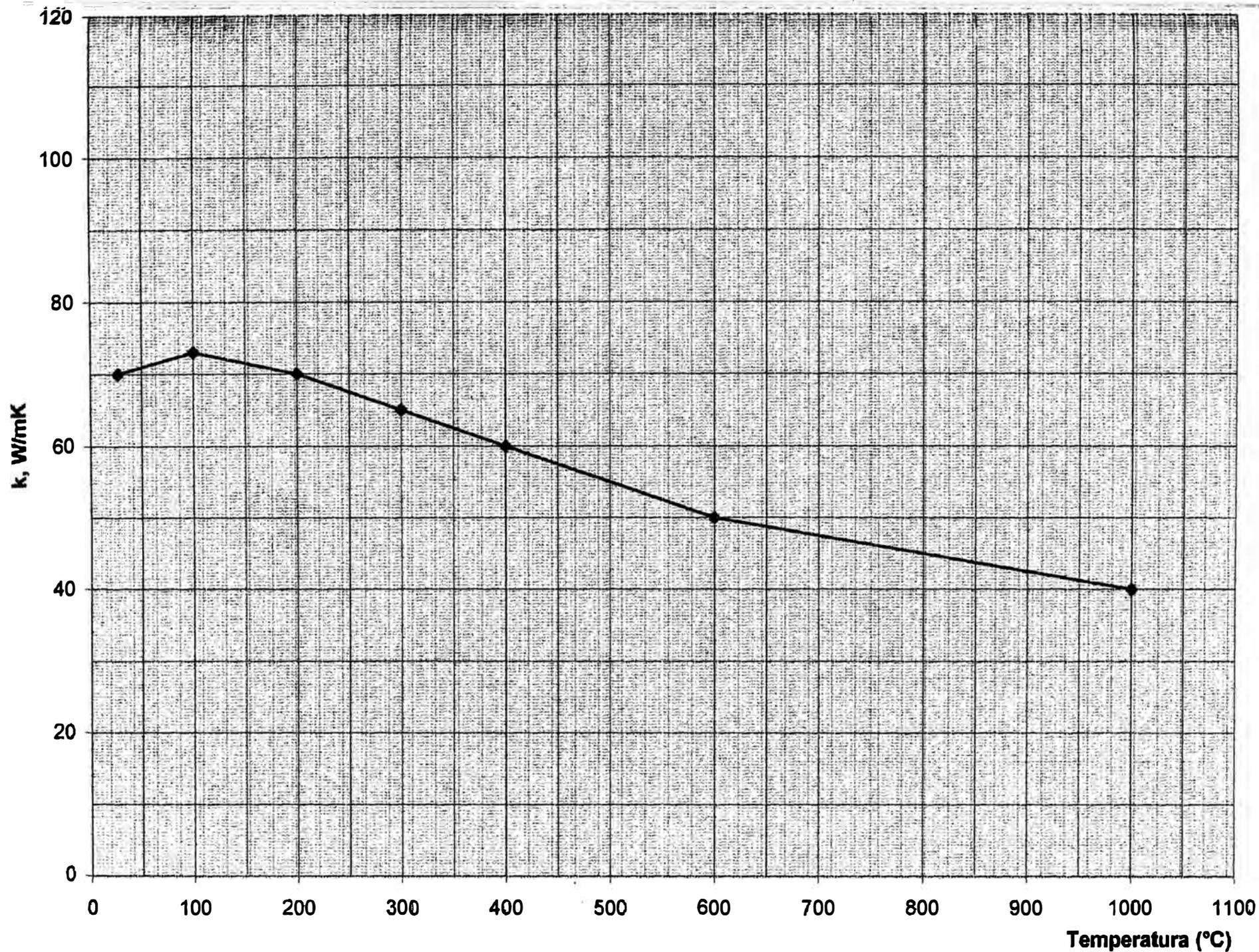
METAL	-100	0	100°C	200	300	400	600
Cobre Puro	407	386	379	374	369	363	353
70Cu - 30 Zn	88	—	128	144	147	147	—
Níquel (99.9%)	104	93	83	73	64	59	—



Conductividad Térmica del Cobre vs. Temperatura



CONDUCTIVIDAD TERMICA DE VARIOS METALES
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA



Conductividad térmica del grafito EK412 - Ringsdorff

El factor k para los grafitos se presenta a continuación, según información del fabricante Ringsdorff (Alemania):

k (W/m.K)

grafito Ringsdorff	27°C	100	200	300	400	600	1000
EK412	70	73	70	65	60	50	40
EK432	100	---	---	---	---	---	---

2.2.2- Dilatación del cobre y del grafito

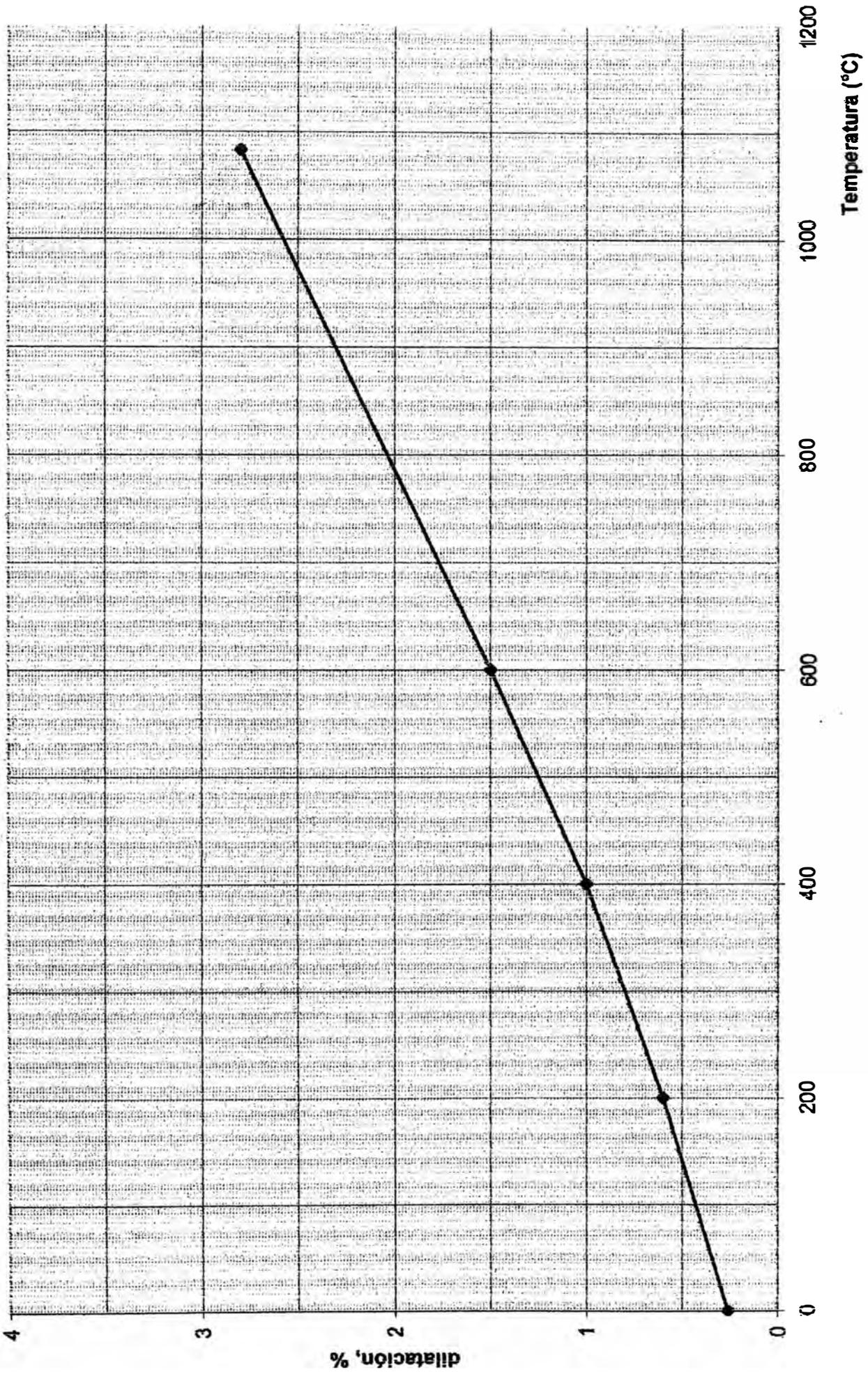
Dilatación del cobre.-

Datos:

Temperatura (T)	Dilatación (e)
-190°C	0.00 %
0	0.26
200	0.60
400	1.00
600	1.50
1084	2.80

De la observación del gráfico respectivo se puede asumir que la dilatación tiene una variación lineal entre los puntos que se mencionan en el cuadro anterior.

Expansión del cobre en función de su temperatura



Dilatación del grafito.-

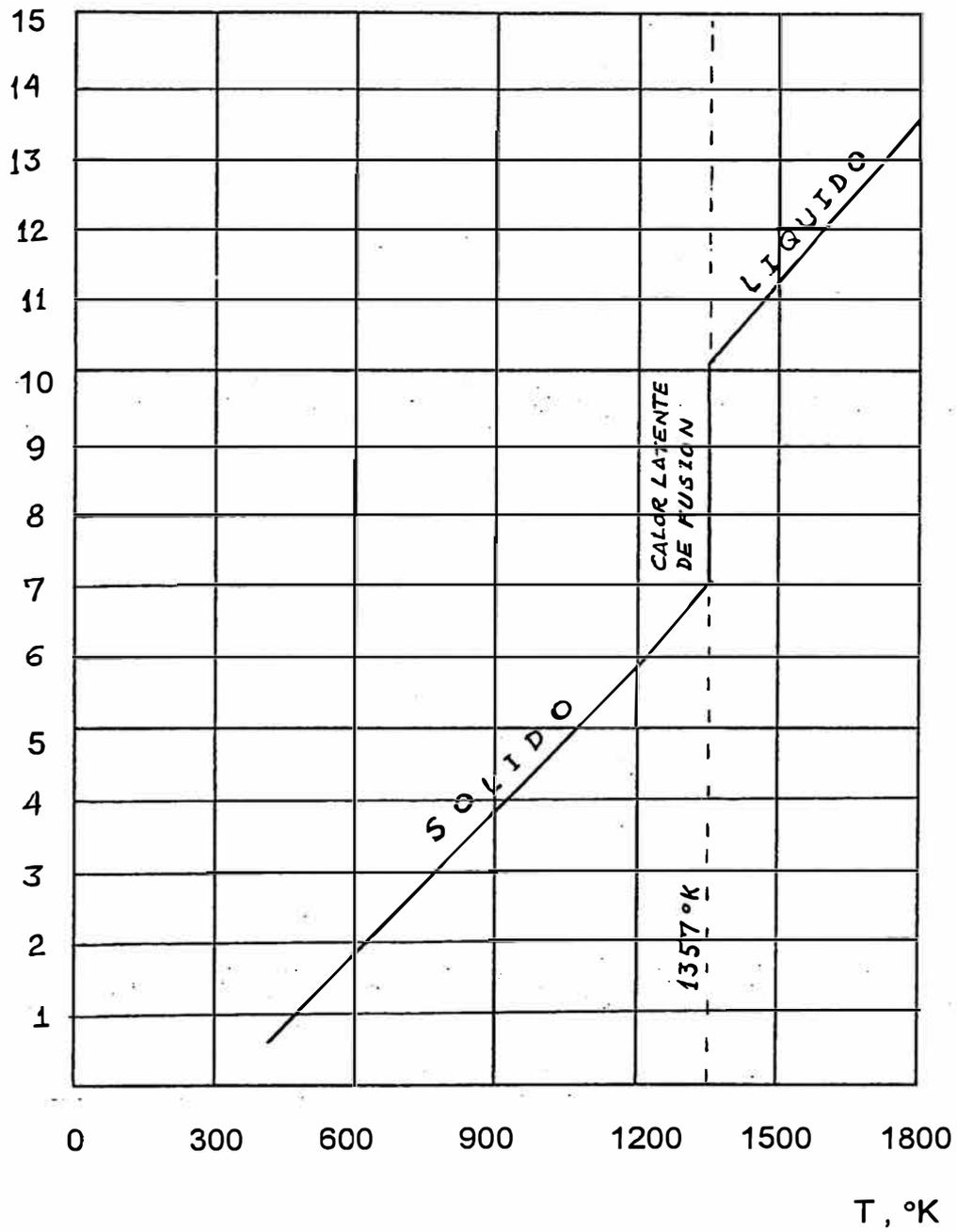
En el rango de 25 a 200 °C la dilatación es de $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; o sea completamente despreciable en su valor con respecto al cobre.

2.3 CONTENIDO CALORICO DEL COBRE

T, °K	H _T - H _{298.15} cal / mol	T, °C	H _T - H ₂₅ cal / mol	H _T - H ₂₅ cal / gr
400	600	25	0	0
500	1,215	200	1,049	16.5
600	1,845	300	1,675	26.4
700	2,480	400	2,308	36.3
800	3,130	500	2,955	46.5
900	3,800	600	3,619	57.0
1000	4,490	700	4,304	67.7
1100	5,190	800	5,001	78.7
1200	5,895	900	5,705	89.8
1300	6,615	1000	6,421	101.0
1357 (c)	7,040	1084 (c)	7,040	110.8
1357 (l)	10,160	1084 (l)	10,160	159.9
1400	10,480	1100	10,279	161.8
1500	11,230	1200	11,028	173.6
1600	11,980	1300	11,777	185.3
1700	12,730	1400	12,528	197.2
1800	13,480	1500	13,278	209.0
1900	14,230	1600	14,028	220.8
2000	14,980	1700	14,777	232.6
2200	16,480	1800	15,528	244.4
2400	17,980	2000	17,028	268.0
2600	19,480	2200	18,528	291.6
2800	20,980	2400	20,028	315.2

Tabla 2.3.- Contenido Calórico del Cobre (c,l)

$H_T - H_{298}$
(Kcal / mol)



CONTENIDO CALORICO (H) DEL COBRE (SOLIDO - LIQUIDO)

2.4.- PROPIEDADES FISICAS DE LAS ALEACIONES DE COBRE.

A continuación se presenta un cuadro donde se muestran las aleaciones más usadas del cobre y sus parámetros más importantes:

COD. ASTM	Aleac.de Cu	ρ (g/cc)	$K_{20^{\circ}\text{C}}$ (W/m ² K)	T ^o C (S-L)	Maquinab. %deC36000
C11000	ETP	8.89	388	1065-1083	20
C18700	99Cu-1Pb	8.94	377	950-1080	85
C21000	95Cu-5Zn	8.86	234	1050-1065	20
C22000	90Cu-10Zn	8.80	189	1020-1045	20
C23000	85Cu-15Zn	8.75	159	990-1025	30
C24000	80Cu-20Zn	8.67	140	965-1000	30
C26000	70Cu-30Zn	8.53	120	915-955	30
C27000	65Cu-35Zn	8.47	116	905-930	30
C28000	60Cu-40Zn	8.39	123	900-905	40
C36000	61.5Cu-35.5Zn-3Pb	8.50	115	885-900	100

COD. ASTM	Aleac.de Cu	ρ (g/cc)	$K_{20^{\circ}\text{C}}$ (W/m $^{\circ}$ K)	T $^{\circ}$ C (S-L)	Maquinab. %deC36000
C37000	60Cu-39Zn-1Pb	8.41	120	885-900	70
C37700	60Cu-38Zn-2Pb	8.44	120	880-895	80
C38500	57Cu-40Zn-3Pb	8.47	123	875-890	90
C40500	95Cu-4Zn-1Pb	8.83	165	1025-1060	20
C50500	98.7Cu-1.3Sn	8.89	208	1035-1075	20
C52100	92Cu-8Sn	8.80	62	880-1020	20
C52400	90Cu-10Sn	8.78	50	845-1000	20
C60600	95Cu-5Al	8.17	79.5	1050-1065	20
C61000	92Cu-8Al	7.78	69	1040	20
C70600	90Cu-10Ni	8.94	40	1100-1150	20
C71000	80Cu-20Ni	8.94	36	1150-1200	20
C71500	70Cu-30Ni	8.94	29	1170-1240	20
C83600	85Cu-5Sn-5Pb-5Zn	8.83	72	855-1010	84
C93200	83Cu-7Sn-7Pb-3Zn	8.93	59	855-975	70

Fuente: Handbook ASM

3. LA COLADA CONTINUA HORIZONTAL.-

Este proceso consiste en hacer pasar el metal fundido a través de una matriz, en el cual ocurre un intercambio de calor a través del molde que tiene una camiseta de refrigeración, obteniéndose la solidificación del metal dentro de la matriz. A su vez esta parte solidificada es extraída gradualmente por una máquina extractora.

La matriz va montada en un Horno de Espera en una posición tal que el nivel del metal líquido este siempre por encima de ella. De esta forma el metal líquido es alimentado a la matriz por efecto de presión metalostática en la medida que se realiza la extracción. Paralelamente la refrigeración en la matriz varía según el ritmo de extracción del tocho en relación directa.

3.1 LA MATRIZ

La matriz consiste en una bocina de grafito que es el molde, la que esta encastrada en una camiseta de refrigeración que es de cobre, llamado enfriador el cual

PLANO 01

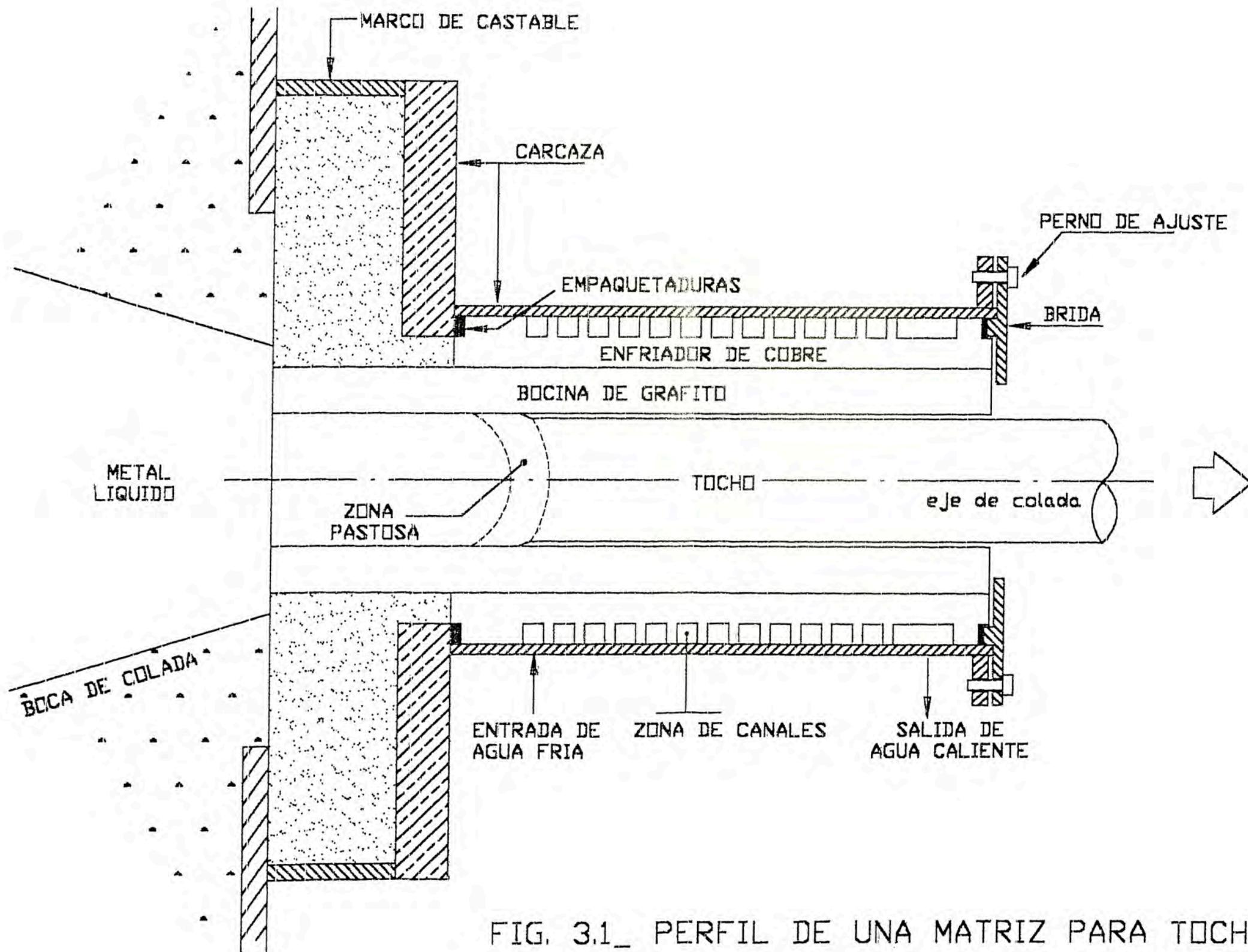


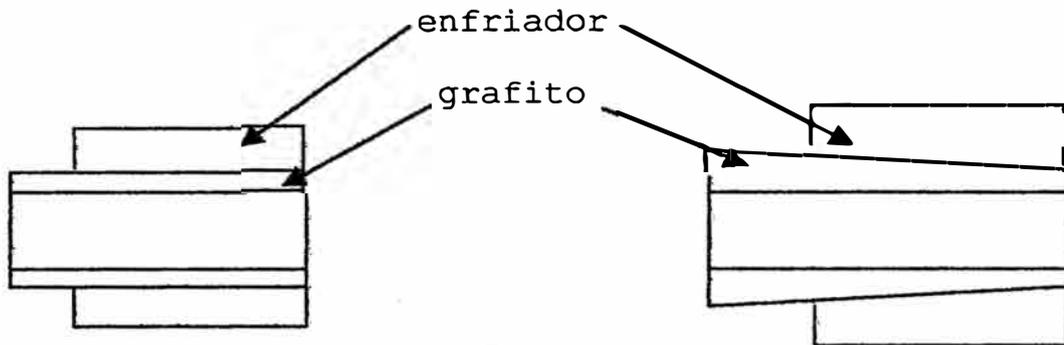
FIG. 3.1_ PERFIL DE UNA MATRIZ PARA TOCHOS

lleva sobre su superficie exterior una zona de canales donde se orienta el recorrido del flujo de agua.

En la parte posterior lleva un marco de refractario el cual sirve para aislar el conjunto enfriador-bocina del Horno protegiendo así las empaquetaduras que sellan la cámara de agua de la matriz y también sirve para que no llegue demasiada temperatura a la parte inicial del enfriador de cobre. Este marco de refractario sirve a su vez para tapar la boca de colada del Horno en su ensamble con la matriz. ver fig. 3.1)

La determinación de los materiales para fabricar la matriz se ha hecho en base a los gráficos presentados en el capítulo 2 donde se observa que el material de mayor conductividad térmica es el cobre, por lo que se ha elegido este para fabricar la chaqueta, llamado enfriador, de tal modo que a través de este material se puede obtener la mayor extracción de calor posible. Pero este no puede ir directamente en contacto con el material líquido a moldear como el caso de la Colada Continua Vertical ya que la matriz una vez montada al Horno tiene una parte en contacto permanente con el baño metálico, por lo que lleva una bocina de grafito que sirve de molde. Este último material tiene resistencia a alta temperatura hasta aproximadamente 3,000 °C como se puede observar en los gráficos del capítulo anterior.

En cuanto a las formas del perfil de la matriz, estas pueden ser de ensamble paralelos o cónicos. A criterio de quien suscribe, las de ensamble paralelo son mas prácticas en su fabricación y rendimiento del grafito. Se muestra en los siguientes gráficos.



Matriz de ensamble
paralelo

Matriz de ensamble
cónico

3.2 PREPARACION Y ARMADO DE UNA MATRIZ

Normalmente para la preparación de la matriz se requieren de un rectificado del diámetro interior del enfriador de cobre y de la fabricación de la bocina de grafito.

El paralelismo en esta fabricación debe ser un trabajo hecho con mucha minuciosidad, puesto que de este ensamble depende del éxito de la matriz en cuanto a eficiencia de transmisión de calor y duración de la misma.

El procedimiento a seguir después de la fabricación de las partes que constituyen la matriz es como se describe a continuación:

3.2.1. Pulido de la bocina de grafito

La bocina de grafito debe ser pulida a espejo tanto en la superficie exterior como interior.

Esto se obtiene utilizando solamente lija nº 600 y luego un paño de franela, ambos sin agua.

No es recomendable empezar con lijas de mayor grano porque pueden desgastar el diámetro dado a la bocina ya que el material de grafito tiene poca resistencia al rayado.

Tampoco es recomendable hacer el pulido final con pastas abrasivas porque el agua que se usa puede penetrar en las microporosidades del grafito produciendo efectos perjudiciales para su duración en servicio, debido a que las moléculas de agua oxidan al carbono del grafito.

La superficie exterior se debe pulir para que tenga un óptimo contacto con el enfriador y así obtener una mejor eficiencia de transmisión de calor.



Contacto entre una
superficie torneada
y otra pulida.

Contacto entre
superficies pulidas.

La superficie interior se debe pulir para minimizar el arrastre del metal que fluye por la misma y obtener un

mejor acabado de la superficie del tocho. Además, debido a que las rayas dejados por el torno en el grafito están en un plano perpendicular al avance del tocho, éstas sirven de trampa para acumular óxidos y así aumentar la formación de escamas, las que disminuyen el tiempo de vida de la matriz por ensuciamiento.

3.2.2. Limpieza y pulido del enfriador de cobre.

El enfriador de cobre requiere una adecuada preparación, orientada a obtener su mayor eficiencia en transmisión de calor.

Su superficie exterior, que viene a ser la zona de canales de refrigeración, debe ser limpiado de las formaciones de carbonatos (caliche) que se impregnan en las espiras. En caso de haberse usado agua dura (300 - 500 ppm de carbonatos), éstas llegan a formarse en espesores de aproximadamente 1mm, resultando una película aislante.

Se puede hacer ésta limpieza por medios mecánicos, como por ejemplo usando escobilla de metal y luego lijas N° 400 y 600. La alternativa a lo anterior es hacerlo por medios químicos usando solución de ácido acético, en cualquier caso se debe asegurar una limpieza total, lo que

debe ser verificado con inspección a la vista. Esto es uno de los motivos por lo que se usa matrices desarmables y no las de tipo sellados.

Su superficie interior se debe pulir para tener eficiente contacto con el grafito. Desde su fabricación o rectificado en el torno se debe indicar para esta superficie un acabado fino ($\nabla\nabla\nabla$) y luego obtener un pulido a espejo, usando lijas N° 400, 600 y pastas de pulir.

3.2.3. Encastre del conjunto enfriador - bocina

Consiste en dilatar el enfriador de cobre para ponerle la bocina de grafito. La temperatura de encastre es normalmente 200°C, de esta manera el enfriador alcanza una dilatación que sobrepasa la interferencia de diámetros con que están fabricados ambas piezas.

Esta operación se realiza en un pequeño horno de calentamiento, o con la ayuda de un calentador portátil, en este último caso debe tenerse cuidado de que el calentamiento sea homogéneo y se debe controlar su temperatura con un termómetro de superficie.

No debe usarse más temperatura de la necesaria para evitar que se forme una película de óxido sobre el enfriador, lo cual resultaría una película aislante.

Una vez realizado el encastre se deja enfriar al aire libre. No se debe acelerar el enfriamiento con corriente de aire debido a que el grafito es frágil al choque térmico.

3.2.4 Armado de la matriz.

Las partes que componen la matriz se arman como indica el gráfico 3.1 ; consiste en la puesta del enfriador en su carcasa donde se incluye una empaquetadura antes y después del mismo.

La superficie interior de la carcasa de fierro debe permanecer pintado debido a que va en contacto permanente con el agua de refrigeración. Se debe usar pintura anticorrosiva.

Las empaquetaduras deben ser resistentes a una temperatura de mayor o igual a 150°C y deben tener una consistencia tal que no cedan con la presión del trabajo, para evitar fugas de agua cuando este en funcionamiento.

Después de armado la matriz, se debe probar la cámara de refrigeración con presión de agua (50 psi). Esta condición determina el torque necesario con que se deben ajustar los pernos de la matriz que presionan las empaquetaduras.

3.2.5 Llenado de refractario.

La matriz se pone en posición vertical con el marco de la base hacia arriba. Se llena el refractario y se deja fraguar y sintetizar en esa misma posición para asegurar un buen moldeo alrededor de la bocina de grafito.

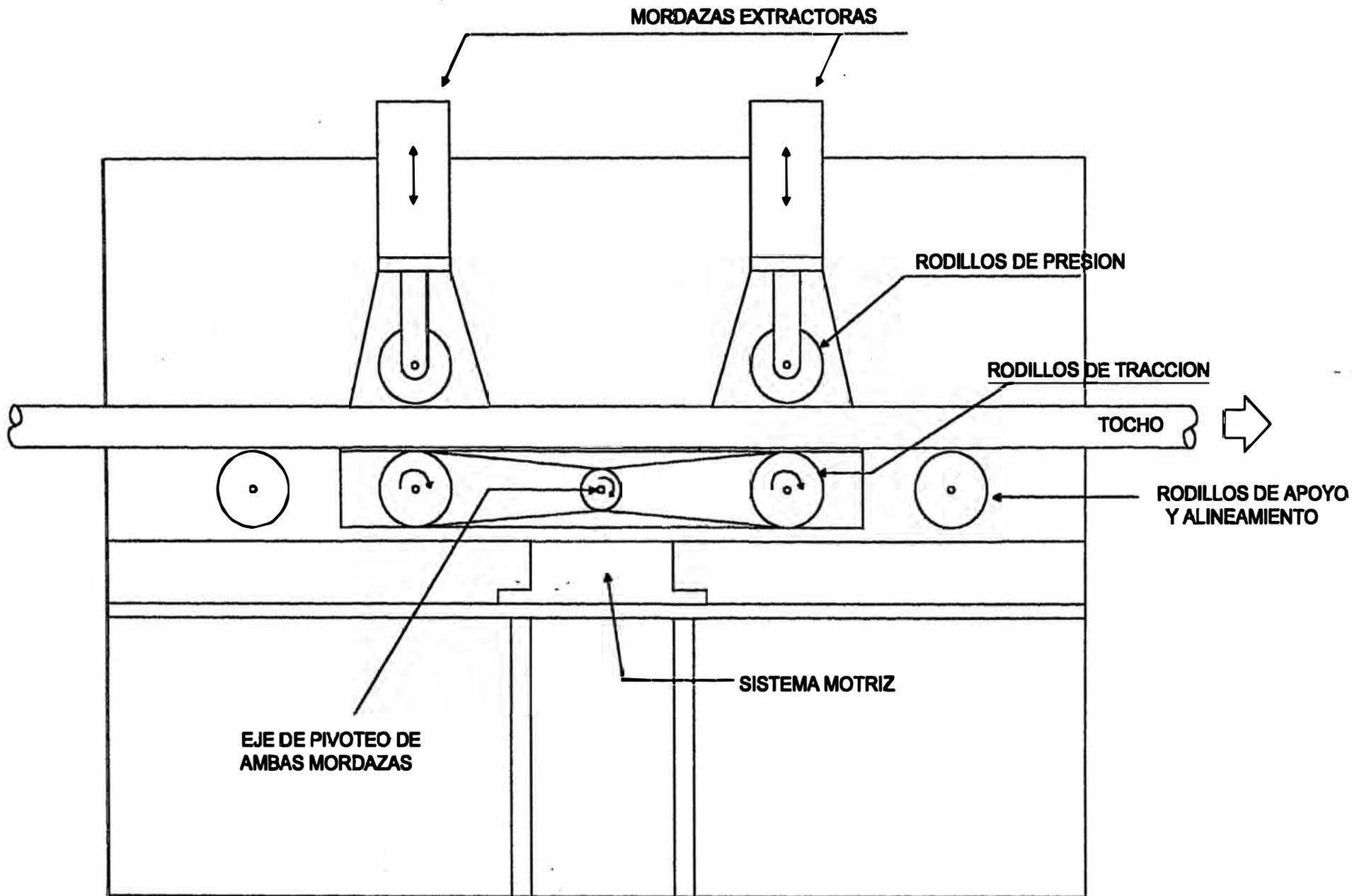
En la puesta de la matriz al horno, para sellar la juntura entre ambos se usa una manta de fibra cerámica de $\frac{1}{2}$ " a 1" de espesor la cual se comprime hasta aproximadamente 3 a 6 mm.

3.3 LA MAQUINA EXTRACTORA

Viene a ser el sistema mecánico y eléctrico con el que se da fuerza al tocho para su extracción a través de la matriz.

Toda máquina de extracción debe tener:

1. Regulador de longitud de extracción (0 - 25 mm)
2. Regulador de tiempo de espera del ciclo de extracción
(0.0 - 50.0 s)
3. Regulador de velocidad de avance.
4. Regulador de presión de mordazas (0 - 600 psi).



**FIG. 3.3_ ESQUEMA DE UNA MAQUINA EXTRACTORA DE RODILLOS
CON SISTEMA DE MORDAZAS FLOTANTES**

Además esta máquina debe tener un sistema de corte de tal forma que permita hacer esta operación sin necesidad de detener el proceso de extracción. Normalmente son sierras montadas sobre ejes y son desplazadas por el mismo avance del tocho.

Las máquinas extractoras pueden ser de sistemas motrices hidráulicos o mecánicos.

3.4- LÍNEA DE AGUA DE REFRIGERACIÓN.-

Consiste en una poza de almacenamiento de agua fría y otra para retorno de agua caliente, una torre de enfriamiento, sistema de bombas y tuberías para hacer llegar agua a la matriz al menos con una presión de 3 Kg/cm²

En la instalación hacia la matriz se debe tener en cuenta lo siguiente:

Tener termómetros para el control de temperatura del agua, uno en la entrada principal y uno en cada retorno (con graduación de 0 - 100 °C).

Las mangueras deben tener conexión fácil de instalar hacia la matriz.

Cada línea de entrada a la matriz debe tener un regulador de flujo de agua (de 0 - 10 GPM).

Se debe tener un manómetro en la línea de alimentación de agua.

En la Torre de Enfriamiento, se hace caer el agua caliente en una cuba desde la parte de arriba en forma de lluvia, efecto que se consigue con uso de pequeñas toberas en serie, y desde la parte de abajo hacia arriba, osea en contracorriente con la caída de la lluvia de agua, se sopla aire producido por uno o varios ventiladores.

3.5- PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO

Una vez preparada la matriz se procede a colocar el extractor (se detalla ensamble en el gráfico 3.5) y este conjunto se procede a colocar al horno el cual queda sujetado con pernos. También se procede a colocar las respectivas mangueras de refrigeración y se le deja con un flujo mínimo de agua mientras se espera el inicio de producción.

Luego se procede a alinear la matriz con respecto a la línea de extracción de la Máquina, para lo cual se mueve la matriz con todo el horno, teniendo este último un conjunto de pernos en su base para este fin.

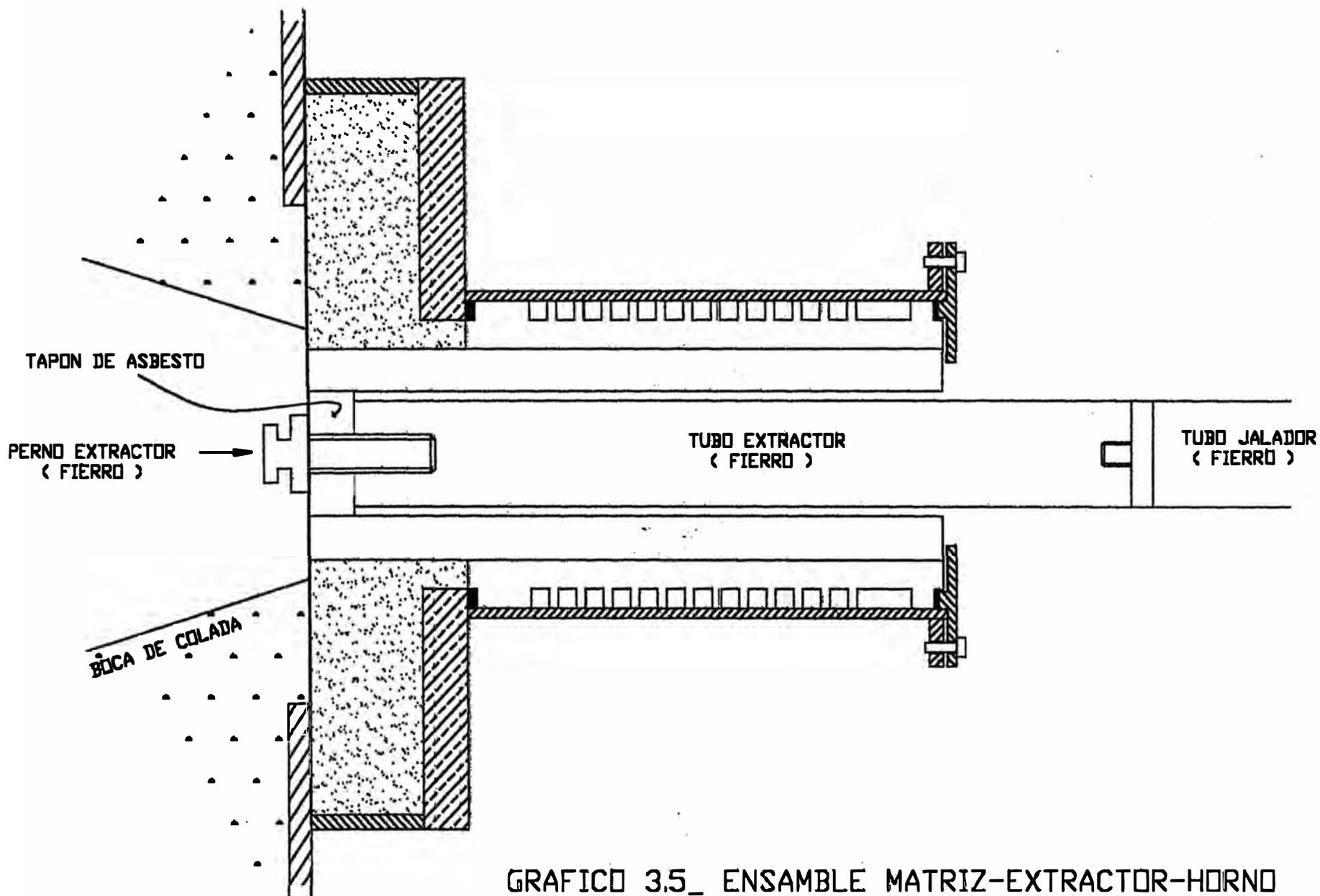


GRAFICO 3.5_ ENSAMBLE MATRIZ-EXTRACTOR-HORNO

La Máquina Extractora se debe probar en vacío con un tubo de fierro llamado "tubo jalador" de diámetro relativamente aproximado al diámetro del tocho a extraer. Antes del inicio de extracción la Máquina debe quedar regulada con los parámetros para el arranque como son una longitud de jalada de 4 a 6 mm y un tiempo de espera de 8 a 12 seg. según el diámetro del tocho. A su vez el tubo jalador debe quedar soldado o empernado al "extractor".

El extractor debe tener una traba para asegurarse de que no sea empujado hacia afuera por la presión metalostática del nivel del horno.

Una vez verificado lo siguiente:

La matriz empernada y sellada con el horno.

Las mangueras con flujo mínimo de agua.

Las pozas de agua con su nivel normal de trabajo.

Probado y regulado la Máquina extractora.

Probado las duchas de enfriamiento secundario.

Probado y regulado de la sierra de corte para el diámetro y aleación que se producirá.

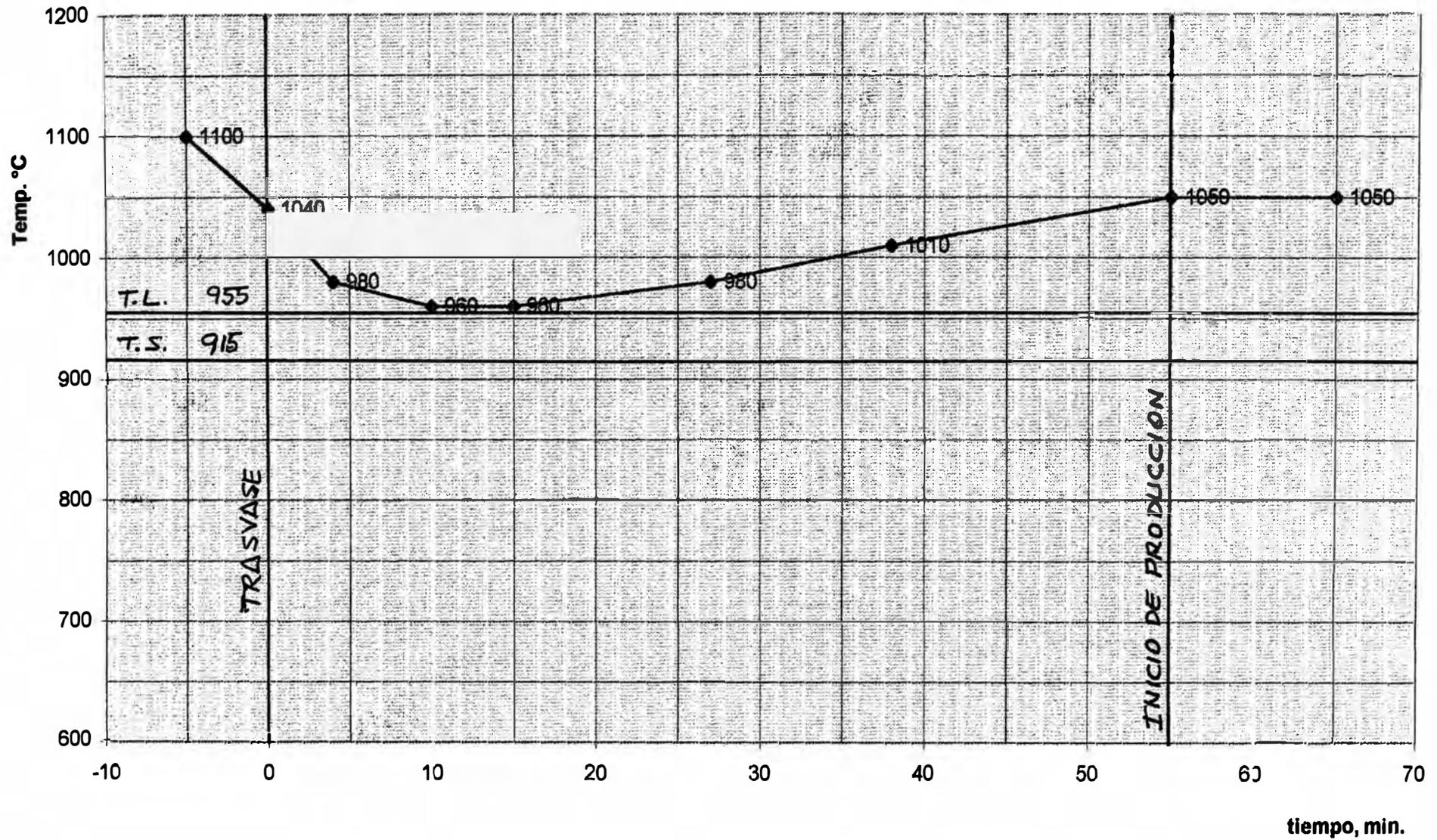
Temperaturas óptimas en los hornos y verificado su composición química.

Entonces se procede a realizar el trasvase del horno de fundición al horno de espera a través de una canaleta hasta que el nivel del metal líquido quede de 10 a 20 cm por encima de la matriz.

Después de esto se debe esperar aproximadamente 1 hora para el inicio de extracción que es el tiempo que requiere el refractario del vientre de horno y el refractario de la matriz para alcanzar su temperatura de trabajo y no hacer bajar la temperatura del metal líquido que se moldea. En el gráfico 3.5 se muestra una curva de caída y recuperación de temperatura de la aleación 70/30 que se trasvasa a 1,100 °C y después de 55 minutos se recupera a 1,050 °C que es la temperatura óptima para el inicio de producción.

Dada estas condiciones, se procede al inicio de extracción; el tiempo de arranque, es decir el tiempo que demora el tocho en recorrer el molde de grafito y aparecer por la brida de la matriz, a criterio de quien suscribe, debe ser como se muestra a continuación:

Diámetro del tocho	Tiempo de arranque	
	Latones	Cobre
2"	5 min.	6 min.
3"	7	9
4"	10	12
5"	12	15
6"	15	18
7"	18	22
8"	20	25



**Curva de temperatura en el horno de espera después del trasvase
aleación : latón 70/30**

Gráfico 3.5

La línea de refrigeración a través de la matriz viene a ser el **enfriamiento primario**.

La temperatura del agua de salida debe ser de 50 a 60 °C, nunca debe llegar a 80 °C y se dejar así, se debe detener la extracción hasta que baje a 60 °C al menos y luego se puede reiniciar.

Una vez que aparece el tocho por la brida se puede ir aumentando la velocidad gradualmente observando que la temperatura con que sale el tocho este en el rango de 400 - 700 °C máximo, según la aleación.

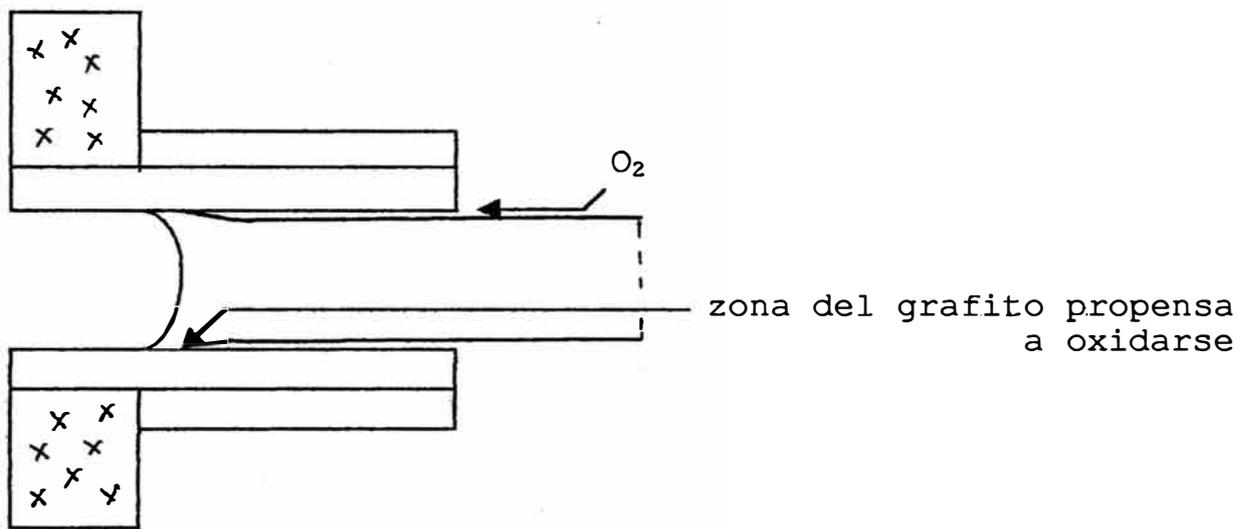
A 1 metro de la salida del tocho por la matriz, se encuentran las duchas de **enfriamiento secundario**, los cuales se deben abrir al paso del tocho.

3.6- EL PROCESO DE COLADA CONTINUA

El tiempo de trabajo de una matriz depende principalmente de la duración de la vida de la bocina de grafito.

Esta duración es limitada por la formación de escamas de escoria con metal (especialmente en latones) que se impregnan en la superficie interior en la zona de solidificación donde el metal es pastoso y tiene su mayor viscosidad, en consecuencia mayor arrastre.

Esta formación de escamas se origina con la aparición de pequeños poros en la superficie de contacto con el metal líquido debido a la combustión del grafito con el oxígeno que ingresa por la salida de la matriz a través del espacio que deja la contracción del tocho al solidificar.

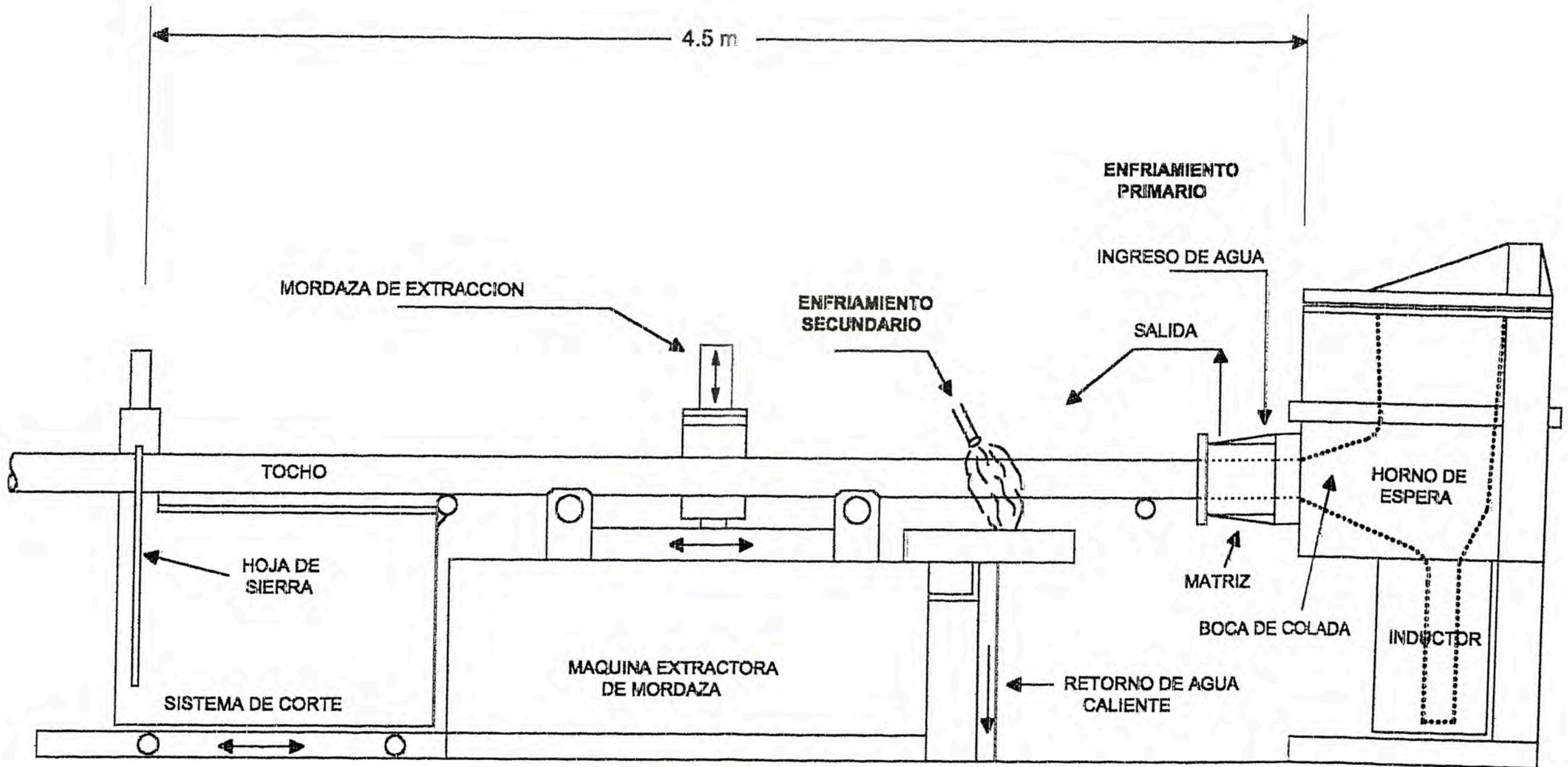


Al combustionar el grafito, queda un pequeño orificio en su superficie donde solidifica una partícula de metal parcialmente oxidada por la presencia de este mismo oxígeno.

Esta partícula crece debido a que en ese punto se tiene mayor enfriamiento por ser el metal mayor conductor térmico que el grafito, formándose así una escama.

Generalmente en la aleación Cu-Zn-Pb, la escama es de mayor contenido en Pb y Zn que la aleación con que se trabaja y

PLANO 02



LA COLADA CONTINUA HORIZONTAL CON MAQUINA EXTRACTORA DE MORDAZAS

es debido a la diferencia de puntos de fusión, siendo el plomo el primero en segregarse. Son segregaciones de la piel del tocho.

También se ha observado en estas mismas aleaciones, que una extracción lenta (menos del 50 % de la velocidad correspondiente) tiende a ensuciar más rápido al grafito y es debido a que esta extracción lenta da mayor tiempo a la aleación que esta pastosa a dejar segregarse a sus componentes de menor punto de fusión.

Por eso, para optimizar el tiempo de vida del grafito se debe pulir a espejo su superficie interior en el momento de su preparación, para así reducir al mínimo la fricción del avance del tocho.

La duración de la matriz depende de la duración de su molde de grafito en servicio y no de la longitud extraída acumulada, entonces la productividad de la matriz será mayor en la medida que se pueda aumentar la velocidad de extracción, la que está limitada por dos factores: la capacidad de fusión de los hornos y la capacidad de refrigeración de la matriz, la primera se puede solucionar usando hornos de mayor potencia o aumentando la cantidad de ellos, mientras que en el segundo caso se aumenta la

capacidad de refrigeración solamente optimizando el diseño de la matriz.

En cuanto al régimen de extracción, este siempre se empieza con la mayor velocidad posible y luego con el uso y en la medida que la superficie del tocho se vuelve áspero o con apariciones de pequeñas grietas se va disminuyendo la velocidad solo lo necesario para corregir los defectos mencionados.

Esto significa que el grafito se va ensuciando con escorias en el anillo de solidificación y en la medida de que se baja la velocidad se va retrocediendo la ubicación de dicho anillo, ya que la zona previa a la solidificación donde aún el metal esta líquido el grafito se mantiene intacto.

El tiempo de vida de una matriz, según especificaciones de los fabricantes de grafito (en este caso RINGS DORFF) es como se indica:

METAL	DURACION (orientativa)
	en HORAS
Cobre	72 - 120
Latón	48 - 120
Bronce	72 - 120
Cobre - Níquel	8 - 20

En la práctica se ha tenido producción de latón 70/30 con una duración de hasta 7 días (168 hrs) y una duración promedio de 5 días (120 hrs). Mientras que en aleaciones de cobre al fósforo se ha tenido duración de hasta 20 días.

La finalización de una matriz se define cuando a pesar de haber bajado la velocidad hasta un 50 % de la óptima (según el sgte. cuadro), persisten apariciones de algunos defectos o tiende a quedarse la extracción por un agarre del tocho dentro de la matriz ya que el ensuciamiento por las escorias disminuyen progresivamente el diámetro interior del grafito en el anillo de solidificación.

En otras ocasiones el grafito se erosiona en la zona líquida dejando un hueco y si el frente de solidificación retrocede hasta ese punto, el tocho se queda trancado y solamente sale desarmando la matriz.

Durante la extracción también se observan pequeñas fugas de agua por la brida de la matriz los cuales son originados por las ocasionales paradas de extracción los que generan cedencia de las empaquetaduras, para corregir esto se debe ajustar los pernos de la brida correspondiente.

Kg/mt	DIAMETRO mm	VELOCIDAD cm/min	LINEAS POR MATRIZ	PRODUCC. Tm/dia
16.7	50	18	3	12
37.5	75	12	2	12
66.8	100	13	1	12
104.3	125	8	1	12
150.2	150	6	1	12
204.5	175	4	1	12
267.0	200	3,5	1	12

Velocidades de producción correspondientes según el diámetro del tocho para una producción de 12 Tm/día.

Latón 70/30 (densidad = 8.5 gr/cc).

4.- COMPORTAMIENTO TERMICO DE LA MATRIZ

En esta parte se hará una evaluación de los calores ganados por el flujo de agua de refrigeración y los perdidos por la aleación que solidifica al pasar por la matriz, asimismo se evaluará el calor "q" por unidad de tiempo que pasa a través de las paredes del enfriador.

4.1- BALANCE TERMICO EN LA MATRIZ

Este cálculo se hará teniendo en cuenta el concepto de flujo de **calor y masa**, los cuales se evalúan en función del tiempo y en este caso ambos factores son constantes ya que la colada continua es un sistema en equilibrio para cada conjunto de parámetros de operación. Se tomará 1 minuto como unidad de control de tiempo para los cálculos mencionados, ya que el flujo de agua está medido en lpm (litros por minuto) y la extracción del tocho es en cm/min. Los componentes del intercambio de calor se pueden agrupar en dos partes como sigue:

I - ENFRIAMIENTO PRIMARIO

Aquí se hace un balance térmico desde que el metal ingresa a la matriz hasta el momento en que sale por la brida hacia el exterior.

CALORES GANADOS

$q(a)$ = flujo calórico extraído por el agua de la matriz.-
medido por el control de flujo y temperatura en los
instrumentos respectivos ubicados en la línea de agua de la
matriz

$$q(a) = m(\text{agua}) \cdot C_e \quad (t_s - t_i) \quad \text{-----} \quad 4.1.1$$

donde:

$$q(a) = \text{Kcal/min}$$

$m(\text{agua})$ = flujo másico de agua que circula por la matriz, Kg/min

$C_e = 1 \text{ Kcal/Kg-}^\circ\text{C}$ (calor específico del agua)

$t_s = \text{temp. de salida del agua, } ^\circ\text{C}$

$t_i = \text{temp. de ingreso del agua, } ^\circ\text{C}$

CALORES PERDIDOS

$q(b)$ = el calor extraído del **metal** desde que esta líquido
en el horno a una temperatura T_h (medido con pirómetro de
inmersión) hasta que sale por la brida de la matriz al
exterior a una temperatura T_e (medido con pirómetro óptico
sobre la superficie del tocho en el momento que sale de la
matriz).

$$q(b) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{\Delta H(\text{metal})} \right\} \begin{array}{l} T_h \\ T_e \end{array} \quad \text{-----} \quad 4.1.2$$

donde:

$q(b)$ = flujo calórico que se extrae al metal desde T_h
hasta T_e , Kcal/min

$m(\text{metal}) =$ flujo del metal que pasa por la matriz, Kg/min.

$T_h =$ Temperatura del baño del horno, °C

$T_e =$ Temp. de salida del tocho por la matriz, °C

$q(c) =$ El efecto de aporte de **calor del horno hacia la matriz**, ya que siempre existe transferencia de calor desde la zona mas caliente hacia la zona mas fría. Este calor se calcula por diferencia.

Luego:

calores ganados = calores perdidos

$$q(a) = q(b) + q(c) \text{ -----} 4.1.3$$

II- ENFRIAMIENTO SECUNDARIO

Aquí el balance se hace desde que el tocho sale por la matriz hasta que se enfría a temperatura ambiente.

CALORES GANADOS

$q(d) =$ Flujo calórico que se extrae a través del **agua de las duchas** que van directo al tocho.- medido por el flujo de la descarga del agua de la fuente de recolección y su temperatura promedio.

$$q(d) = m(d) \cdot C_e \cdot (t_d - t_i) \text{ -----} 4.1.4$$

donde:

$$q(d) = \text{Kcal/min}$$

$m(d)$ = flujo de masa de agua medido a la salida de las duchas, Kg/min

t_d = temp. del agua a la salida de las duchas

$q(e)$ = calor que se disipa en la **evaporación del agua** de las duchas antes mencionadas este caudal que se evapora se debería medir por diferencia entre el flujo que ingresa y el que sale, pero en la práctica ambas mediciones son casi iguales, por lo que se calculará por diferencia en el balance junto con $q(f)$.

$q(f)$ = calentamiento del **aire del medio ambiente** que ocurre sobre el tocho después de la salida por la matriz y antes de entrar al enfriamiento secundario. Este valor se encuentra también por diferencia.

CALORES PERDIDOS

$q(g)$ = el flujo de calor extraído al **tocho** después de que sale por la matriz a T_e hasta que termina de enfriar a 25°C , tal como queda al pasar por las duchas.

$$q(g) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{\Delta H(\text{metal})} \right]_{25^\circ\text{C}}^{T_e} \quad \text{-----} \quad 4.1.5$$

$$q(g) = \text{Kcal/min}$$

Luego:

Calores ganados = Calores perdidos

$$q(d) + q(e) + q(f) = q(g) \text{ -----4.1.6}$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Aquí citaremos la producción de tochos de cobre al fósforo (P=300ppm, Cu=99.9%) en un diámetro de 180 mm.

Los valores de los parámetros tomados en el proceso fueron los siguientes:

Velocidad de extracción (v) = 4.8 cm/min

Agua en la matriz: $\left[\begin{array}{l} \text{flujo} = 54 \text{ lpm} \Rightarrow m(\text{agua}) = 54 \text{ Kg/min} \\ t_i = 22^\circ\text{C} \text{ (temp. ingreso)} \\ t_s = 45^\circ\text{C} \text{ (temp. salida)} \end{array} \right.$

Temperatura del baño del horno, Th = 1,200 °C

Temp. de salida del tocho por la matriz, Te = 700 °C

Agua en la ducha: $\left[\begin{array}{l} \text{flujo} = 40 \text{ lpm} \Rightarrow m(d) = 40 \text{ Kg/min} \\ t_i = 22^\circ\text{C} \\ t_d = 40^\circ\text{C} \end{array} \right.$
(enfriam. Secund.)

Evaluación de transferencia de calor en 1 minuto:

I- ENFRIAMIENTO PRIMARIO

(a) Reemplazando los datos en la ec. 4.1.1

$$q(a) = m(\text{agua}) \cdot C_e \cdot (t_s - t_i)$$

$$q(a) = 54 \text{ Kg/min} \cdot (1 \text{ Kcal/Kg-}^\circ\text{C}) \cdot (45 - 22)^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \mathbf{q(a) = 1,242 \text{ Kcal/min}}$$

(b) Para el cálculo de q(b) obtendremos previamente el flujo de metal que pasa por la matriz:

$$m(\text{metal}) = m(\text{cobre extraído en 1 min})$$

$$= \text{sección} \cdot \text{velocidad} \cdot \text{densidad}$$

$$= (\pi(18)^2/4) \text{ cm}^2 \times 4.8 \text{ cm/min} \times 8.94 \text{ g/cm}^3 \times 1 \text{ Kg/1000g}$$

$$\mathbf{m(\text{metal}) = 10.92 \text{ Kg/min}}$$

luego lo reemplazamos en la ecuac. 4.1.2

$$q(b) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \begin{array}{l} \text{Th} \\ \text{Te} \end{array} \right\}$$

$$q(b) = 10.92 \text{ Kg/min} \cdot \Delta H(\text{cobre}) \left. \begin{array}{l} 1200^\circ\text{C} \\ 700^\circ\text{C} \end{array} \right\}$$

Para el cálculo de ΔH del cobre al fósforo se le considerará similar al ΔH del cobre 99.99%, despreciándose el contenido de 0.03% de P.

De la tabla 2.3 del capítulo 2, se tiene:

$$q(b) = 10.92 \text{ Kg/min} \times (173.6 - 67.7) \text{ Kcal/Kg}$$

$$q(b) = 1,156 \text{ Kcal/min}$$

(c) De la ecuación 4.1.3 se tiene:

$$q(a) = q(b) + q(c)$$

donde $q(c) = (1,242 - 1,156) \text{ Kcal/min}$

$$q(c) = 86 \text{ Kcal/min}$$

II- ENFRIAMIENTO SECUNDARIO

(d) Reemplazando datos en la ecuación 4.1.4

$$q(d) = m(d) \cdot C_e \cdot (t_d - t_i)$$

$$q(d) = 40 \text{ Kg/min} \cdot 1 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (40 - 22) ^\circ\text{C}$$

$$q(d) = 720 \text{ Kcal/min}$$

(g) De la ecuación 4.1.5 se tiene:

$$q(g) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{\Delta H(\text{metal})} \right]_{25^\circ\text{C}}^{T_e}$$

De la tabla 2.3 del capítulo 2, se tiene:

$$q(g) = 10.92 \text{ Kg/min} \times 67.7 \text{ Kcal/Kg} \quad \Rightarrow \quad q(g) = 739 \text{ Kcal/min}$$

(e) y (f) se obtienen por diferencia en la ecuación 4.1.6:

$$q(e) + q(f) = q(g) - q(d)$$

$$q(e) + q(f) = 739 - 720 \text{ Kcal/min}$$

$$q(e) + q(f) = 19 \text{ Kcal/min}$$

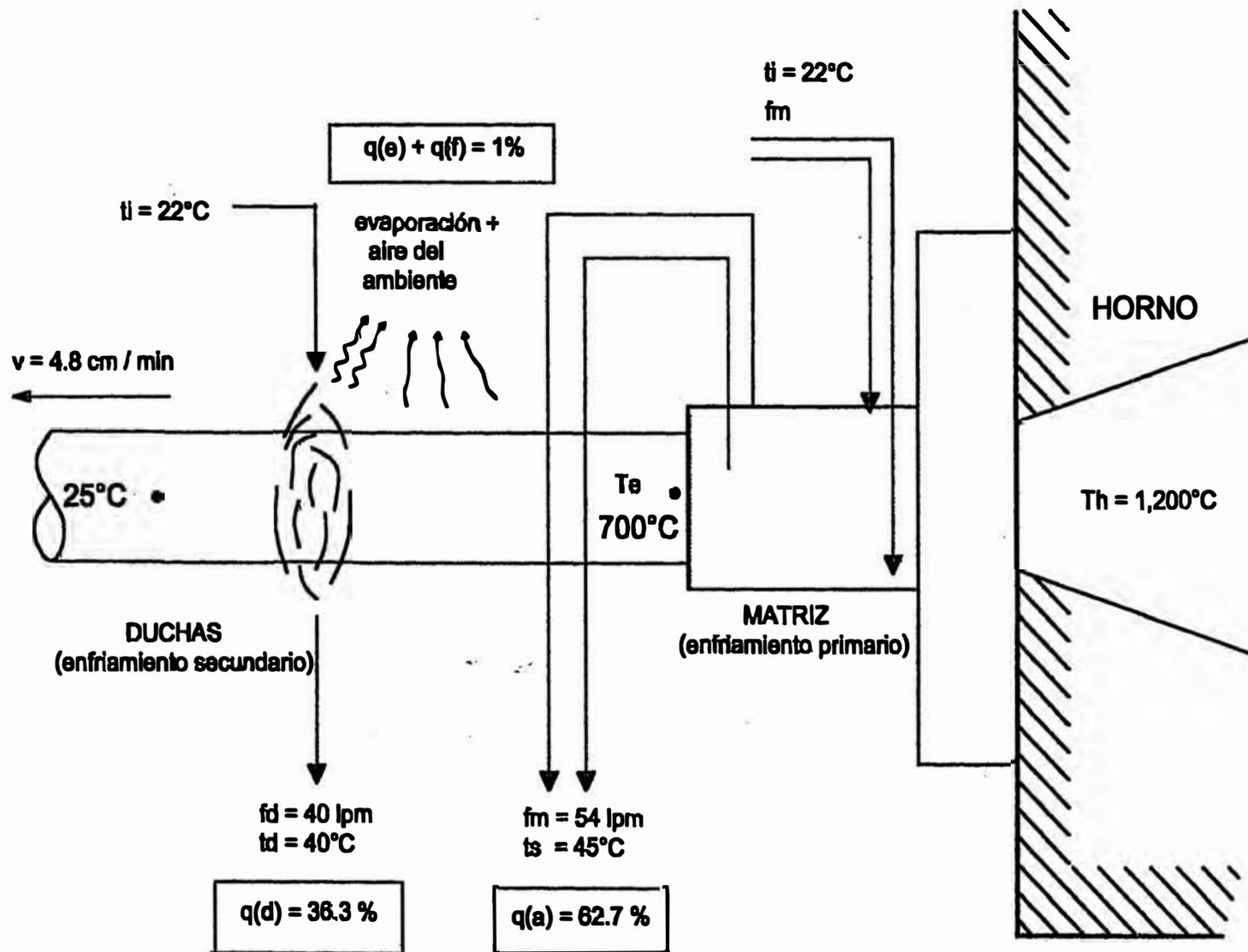
Los resultados anteriores se resumen en el siguiente cuadro:

ENFRIAMIENTO	CALORES GANADOS		CALORES PERDIDOS	
	Kcal/min	%	Kcal/min	%
PRIMARIO	q(a) = 1,242	62.7	q(b)= 1156	58.4
			q(c)= 86	4.3
SECUNDARIO	q(d)=720	36.3	q(g)=739	37.3
	q(e)+q(f)=19	1.0		
TOTAL	1981	100%	1981	100%

De donde se puede observar las siguientes proporciones:

- El agua de la matriz extrae el 62.7 % del calor total.
- El agua de las duchas extrae el 36.3 % del calor total.
- La evaporación del agua de las duchas mas el enfriamiento del aire del medio ambiente extraen el 1 %.
- El aporte del calor del horno hacia la matriz representa un 4.3 % de calor total a extraer.

Los resultados anteriores corresponden a un determinado ejemplo, pero se puede agregar que en general, el enfriamiento primario extrae entre 55 y 75 % de calor y el enfriamiento secundario entre 25 y 45% dependiendo de la velocidad de extracción.



DISTRIBUCION DE CALORES EXTRAIDOS EN UN EJEMPLO CITADO DE PRODUCCION DE TOCHOS DE COBRE 99.9%, DIAMETRO 180 MM

4.2- METODO PARA DETERMINAR EL FLUJO DE AGUA OPTIMO DE UNA MATRIZ

Para este caso se hará variar el flujo de agua en la matriz y evaluar las calorías extraídas, usando la siguiente formula:

$$q(a) = m(\text{agua}) \cdot C_e \cdot (t_s - t_i)$$

En este caso a un mayor caudal el valor $q(a)$ irá aumentando, pero no va a ser en relación directa ya que el valor de Δt empezará a bajar debido al efecto turbulencia cuando el caudal sobrepasa del parámetro óptimo.

A continuación se presenta como ejemplo un cuadro y su respectivo gráfico (4.2) donde se observa el comportamiento del factor $q(a)$. Para este ensayo se hizo constante el factor T_e (temp. de salida del tocho por la matriz), lo que se consiguió variando la velocidad de extracción de modo que en la matriz se mantuvieran constantes T_h y T_e , de esta forma los distintos flujos probados tuvieron las mismas condiciones.

FLUJO lpm	TEMPERATURAS °C			q(a)
	ti	ts	Δt	Kcal/min
23	23	60	37	851
30	23	58	35	1050
32	23	55	32	1088
38	23	54	31	1178
45	23	50	27	1215
50	23	47	24	1200
52	23	46	23	1196
59	23	43	20	1180

Aleación: Latón 61-3-36 (C36000)

Diámetro = 150 mm

Th = 960 °C

Te = 580 °C

De lo anterior y de la observación del gráfico 4.2, se concluye que el flujo óptimo en la matriz es de 45 lpm, para las condiciones indicadas.

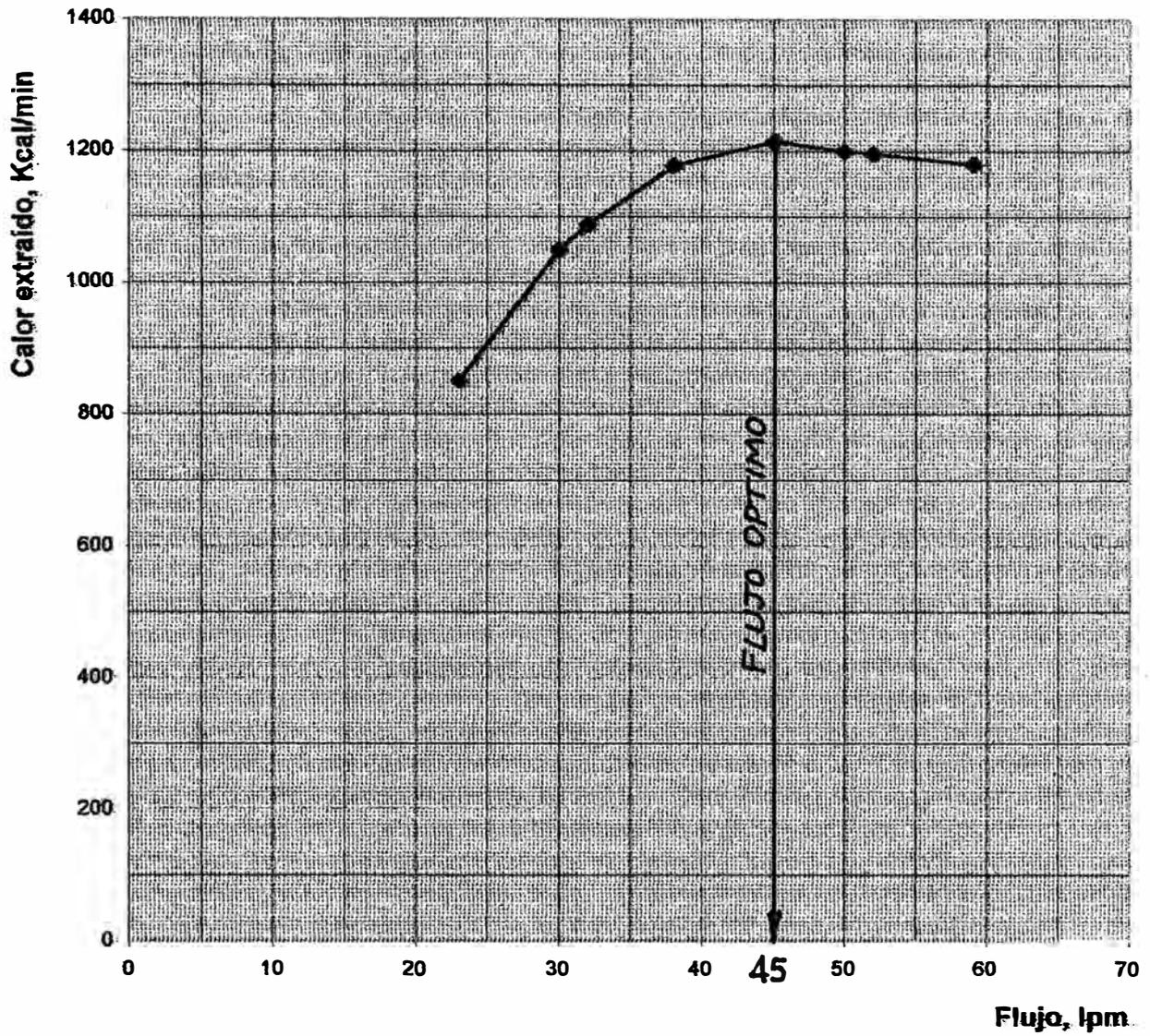


Gráfico 4.2.- Flujo de agua óptimo de un matriz

4.3 SUPOSICIONES PARA EL CALCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR. -

Con la finalidad de simplificar el cálculo de la transferencia de calor en la matriz, haremos las siguientes suposiciones:

- a) La conductividad térmica del cobre y del grafito son constantes en el rango de temperaturas en que trabajan y se pueden asumir igual al valor que corresponde al promedio de las temperaturas en ese rango.

Del gráfico de conductividades térmicas, (acápite 2.2) se tienen:

$$k(\text{cobre}) = 379 \text{ W/m.K } (100 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$k(\text{grafito EK 412}) = 50 \text{ W/m.K } (600 \text{ }^\circ\text{C})$$

- b) La transmisión de calor por conducción a través de las paredes del grafito y del enfriador de cobre es únicamente radial. Aunque existe en mucho menor grado disipación de calor en el sentido axial y en dirección de la salida del tocho, este componente se despreciará para fines prácticos.

c) Las temperaturas tanto del agua refrigerante como del tocho son constantes en una sección transversal determinada y se puede representar mediante las temperaturas medias volumétricas.

d) El calor específico del agua refrigerante es constante en el rango de temperatura de trabajo (20°C - 70°C). Además se desprecia la dilatación volumétrica del agua.

$$C_e(\text{agua}) = 1 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{C}$$

$$\rho(\text{agua}) = 1 \text{ Kg/lt}$$

e) Las aletas del enfriador solo sirven para formar los canales de la espira de refrigeración y no se tiene en cuenta su mejoramiento en la transmisión de calor.

4.4- DETERMINACION DE LA ZONA DE SOLIDIFICACION

Al enfriamiento primario, que se da dentro de la matriz lo vamos a dividir en tres etapas como sigue:

1^{ra} ETAPA - Enfriamiento del **metal líquido** desde T_h hasta $T.L.$ (Temperatura del Líquidus)

El calor extraído será:

$$q(I) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{q(I)} \right]_{T.L.}^{T_h} \quad \text{--- 4.4.1}$$

2^{da} ETAPA - Enfriamiento del metal en su **estado pastoso**, o sea desde $T.L.$ hasta $T.S.$ (Temp. del Sólidus)

El calor extraído será:

$$q(II) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{q(II)} \right]_{T.S.}^{T.L.} \quad \text{----- 4.4.2}$$

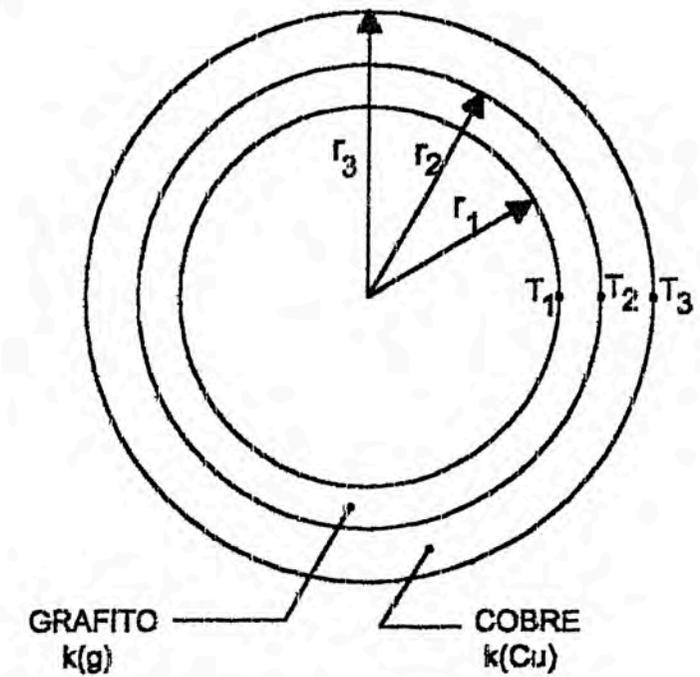
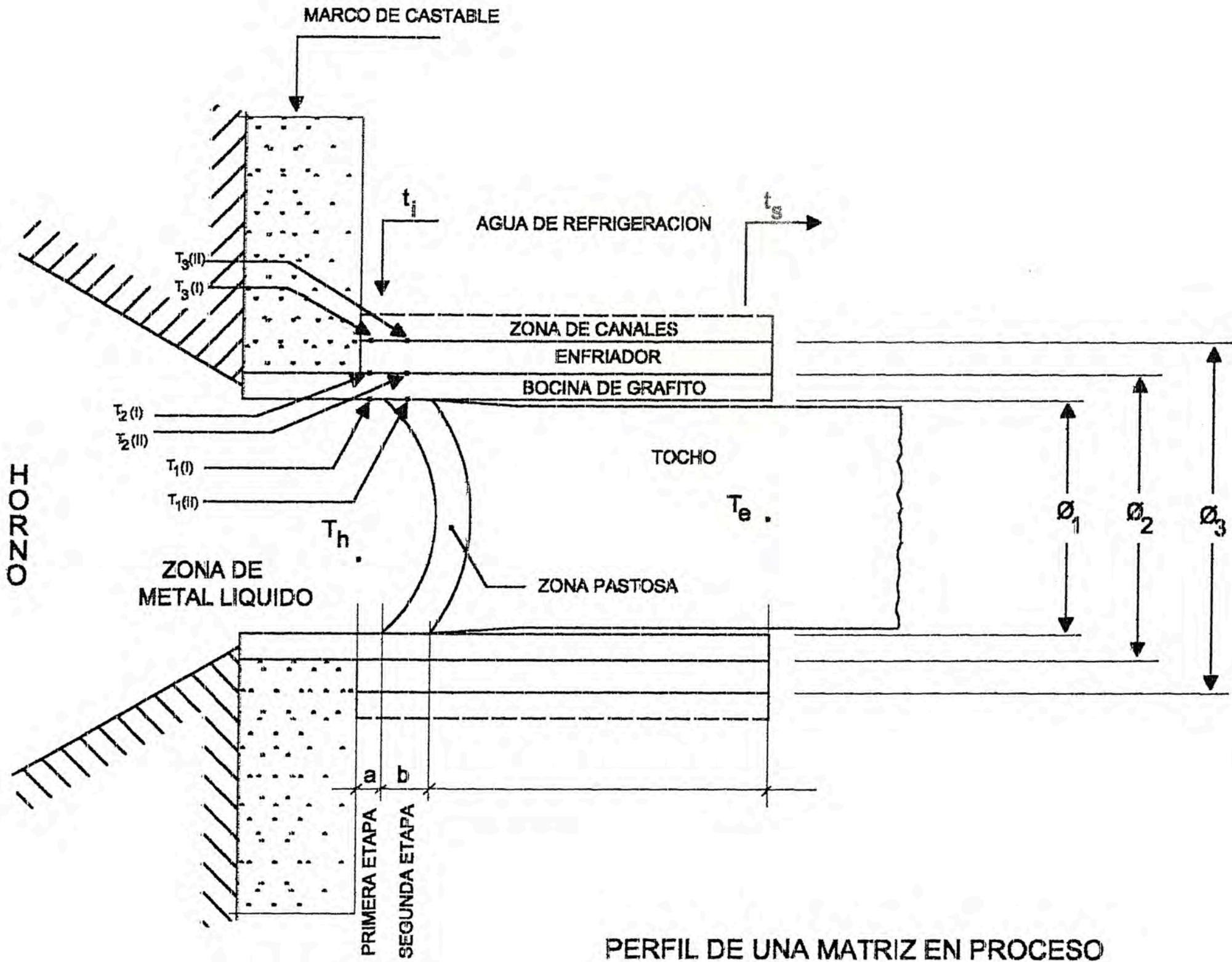
3^{ra} ETAPA - Enfriamiento del tocho ya formado (**sólido**), o sea desde $T.S.$ hasta T_e

El calor extraído será:

$$q(III) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \vphantom{q(III)} \right]_{T_e}^{T.S.} \quad \text{----- 4.4.3}$$

Enfriamiento primario.- viene a ser la suma de los calores de las tres etapas enunciadas, o sea desde T_h hasta T_e

PLANO 03



PERFIL DE UNA MATRIZ EN PROCESO
GRAFICO 4.4

$$q(\text{e.p.}) = m(\text{metal}) \cdot \Delta H(\text{metal}) \left. \begin{array}{l} \text{Th} \\ \text{Te} \end{array} \right\} \text{----- 4.4.4}$$

Donde:

$q(\text{I}), q(\text{II}), q(\text{III})$ y $q(\text{e.p.})$ --- están en Kcal/min

$m(\text{metal})$ ----- está en Kg/min

$\Delta H(\text{metal})$ ----- en Kcal/Kg

T.L. y T.S. ----- en °C

La **contracción** del metal en colada continua horizontal, encontrado experimentalmente es de 2.25 % en promedio para cobre y latones.

Los datos necesarios para determinar la zona de solidificación se señalan en el gráfico 4.4, allí se tiene:

\varnothing_1 = diámetro interior del grafito, del cual descontado el 2.25% nos da el diámetro del tocho.

$$r_1 = \varnothing_1/2$$

\varnothing_2 = diámetro exterior del grafito o interior del cobre

$$r_2 = \varnothing_2/2$$

\varnothing_3 = diámetro exterior del cobre, sin incluir la zona de canales.

$$r_3 = \varnothing_3/2$$

Teniendo en cuenta los enunciados del acápite 4.3, continuaremos definiendo los siguientes parámetros:

$T_1(I)$ = temperatura promedio en la superficie interior de la bocina de grafito en la **primera etapa**.

$$T_1(I) = (T_h + T.L.) / 2 \quad \text{-----} \quad 4.4.5$$

$T_1(II)$ = temperatura promedio en la superficie interior de la bocina de grafito en la **segunda etapa**.

$$T_1(II) = (T.L. + T.S.) / 2 \quad \text{-----} \quad 4.4.6$$

$T_2(I)$ = Temp. de la superficie ext. del grafito en la 1^{ra} etapa.

→ este parámetro se calculará por fórmula.

T_3 = viene a ser en principio la t_i (agua) aumentado en una fracción correspondiente al 50% del valor de la extracción de calor en cada etapa (considerando que se va a trabajar con la temperatura promedio en cada etapa)

Se puede expresar con las siguientes fórmulas:

Para la 1^{ra} etapa:

$$T_3(I) = t_i + \frac{\left. \begin{array}{l} T_h \\ \frac{1}{2} \Delta H(\text{metal}) \\ T.L. \end{array} \right\}}{\left. \begin{array}{l} T_h \\ \Delta H(\text{metal}) \\ \bar{T}_e \end{array} \right\}} (t_s - t_i) \quad \text{-----} \quad 4.4.7$$

Para la 2^{da} etapa:

$$T_3(II) = t_i + \frac{\left. \begin{array}{l} T_h \\ \Delta H(\text{metal}) \\ T.L. \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} T.L. \\ 1/2 \Delta H_{\text{metal}} \\ T.S. \end{array} \right\}}{\left. \begin{array}{l} T_h \\ \Delta H(\text{metal}) \\ T_e \end{array} \right\}} (t_s - t_i) \quad \text{--} \quad 4.4.8$$

t_i = temperatura de ingreso del agua

t_s = temperatura de salida del agua

En el gráfico 4.4 se indica la longitud **a** como la zona líquida del perfil de enfriamiento y continúa **b** como la zona pastosa.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para hacer un cálculo de los valores **a** y **b**, continuaremos con el mismo ejemplo del acápite 4.1

Aleación : cobre al fósforo (99.9%Cu - 0.03%P)

Diámetro del tocho: 180 mm

Velocidad de extracción: 4.8 cm/min

$t_i = 22^\circ\text{C}$

$t_s = 45^\circ\text{C}$

$T_h = 1,200^\circ\text{C}$

$T_e = 700^\circ\text{C}$

$m(\text{metal})$ se calculó anteriormente

$$m(\text{metal}) = 4.8 \text{ cm/min} \cdot \pi(18)^2/4 \text{ cm}^2 \cdot 8.94\text{g/cm}^3 \cdot 1\text{Kg}/1000\text{g}$$

$$m(\text{metal}) = 10.92 \text{ Kg/min}$$

Para el cobre: $T.L. = T.S. = 1084^\circ\text{C}$

Reemplazando valores de la tabla 2.3 (cap. 2) en las ecuaciones 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.4 tenemos:

$$q(I) = 10.92 \text{ Kg/min} \cdot (173.6 - 159.9) \text{ Kcal/Kg}$$

$$q(I) = 149.6 \text{ Kcal/min}$$

$$q(II) = 10.92 \text{ Kg/min} \cdot (159.9 - 110.8) \text{ Kcal/Kg}$$

$$q(II) = 536.2 \text{ Kcal/min}$$

$$q(e.p.) = 10.92 \text{ Kg/min} \cdot (173.6 - 67.7) \text{ Kcal/Kg}$$

$$q(e.p.) = 1,156.4 \text{ Kcal/min}$$

Reemplazando estos valores y los datos anteriores en las ecuaciones 4.4.5 y 4.4.7 se tiene:

1^{ra} etapa

$$T_3(I) = 22^\circ\text{C} + \frac{\frac{1}{2}(149.6)}{(1,156.4)} (45 - 22)^\circ\text{C} \Rightarrow T_3(I) = 24^\circ\text{C}$$

$$T_1(I) = (1200 + 1084)/2 \text{ -----} \Rightarrow T_1(I) = 1,142^\circ\text{C}$$

Utilizando las ecuaciones 4.4.6 y 4.4.8 también obtenemos:

2da etapa

$$T_3(II) = 22 + \frac{149.6 + \frac{1}{2}(536.2)}{(1,156.4)} (45 - 22)^\circ\text{C} \Rightarrow T_3(II) = 30^\circ\text{C}$$

$$T_1(II) = (T.L. + T.S.)/2 \text{ -----} \Rightarrow T_1(II) = 1084^\circ\text{C}$$

El diámetro interior del grafito viene a ser \emptyset_1 , tal que descontado el 2.25% viene a dar 180 mm de diám. del tocho:

$$\varnothing_1 = 180 \times \left(\frac{100}{100-2.25} \right) \text{ ----- } \varnothing_1 = 184 \text{ mm}$$

$$r_1 = 92 \text{ mm}$$

Los \varnothing_2 y \varnothing_3 son datos del diseño de la matriz. En la parte final de este capítulo se presenta un cuadro de datos para diseño de enfriadores sugeridos por quien suscribe, de allí tenemos los siguientes datos:

$$\varnothing_2 = 210 \text{ mm,} \quad \rightarrow \quad r_2 = 105 \text{ mm}$$

$$\varnothing_3 = 236 \text{ mm,} \quad \rightarrow \quad r_3 = 118 \text{ mm}$$

Las conductividades térmicas del cobre (Cu) y del grafito EK412 (g) se obtienen de los cuadros y gráficos del capítulo 2 sobre los cuales se tiene en cuenta los enunciados en el acápite 4.3, de este modo:

$$k(g) = 50 \text{ W/m.K}$$

$$k(\text{Cu}) = 379 \text{ W/m.K}$$

Para tener todos los datos en unidades del sistema MKS, a los valores $q(\text{I})$ y $q(\text{II})$ en Kcal/min lo convertiremos en W, teniendo en cuenta el factor **1 cal/seg = 4.184 W**

$$q(\text{I}) = 149.6 \text{ Kcal/min} = 2,493.3 \text{ cal/seg} \text{ ----- } q(\text{I}) = 10,432 \text{ W}$$

$$q(\text{II}) = 536.2 \text{ Kcal/min} = 8,936.7 \text{ cal/seg} \text{ ----- } q(\text{II}) = 37,391 \text{ W}$$

Resumiendo los datos encontrados anteriormente, se tiene:

Factor	Valor	
r_1	92 mm = 0.092 m	diseño de matriz
r_2	105 mm = 0.105 m	
r_3	118 mm = 0.118 m	
$k(\text{Cu})$	379 W/m.K	
$k(\text{g})$	50 W/m.K	
$T_1(\text{I})$	1,142 °C	1 ^{ra} etapa
$T_3(\text{I})$	24 °C	
$q(\text{I})$	10,432 W	
$T_1(\text{II})$	1,084 °C	2 ^{da} etapa
$T_3(\text{II})$	30 °C	
$q(\text{II})$	37,391 W	

Cálculo de la zona de solidificación (longitudes a y b) .-

De la ecuación 2.1.5 podemos despejar L:

$$L = \frac{q}{2\pi(T_1 - T_3)} \left(\frac{1}{k(\text{g})} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k(\text{Cu})} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \quad \text{----- 4.4.9}$$

Siendo L la longitud de la pared mixta Cu/g que se requiere ya sea para la primera etapa, que le llamaremos "a" o para la segunda etapa que le llamaremos "b", ver gráfico 4.4.

Para "a" le corresponde $q(I)$, $T_1(I)$ y $T_3(I)$

Asimismo para "b" le corresponde $q(II)$, $T_1(II)$ y $T_3(II)$

Reemplazando los datos del cuadro anterior en la ec. 4.4.9 se tiene:

$$a = \frac{10,432 \text{ W}}{2\pi(1,118) \text{ K}} \left[\frac{1}{50 \text{ W/m.K}} \ln \frac{105}{92} + \frac{1}{379 \text{ W/mK}} \ln \frac{118}{105} \right]$$

$$a = 4.4 \text{ mm} \longrightarrow$$

a = 4 mm

$$b = \frac{37,391 \text{ W}}{2\pi(1,054) \text{ K}} \left[\frac{1}{50 \text{ W/m.K}} \ln \frac{105}{92} + \frac{1}{379 \text{ W/m.K}} \ln \frac{118}{105} \right]$$

$$b = 16.7 \text{ mm} \longrightarrow$$

b = 17 mm

En la práctica, las marcas de solidificación se forman siempre en los dos primeros centímetros después de iniciado la línea de inicio del enfriador, lo que corrobora los resultados encontrados teóricamente.

4.5- CALCULO DE LA INTERFERENCIA (i)

Este factor viene a ser la diferencia de dilatación entre el cobre y el grafito que forman las dos capas del sistema de transmisión de calor.

En el capítulo 2 se muestran valores de dilatación de ambos elementos, de donde se observa que el valor que corresponde al grafito es despreciable con respecto al del cobre, por lo que solo se va a tener en cuenta este último.

Primero calcularemos el valor de T_2 (gráfico 4.4)

De la fórmula 2.1.3 se tiene:

$$T_2 - T_1 = \frac{-q}{2\pi k L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Debido a que la primera etapa es la de mayor temperatura, calcularemos para esta zona, ya que la interferencia está determinada por su máximo valor. El factor k corresponde al grafito debido a que la evaluación es entre r_1 y r_2 .

$$T_2(I) = T_1(I) - \frac{q(I)}{2\pi \cdot k(g) \cdot a} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{-----4.4.10}$$

Reemplazando en esta última ecuación los valores del ejemplo anterior:

$$T_2(I) = 1,142^{\circ}\text{C} - \frac{10,432 \text{ W}}{2\pi (50 \text{ W/m.K}) 4.4 \times 10^{-3} \text{ m}} \ln \frac{105}{92}$$

$T_2(I) = 145^{\circ}\text{C}$

El resultado de $T_2(I)$, es el mayor valor de temperatura que alcanza el enfriador de cobre, con lo que se puede calcular el valor necesario de la interferencia (i).

$$i = \varnothing_2(\% \text{ dilatación a } T_2(I) - \% \text{ dilatación } T_{(\text{ambiente})}) - 4.4.11$$

Del acápite 2.2.2 se obtiene por interpolación:

Temp. Cobre	% dilatación
0°C	0.26
25	0.30
145	0.51
200	0.60

Entonces:

$$i = 210 \text{ mm } (0.51-0.30)\%$$

$$i = 0.44 \text{ mm}$$

Este resultado de i representa el valor mínimo necesario, entonces el redondeo debe ser hacia el valor mayor.

Para una matriz de $\varnothing_{\text{tocho}} = 180 \text{ mm}$ (diámetro del ejemplo) le

corresponde ----- \rightarrow **$i = 0.50 \text{ mm}$**

Esto quiere decir que el enfriador de cobre debe ser fabricado con :

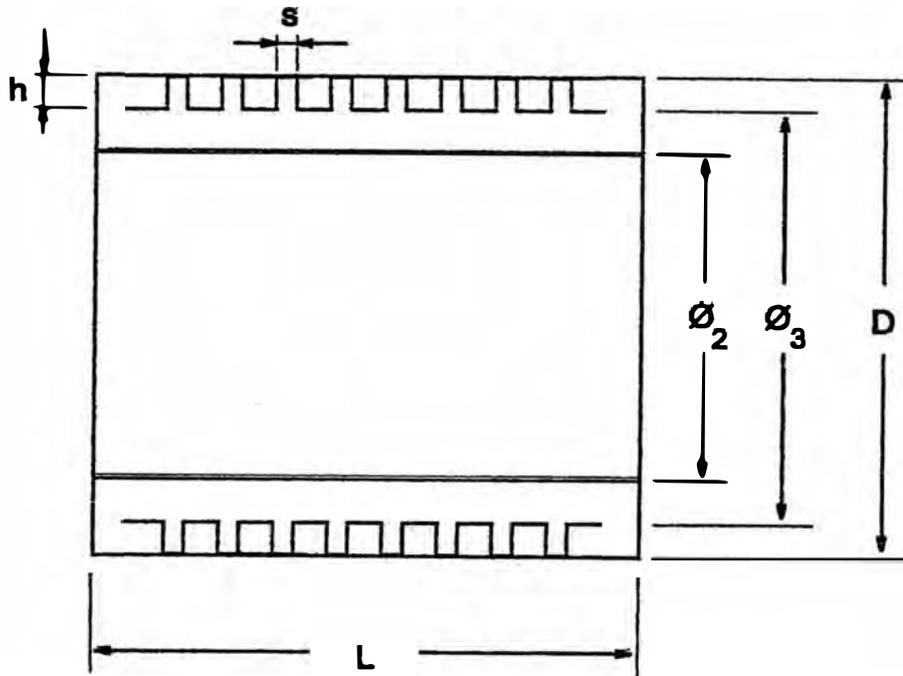
$$\varnothing_2(\text{Cu}) = (210-0.5)\text{mm} = 209.5 \text{ mm}$$

y la bocina de grafito con:

$$\varnothing_2(\text{g}) = 210.0 \text{ mm}$$

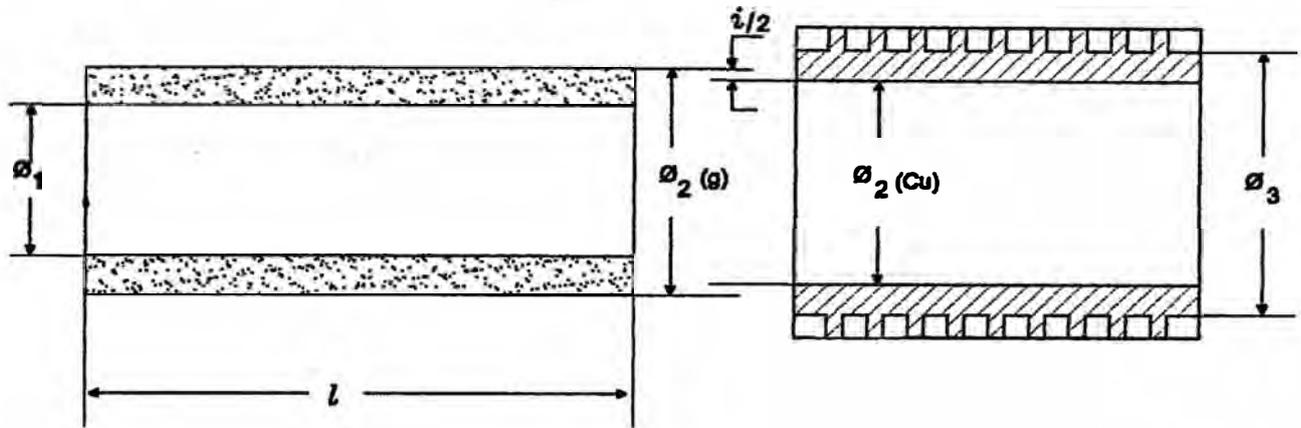
Para el encastre, el enfriador de cobre debe ser calentado unos 50°C por encima de los 145°C (como margen de operación) o sea a 200°C .

CUADRO DE DISEÑO DE ENFRIADORES



DIAMETRO DE TOCHOS	DIMENSIONES DEL ENFRIADOR, mm					
	L	\varnothing_2	\varnothing_3	D	s	h
8"	340	235	275	295	6	15
7"	330	210	236	262	6	13
6"	315	180	205	228	5	12
5"	300	160	200	220	5	11
4"	280	130	165	185	4	10
3"	240	95	132	150	3	9
2"	200	75	104	120	2.5	8
17 mm	100	30	42	55	2	6

CUADRO DE INTERFERENCIAS (i)
PARA ENSAMBLE ENFRIADOR – BOCINA



DIAMETRO DEL TOCHO	BOCINA DE GRAFITO	
	i (mm)	l (mm)
8"	0.60	440
7"	0.50	430
6"	0.40	400
5"	0.35	400
4"	0.30	380
3"	0.25	320
2"	0.20	280
17 mm	0.07	160

5.- EVALUACION ECONOMICA

Las pérdidas por rechazos en la producción con una matriz deficiente pueden llegar fácilmente al orden del 30 % debido principalmente a la formación de grietas en la superficie, los cuales son originados por un deficiente contacto entre el grafito y el cobre.

Con el siguiente ejemplo se puede cuantificar lo que representa económicamente esto.

Para el caso de tochos de 6" en latones 70/30 el costo de producción es de U\$ 120 / TM.

Para una planta con producción mensual de 200 TM se tiene un costo de U\$ 24,000 / mes; y si se tiene un rechazo del 30 % , esto representa una pérdida de 7,200 U\$ / mes.

Por otro lado, si a la matriz se le da un valor de interferencia en exceso se corre el riesgo de que el grafito se agriete con la consecuente perdida de la misma. Para el caso de la producción de tochos de 6", solo el bloque de grafito tiene un costo de U\$ 600./u; además se utiliza 8 horas de torno en su preparación entre otros gastos.

Con la adecuada preparación de la matriz no solo se ahorran costos sino que se recupera ese 30% de producción y lo que es más importante aún, se mejora la calidad del producto lo que es indispensable para una empresa que desea ser competitiva.

6.- CONCLUSIONES

El éxito de la producción en la colada continua horizontal esta en la adecuada preparación de la matriz, por eso en el armado de la matriz ya sea del sistema cónico o paralelo se debe tener extremo cuidado en el uso del factor interferencia, y es tan importante que de no usarse el valor apropiado se puede ocasionar la rotura del molde de grafito en las primeras horas de trabajo, trayendo en consecuencia una parada de la producción, la pérdida de la preparación de la matriz, la pérdida del grafito que es el componente más costoso.

Antes de realizar este estudio los valores de interferencia se habían encontrado en forma empírica y eran aproximados, con el desarrollo de este trabajo se ajustaron estos valores y no solo se trabajó con valores óptimos, sino que a su vez se tiene un pleno conocimiento del intercambio de calor y del efecto de dilatación que ocurre en la matriz que son de gran ayuda para diagnosticar cualquier deficiencia en el funcionamiento de la misma que es el punto mas crítico de un sistema de colada continua.

El sistema de matriz de ensamble paralelo tiene ventajas en la producción de tochos ya que reduce costos en cuanto a uso de grafitos, simplifica el maquinado de las piezas que componen la matriz, es más fácil verificar las medidas cuando las piezas maquinadas vienen de torno y asegura un buen contacto entre el grafito y el enfriador de cobre.

7.- RECOMENDACIONES

La Colada Continua Horizontal es usada para la producción de tochos de cobre, latones, latones al plomo, cuproníquel, bronces y otros. Se sugiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

a.- Cuando se inicia la producción de tochos, es importante definir con el cliente el mayor rango posible en la tolerancia al diámetro ya que de esto depende la cantidad de rectificadas que se puede dar al grafito que normalmente deberían ser dos o tres veces, a razón de 1.5 mm en promedio cada vez. Así se obtendrá un buen rendimiento de matrices.

Para el maquinado del diámetro interior del grafito siempre se empieza con la medida mínima del rango que se especifica para el tocho, teniendo en cuenta que la contracción entre la medida del grafito y el tocho frío es de 2.25 % en promedio (varía entre 2.0 y 2.5%).

b.- Además de los productos redondos, con el mismo sistema de matriz se pueden obtener barras hexagonales, cuadradas o algún perfil de forma geométrica cercana a

los mencionados. Para esto se hace el respectivo maquinado al diámetro interior del grafito, teniendo en cuenta que los radios de curvatura en las aristas del perfil son muy importantes para evitar grietas. Para estos casos también se debe tener en cuenta como se deben acomodar estos perfiles al pasar por las mordazas o rodillos de la máquina extractora y por las mordazas del sistema de corte.

- c.-** Para el armado de la matriz se recomienda usar empaquetaduras que resistan a una temperatura de 150°C para evitar que éstas fallen en servicio. De esta forma se evita fugas de agua por la parte posterior de la matriz hacia el horno, hecho que causa la formación de asperezas o grietas en la superficie del tocho. Las empaquetaduras de este grado son suministradas con refuerzo de fibras metálicas.
- d.-** Para la temperatura del agua en la salida de la matriz es recomendable usar de 45 a 60°C, no debe exceder de este rango porque puede ocasionar formación de grietas esporádicas.

BIBLIOGRAFIA

1.- TRANSFERENCIA DE CALOR

Donald Pitts y Leighton Sissom

2.- FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Frank P. Incropera / David P. de Witt

3.- TRANSFERENCIA DE CALOR

J. P. Holman

4.- MECANICA DE LOS FLUIDOS

Victor L. Streeter

5.- BUREAU OF MINES, BULLETIN 584 CONTRIBUTIONS TO THE
DATA ON THEORETICAL METALLURGY.

Kelley, Kenneth Keith

6.- HANDBOOK AMERICAN SOCIETY FOR METALS

7.- GRAFITOS RINGSORFF PARA LA COLADA CONTINUA

8.- SOLIDIFICATION IN CONTINUOUS CASTING

Rudi G. Piesche