

TEMA 7

DISEÑO DE LOS CONDUCTOS DE COLADA

Los sistemas de colada.

Se denominan *sistemas de colada* al conjunto de canales que conducen la aleación líquida hasta la cavidad del molde para el llenado del mismo.

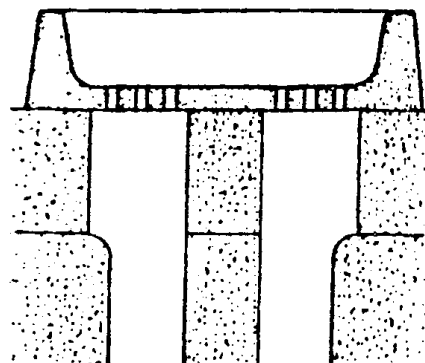
Como primera medida, antes de decidir un sistema de colar o llenar la pieza, conviene determinar la posición del modelo en el molde, para lo cual se sopesan las ventajas e inconvenientes de moldear y colar en cada posición posible. En muchos casos la posición del modelo para moldear viene impuesta prácticamente por la forma de la pieza fundida, si bien cabe en ocasiones optar entre diversas posiciones de colada posibles. Aún cuando para la mayoría de las piezas se pueden dar entradas de caldo por un lado o por debajo y efectuar el llenado en sentido ascendente, asimismo habrá que tener siempre en cuenta la posibilidad de que el llenado se efectúe de forma directa por arriba, por necesitarse entonces menor cantidad de material para el sistema de colada y favorecerse además la alimentación.

Prácticamente todos los sistemas de colada pueden reducirse a cuatro formas principales:

- a) colada directa o por lluvia.
- b) colada por la línea de partición del molde.
- c) colada por el fondo o sifón.
- d) colada escalonada o por etapas.

a) Colada directa

Se limita usualmente a moldes relativamente pequeños, de diseño sencillo, o a moldes grandes hechos de material resistente a la erosión. La turbulencia del metal, al caer en la cavidad, tiende a erosionar las paredes y el fondo, así como a ocasionar atrapamiento de aire y de óxidos del metal en la pieza fundida. En la colada de hierro y acero, la erosión es el problema más difícil, derivado de la gran turbulencia producida por la colada directa. En los metales ligeros, oxidables, tales como el aluminio y el magnesio, la escoria y el atrapamiento del aire son los problemas más difíciles, resultantes del vertido turbulento. La colada directa de estos metales no es recomendable.

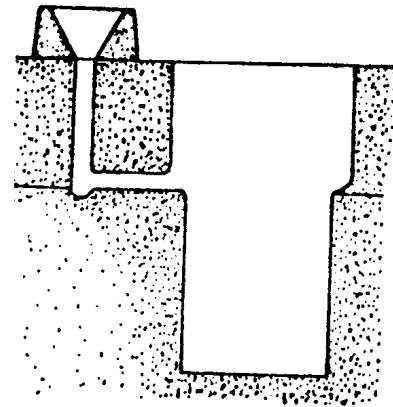


A menudo se usan *filtros* para la colada directa. La sección de los agujeros controla el régimen de flujo y la escoria o las inclusiones tienden a separarse del metal en la *cubeta de vertido* que queda sobre los agujeros del filtro. Sin embargo, aún con filtros, el metal tiende a entrar en el molde de una manera fuertemente turbulenta.

b) Colada por la superficie de partición de los moldes

Es el sistema más sencillo después del antes descrito. A no ser que esta línea de partición se encuentre en el fondo de la pieza, siempre ocurre alguna turbulencia al entrar rápidamente el metal en la cavidad del molde. Desde el punto de vista del flujo del líquido, este tipo de colada es una solución intermedia entre la colada directa y la colada por el fondo; a menudo se elige más como una solución fácil de moldeo que por su valor intrínseco.

La turbulencia del metal a la entrada se puede reducir a un mínimo proyectando el sistema de colada de forma que el metal entre a muy baja velocidad y escurra a lo largo de las paredes del molde, en lugar de llegar a borbotones y chocar contra las paredes del molde o del macho. Se obtiene la velocidad de entrada baja proyectando el sistema de colada de manera que la sección transversal de la entrada o entradas sea menor que las del cuello. Tal sistema se denomina de *bebedero ahogado o sin presión*.



Las coladas en la línea de partición tienen la ventaja de que a menudo es más sencilla la entrada directa a los *cargadores*. Haciéndolo así, el último (y más caliente) metal en entrar va directamente al cargador, promoviendo así una *solidificación direccional*. Los costos de limpieza son mínimos haciendo la colada en el cargador, puesto que la alimentación no es una parte separada de la pieza.

c) Colada por el fondo, fuente o sifón

Las coladas por el fondo reducen a un mínimo la turbulencia y la erosión en la cavidad del molde. La región más baja de un molde colado por el fondo se calienta con el metal que fluye por él, retardándose la solidificación en estos lugares. Debe tenerse especial cuidado en asegurar que el foco caliente en la entrada sea mínimo, o de lo contrario resultaría un *rechupe*.

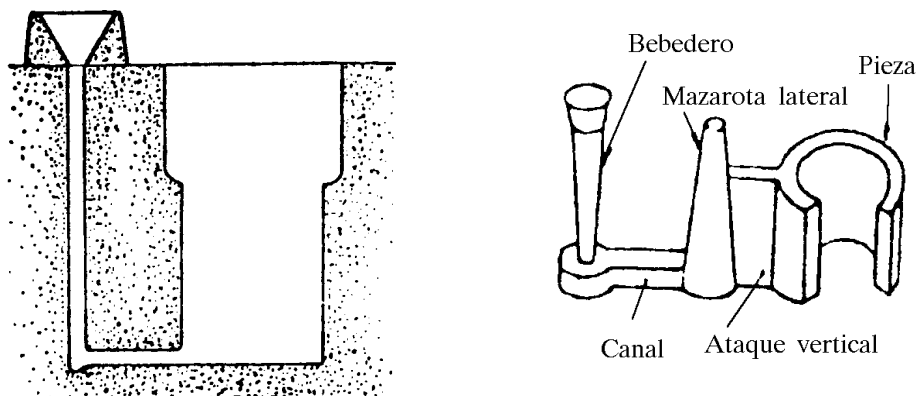


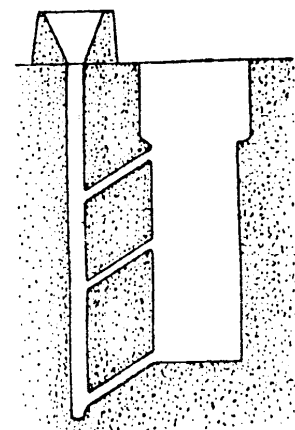
Fig. 7.5

Su principal inconveniente es que el metal se va enfriando al subir, y puede no llenar por completo el molde. Este inconveniente se puede subsanar colocando mazarotas laterales, que se alimentan directamente del metal caliente (fig. 7.5). Esta solución es muy empleada, pues el foco caliente tiene lugar en la mazarota, lo que es una ventaja.

d) Colada escalonada por etapas o con sifones superpuestos

Corrige las malas características de la colada por el fondo y conserva sus ventajas. El metal comienza a penetrar por el fondo y cuando alcanza una cierta altura lo hace por la siguiente boca, y así sucesivamente. De esta forma se consigue que el metal caliente se vaya situando siempre en la parte superior del molde y no haya dificultades para que se llene por completo.

Realmente, las coladas por etapas no funcionan de esta manera ideal; la inercia del metal, al caer por el bebedero, lo obliga a pasar frente a las entradas más altas y casi todo el metal fluye por el canal del fondo. Inclinando los ataques hacia arriba, de manera que formen un determinado ángulo con la pieza, y diseñando las coladas para que tengan una resistencia relativamente creciente al flujo en los niveles bajos, puede hacerse que las coladas funcionen con propiedad. Desgraciadamente no se dispone de fórmulas que ayuden a diseñar este tipo de coladas; cada una de ellas debe seleccionarse por experiencia, sentido común y observando otros casos prácticos ejecutados con un determinado metal.



El tamaño, tipo y proyecto de estas coladas es función del tamaño de la pieza y de la temperatura del metal.

Elementos que constituyen un sistema de colada.

Un sistema de colada se compone, en general, de los siguientes elementos: *cono o embudo de colada*, *bebedero*, *canal de colada* y *ataques o entradas*.

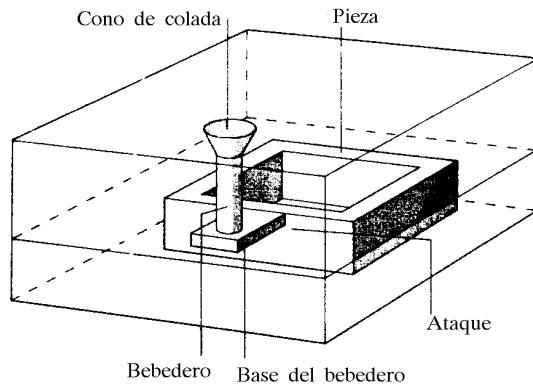


Fig. 7.6

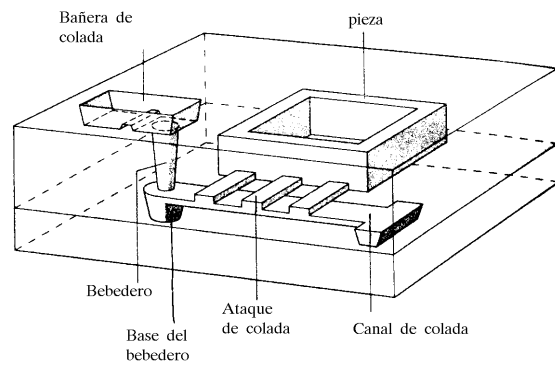


Fig. 7.7

Según sea el tipo de pieza, el metal a colar y las exigencias de calidad, el *embudo de colada* puede ser el propio *cono* dibujado en la figura 7.6, o bien una *bañera* o *bacino* que puede llevar tabiques y otros elementos que retengan la escoria, calmen la entrada del caldo en el bebedero o den lugar a una circulación del caldo, en dicho bacino, que obligue a la escoria a separarse por fuerza centrífuga (fig. 7.7).

Si es de temer la entrada de escoria o de arena del embudo en la pieza colada, se intercala un *filtro* entre dicho embudo y el bebedero. Estos filtros pueden ser de arena de machos estufada o bien de material cerámico adquirido en el mercado.

El *bebedero* es el conducto, generalmente vertical, que lleva el metal líquido desde la *cuchara* o desde la *cazuela* o *cono de colada* hasta el *canal de colada*.

Debe cumplir las siguientes condiciones:

- Dar lugar a un llenado correcto del molde.
- Facilitar el que la colada se haga a *bebedero lleno*.
- Evitar erosiones y choques.

El *canal de colada* (pueden haber varios) tiene por misión llevar el caldo desde el pie del *bebedero* hasta los *ataque de colada*, que son quienes propiamente introducen el metal en el molde.

El *canal de colada* es generalmente horizontal y debe cumplir las funciones siguientes:

- Resistir la erosión de la corriente líquida.
- Alimentar uniformemente los *ataques de colada*.

Los *ataques de colada* introducen el metal en el molde y deben:

- Asegurar un llenado regular y completo del molde.
- Evitar erosiones o desplazamientos de machos.
- Presentar facilidad para ser eliminados posteriormente.

En piezas masivas bastan pocos ataques y el canal de colada puede ser corto. Por el contrario, en piezas con espesores débiles hay que disponer numerosos ataques, lo que obliga a un canal o varios de gran longitud y sección.

Cálculo del sistema de colada.

El primer problema que se presenta, una vez realizado el proyecto y el dibujo definitivo de la pieza, es concebir la forma (no las dimensiones) del sistema de alimentación, es decir:

- La posición del bebedero (o bebederos) respecto a la pieza.
- Número y posición de los canales.
- Número y situación de los ataques.

Estos factores deben ser decididos por consideraciones de tipo metalúrgico, de solidificación correcta de la pieza, de evitación de la erosión de los machos situados en la cavidad del molde, etc. Igualmente, consideraciones de la misma índole nos permitirán apreciar cuál es el mejor modo de realizar la colada: en caída directa, en talón, en sifón, en lluvia, en sifón con ataques superpuestos, etc. Algunas piezas deberán ser atacadas en sifón por las partes más delgadas, mientras otras deberán colarse en caída directa.

En general, la disposición respecto a la pieza del sistema de colada no presenta grandes dificultades, y la práctica normal y la experiencia de jefe de fundición deciden con acierto en la mayoría de los casos.

Una vez fijada la disposición general del sistema de alimentación, es necesario dimensionar las diferentes partes de que consta.

La primera etapa, o enfriamiento hasta el comienzo de la solidificación, nos servirá de base en el diseño de los conductos de llenado, para que en la pieza quede garantizado

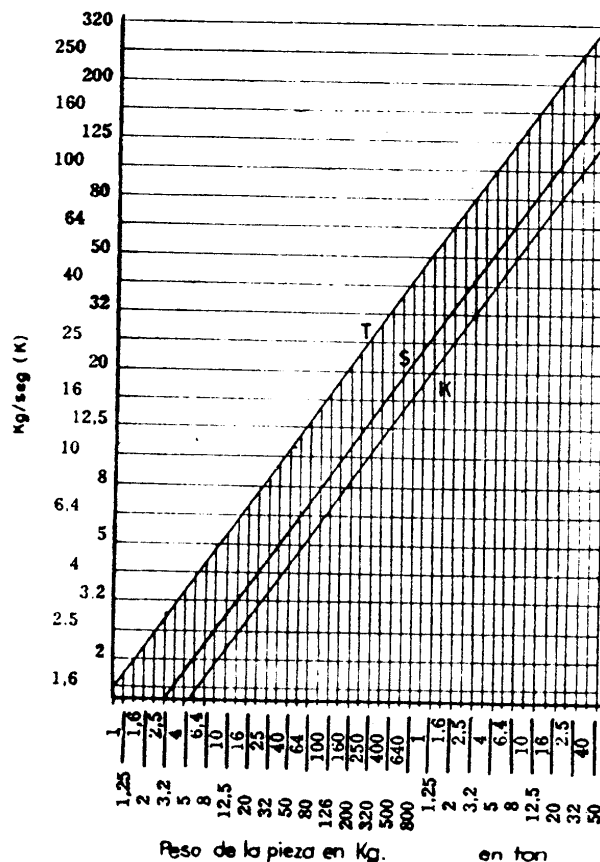


Fig. 7.8



precisamente dicho llenado en todas sus partes. El concepto es muy simple: el caldo debe ocupar la cavidad antes de que en cualquier punto haya comenzado la solidificación. Así, el tiempo máximo de que disponemos para el llenado es el que transcurre en bajar la temperatura desde la de colada hasta la del *liquidus*. Cualquier tiempo mayor podrá servir para determinadas piezas, pero en general no garantiza el llenado completo, si alguna parte que ha solidificado puede ser impedimento para el paso del metal líquido.

Este tiempo, que tan simplemente se define, es muy difícil de determinar, a pesar de haber tenido durante muchos años a nuestro alcance el modelo matemático que lo contiene. Sobre dicho tiempo influyen numerosos factores, y se ha discutido mucho sobre cuál es el más importante. En la práctica más corriente, el tiempo de colada se determina, en todo caso, partiendo casi siempre del peso de la pieza. Investigaciones realizadas por E. W. Dietert en los años treinta en Estados Unidos, le llevaron a encontrar que, en muchísimas piezas fundidas, la relación entre el tiempo de colada t y el peso de la pieza P era de tipo:

$$t \propto k \sqrt{P}$$

representando el valor k todas las variables restantes: forma de la pieza, volumen, paredes gruesas o delgadas, etc. (gráfico 7.8).

Esta fórmula empírica, basada en observaciones prácticas, es un primer paso, y, juiciosamente aplicada, ha dado buenos resultados. No obstante, incluso en la época en que se dedujo, se comprendía que el peso de la pieza por sí solo no podía determinar el tiempo de colada. En efecto, es inmediato comprender que dos piezas del mismo peso, en la que una tiene paredes gruesas y la otra paredes delgadas, deben dar forzosamente tiempos de solidificación diferentes. La pieza más compacta se enfriará más lentamente que la de paredes más delgadas. Y la última deberá colarse con mayor rapidez que la primera, si queremos garantizar su llenado.

Unos investigadores, por un camino, y otros, por otro diferente, llegaron a deducir una fórmula matemática que ha llegado a convertirse en uno de los conceptos básicos más importantes de la técnica de la alimentación. Dicha fórmula expresa que *el tiempo de enfriamiento es proporcional al cuadrado del volumen de la pieza e inversamente proporcional al cuadrado de la superficie que encierra ese volumen*, o, lo que es lo mismo, *que la superficie transmisora de calor*.

$$t \propto k \left(\frac{V}{S} \right)^2$$

Por un lado, el factor k engloba las características técnicas y densidad del molde y del metal líquido, el sobrecalentamiento, el modo de realizar la colada, etc; y, por otro, el cociente

$$\frac{V}{S}$$

describe la forma de la pieza.

N. J. Chvorinoff ratificaba en 1940 la bondad de dicha fórmula, partiendo de la clásica ecuación de Fourier sobre la teoría de la transmisión del calor:



$$\frac{M\theta}{Mt} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{M^2\theta}{Mx^2} + \frac{M^2\theta}{My^2} + \frac{M^2\theta}{Mz^2} \right)$$

Ahora nos parece natural el haber acudido a la ecuación que Fourier dedujera más de cien años antes (1822). En efecto, la ecuación de transmisión del calor relaciona la variación de la temperatura θ con el tiempo t en un punto (x, y, z) , con el gradiente de temperatura en ese punto (paréntesis del segundo miembro) y con las propiedades del cuerpo en que se realiza la transmisión del calor (factor que multiplica al paréntesis).

Chvorinoff transformó e integró la anterior ecuación, suponiendo que la temperatura en la superficie molde-metal, mientras éste permanece líquido, se mantiene constante e igual a la temperatura del *líquidus* (hipótesis que se confirma con la experiencia suficientemente) y llegó a la expresión que ya conocemos de

$$t = k \left(\frac{V}{S} \right)^2$$

designando al cociente

$$\frac{V}{S}$$

por el nombre de *módulo de solidificación*. Este es el modelo matemático, pero la determinación de k , en que intervienen los diversos factores enunciados, es muy problemática, por la dificultad de control de esos mismos factores.

Ch. Trencklé, tras la acumulación de numerosísimas experiencias de taller y ensayos de laboratorio, llegó a la confección de una serie de ábacos, que proporcionan directamente el tiempo t en función de las dimensiones de la pieza, longitud de recorrido del metal, tipo y temperatura del metal colado y tipo de molde empleado. Es decir, que ante la dificultad de obtener k , ha sido preferible la determinación práctica del tiempo de llenado t .

J. Czikel dedujo otra fórmula, apoyándose en las características térmicas y en la forma de colada, por la que obtenía el máximo tiempo de colada:

$$t = \frac{M}{e}$$

en donde

$$M = \frac{V}{S}$$

es el módulo de solidificación o enfriamiento de la pieza (en cm) y e , con valores de 0,015 a 0,035, es el coeficiente que da la velocidad de avance del frente de solidificación (en cm/s).

Sea por un procedimiento, sea por otro, este tiempo para el comienzo de la solidificación debe ser contrastado con una segunda condición, que puede, en muchos casos, rebajar el tiempo de llenado de los moldes. Un molde debe ser llenado en un tiempo tal que la radiación térmica no produzca defectos superficiales de dilatación en sus paredes, que luego se traduzcan en

defectos para la pieza que se pretende obtener (fig. 7.9 y 7.10).

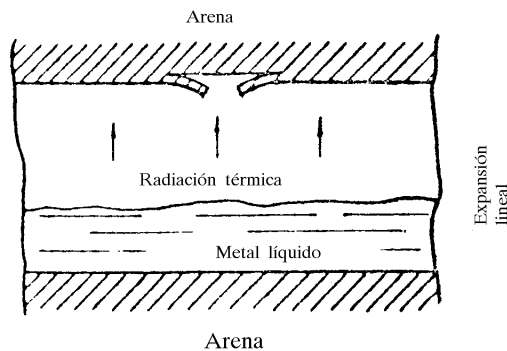


Fig. 7.9

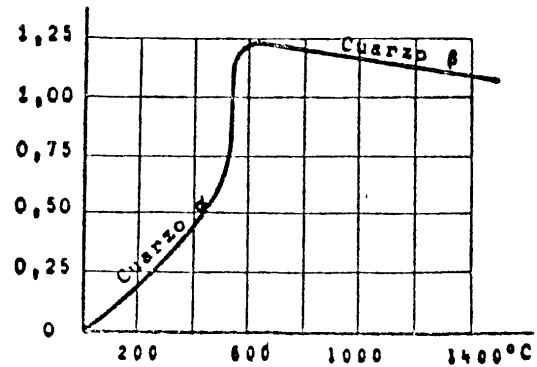


Fig. 7.10

Ensayos experimentales han permitido fijar los límites máximos para dichos tiempos, con lo que se garantizan la no aparición de defectos superficiales en las piezas, debidos fundamentalmente a la expansión de la arena de moldeo. También Trencklé ha obtenido valores, que tabulados en función del material del molde, dan la temperatura de colada y de la forma de colar.

Una vez se tiene fijado el tiempo de llenado y decidida la forma de colar, es decir, la posición del bebedero respecto a la pieza, el número y posición de los canales y el número y situación de los ataques (en general no representa mayores dificultades y la práctica normal y la experiencia deciden con acierto en la mayoría de los casos), habida cuenta de consideraciones de tipo metalúrgico, de solidificación correcta de la pieza (solidificación direccional), de evitación de erosión de los machos, etc., se entra de lleno en el dimensionado de las diferentes partes de los conductos de llenado.

El cálculo correcto de las distintas dimensiones de los conductos lo rige la ecuación del flujo de Bernouilli

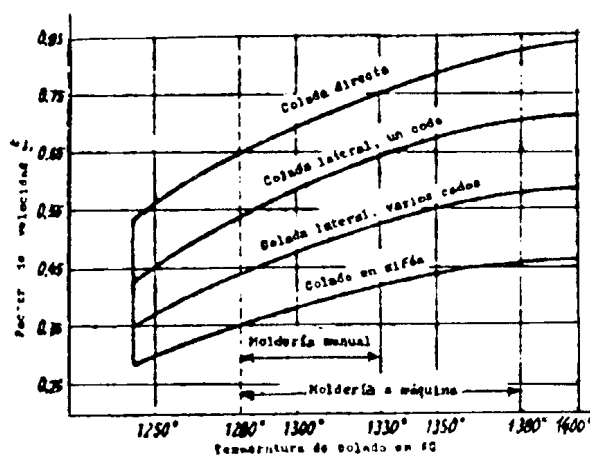
$$P \propto \alpha \sqrt{2gH} n S_A \rho t 10^3$$

que nos da el peso P de metal líquido, de densidad ρ , que durante un tiempo t , con velocidad $\alpha \sqrt{2gH}$, pasa por una sección de valor $n S_A$, o bien por n ataques de sección S_A cada uno.

A través de la misma es posible calcular la sección S_A de los ataques, ya que los valores de P , ρ y t son conocidos, n se ha fijado en la decisión tomada sobre la forma de colar y H la determina la forma de colar y la altura del embudo de colada junto con los desniveles de los puntos más bajos y más altos de la cavidad del molde. Sólo queda por calcular el valor de α (factor de velocidad).

La determinación de α , coeficiente de pérdida de carga que se produce en el metal líquido al atravesar el dispositivo de alimentación (bebedero, canales y ataques), ha dado lugar a múltiples ensayos por parte de los investigadores. Varios encontraron que el derrame de los metales y aleaciones sobrecalentados normalmente tiene una gran semejanza con el derrame del agua a 20EC. Así, independientemente de las experiencias con modelos reales, han podido realizarse, con modelos transparentes y agua, experiencias en las que han podido medirse las condiciones de derrame, traduciéndolas al caso de los metales con buenos resultados.

La conjunción de estas experiencias y las consideraciones teóricas de la Fluidodinámica, han permitido conocer con suficiente aproximación el valor de α en los casos de más aplicación del diseño de conductos de alimentación. Estos valores han sido dados en ábacos y gráficos en función de diferentes factores, como: forma de colada, número y posición de los ataques, temperatura de colada, longitud y diámetro de bebederos, etc. (fig. 7.14).



Factor de velocidad en función de la temperatura y el modo de colada de la fundición.

Fig 7.14

Una vez calculada la sección nS_A de los ataques, sólo queda dimensionar la sección del canal S_C y, finalmente, la del bebedero S_B . En el cálculo de ambas se toma como base el decidir si conviene alimentar la pieza a presión ($S_C > nS_A$) o conviene hacerlo sin presión ($S_C < nS_A$). Se trata de buscar un escalonamiento entre S_B , S_C y nS_A .

La decisión queda rodeada de las siguientes consideraciones: importancia o no de la absorción de aire, posible erosión de las paredes del conducto, turbulencias en el molde, que la aleación sea ferrosa o no, que se tema un mojado dificultoso en zonas alejadas, que la colabilidad de la aleación sea alta o baja, que el riesgo de oxidación por turbulencia sea temible, etc. Todas estas consideraciones han hecho del escalonamiento del sistema de colada uno de los capítulos más debatidos de la técnica del llenado de moldes.

Para obtener en todas las entradas que derivan del mismo canal, caudales lo más iguales posible, Trencklé utilizó el escalonamiento

$$S_B : S_C : nS_A \quad 1 : K : 1$$

en donde

$$k = \sqrt{n}$$

siendo n el número de ataques y K no rebasando el valor de 2. Es decir, como máximo un escalonamiento 1:2:1.

Este límite es proclamado por algunos autores como el más conveniente de utilizar para

todo tipo de piezas y aleaciones. No obstante, la tendencia actual parece dirigirse hacia sistemas con presión más moderada, comprendidos entre:

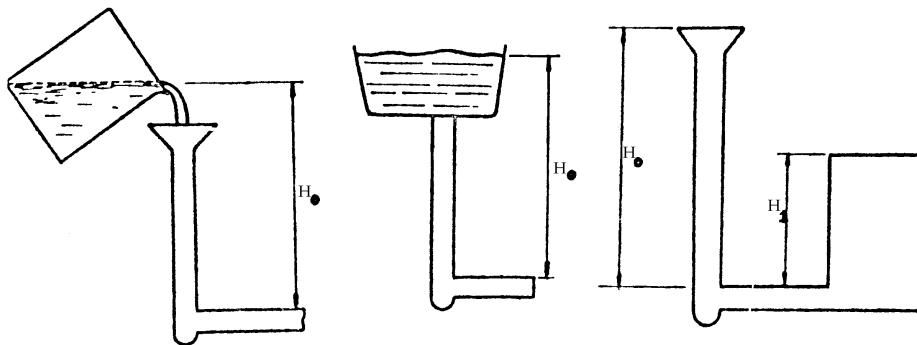
y

1:1,3:1 y 1:2:1	para aleaciones pesadas (féricas)
1:3:1	para aleaciones ligeras (no féricas).

Con lo dicho hasta aquí, se tiene un visión de conjunto esquemática para poder decidir sobre la forma y dimensión de un sistema de llenado; queda ahora, para completar la alimentación, hacer otro esquema del sistema de *mazarotado*.

Consideraciones prácticas.

En la figura siguiente se diseñan tres tipos de conductos de entrada y formas de colar, que en definitiva orientan sobre la forma de fijar el parámetro H (altura hidrostática) a introducir en la ecuación de Bernouilli.



La figura 7.15 indica que el primer ataque a partir del pie del bebedero debe estar alejado de este pie al menos $1,5 D$, siendo D el diámetro del bebedero.

La figura 7.16 indica que el canal debe sobrepasar 1,5 veces, por lo menos, la máxima dimensión del ataque.

La figura 7.17 contiene la forma más común de la sección de los canales de colada. Éstos, pudiendo ser rectangulares, se practican trapezoidales para mayor facilidad de desmoldeo.

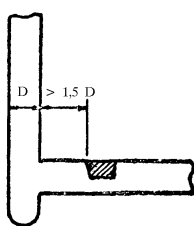


Fig. 7.15

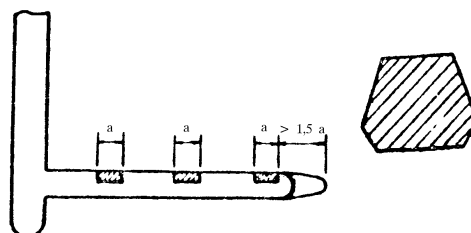


Fig. 7.16

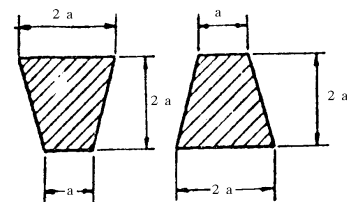


Fig. 7.17

En la figura 7.18, se diseña un bebedero y un embudo de colada. La dimensión D se obtiene a partir de d , planteando la ecuación de continuidad de caudal a lo largo del bebedero.

La figura 7.19 representa diversas formas de embudos postizos.

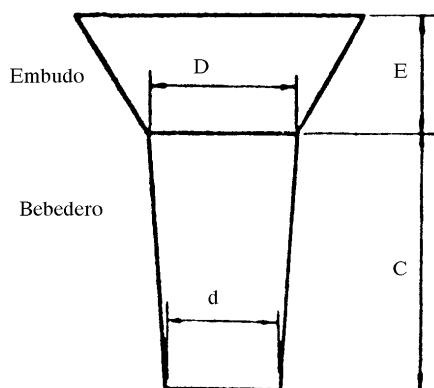


Fig. 7.18

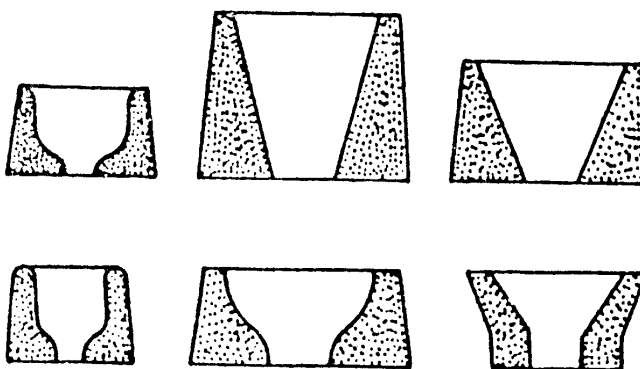


Fig. 7.19

La figura 7.20 es una cazuela o bañera de colada. Su altura H_c debe estar relacionada con la longitud del bebedero. Tal relación viene dada por el gráfico de la figura 7.21.

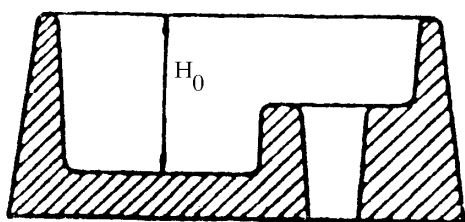


Fig. 7.20

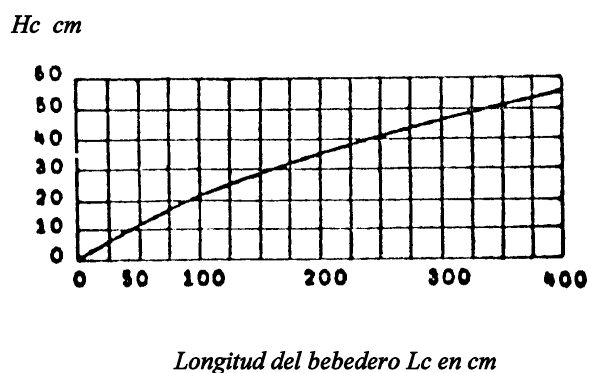


Fig 7.21

Por último, la figura 7.22 es un diseño ovalado de embudo que evita turbulencias que, en definitiva, arrastrarían aire al molde; la 7.23 muestra un esquema con un solo canal.

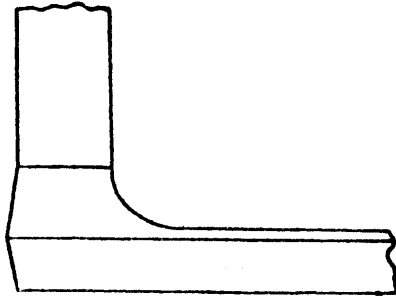


Fig. 7.23

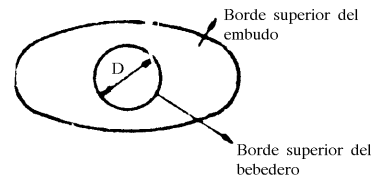
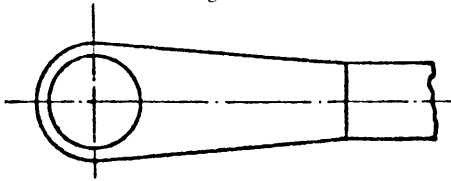


Fig. 7.22