

# MULTICÁMARA Y MOTOBOMBAS DE ULTRA ALTA PRESIÓN

**Mauricio Mulet Martínez**  
Universidad de Chile, Chile

## INTRODUCCIÓN

La innovación consiste en una “Multicámara y Motobombas de Ultra Alta Presión”, que permite por una parte, superar la gran limitación que tienen las bombas actuales en generar ultra alta presión y por otra, superar el pequeño tamaño a comprimir, que es la gran limitación que tienen las prensas de ultra alta presión, como la Celda de Yunque de Diamante.

La innovación tiene gran importancia en la metalurgia de polvos sometidos a ultra alta presión. Se puede hacer piezas de acero u otras aleaciones sinterizadas a ultra alta presión, en tamaños que permitiría construir cualquier pieza y en general, experimentar a escala natural las experiencias realizadas en la celda del yunque de diamante, además de varias aplicaciones fuera de la metalurgia como es aplicaciones en tecnologías para preparar alimentos, corte de materiales por chorro de líquido, etc.

Primero veremos un ejemplo intuitivo, como se puede apreciar que sucede con un globo inflado, dentro de otro globo, dentro de otro y así sucesivamente; después veremos cuanto resiste una multicámara de acero normal y demostraremos que puede resistir una presión interna de un valor mucho más alto que la resistencia del material con que está hecha. Por último se demuestra también como se puede hacer mayor presión aun, desde una cámara interior que es parte de una multicámara, que ya está a ultra alta presión, hacia otra cámara que está más el interior.

## EJEMPLO INTUITIVO CON GLOBOS

Se toma un globo y se infla hasta 3.0 litros, con una presión de 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>]. Si se infla más puede reventar, porque supongamos que su resistencia antes de reventar es 0.15 [Kg/cm<sup>2</sup>]. ¿Qué le sucede si aumenta la presión, en 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>] en el ambiente en donde se encuentra? El globo, que estaba inflado a 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>], se achica. Esto permite ingresar más aire al globo de modo que recupere los 3.0 litros inicial, quedando el interior del globo a mayor presión que los 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>] que tenía en un principio.

Nuevamente supongamos que aumente la presión en el ambiente en donde se encuentra en otros 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>]. ¿Qué le sucede al globo? Nuevamente se achica. Lo anterior permite ingresar más aire al globo, de modo que recupere nuevamente los 3 litros inicial y quede con mayor presión. De igual manera, se llega a que el globo soporte 3.0 [Kg/cm<sup>2</sup>], que quede de 3 litros, mientras que en el ambiente donde se encuentra, quede a una presión de 2.9 [Kg/cm<sup>2</sup>].

Imagina que se toma otro globo, un poco más grande de modo que de algún modo, se introduce adentro el globo original inflado a 3.0 [Kg/cm<sup>2</sup>] y se infla con aire de modo que quede con 2.9 [Kg/cm<sup>2</sup>] adentro, y en el ambiente se disminuye a una presión de 2.8 [Kg/cm<sup>2</sup>]. El globo que se agregó está inflado con 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>] adicionales a las del medio. Después se pone otro globo y otro, hasta que finalmente se llega a presión atmosférica, un globo que tiene aire a 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>] y en su interior otro globo que está inflado hasta tener 0.1 [Kg/cm<sup>2</sup>] adicionales o sea 0.2 [Kg/cm<sup>2</sup>]. Y otro globo que estará adentro con 0,1 [Kg/cm<sup>2</sup>] adicionales, y otro globo... hasta que finalmente se tiene el último globo con 3.0 [Kg/cm<sup>2</sup>].

En resumen tenemos con que ningún globo, estando solo, resiste 3.0 [Kg/cm<sup>2</sup>], porque resisten 0.15 [Kg/cm<sup>2</sup>], pero si resiste 3.0 [Kg/cm<sup>2</sup>] o más, teniendo como “!protección”, otros globos que quedan concéntricos en su exterior. Si en vez de globos fueran recipientes o cámaras de acero, se puede llegar a que 20

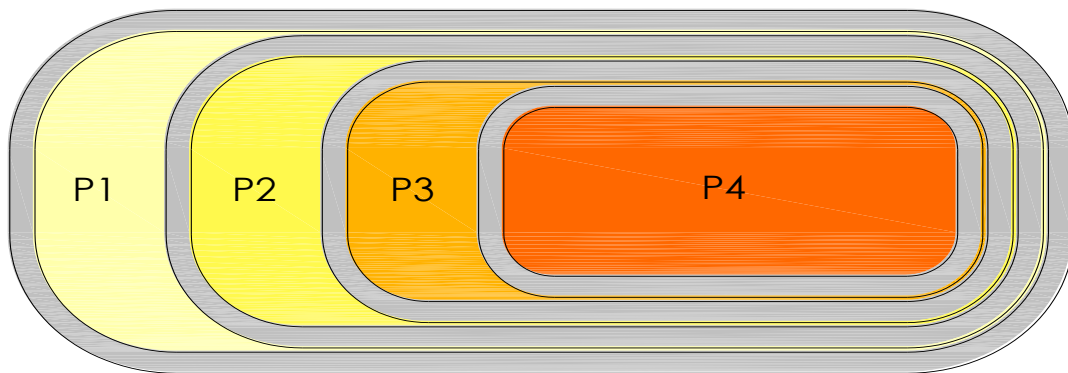
ó 30 cámaras concéntricas, pueden resistir 30.000 [Kg/cm<sup>2</sup>] o mas, pero ninguna cámara queda sometida a esfuerzos de tracción que supere su resistencia del acero que es solamente 3.000 [Kg/cm<sup>2</sup>] o similar.

## RESISTENCIA DE MULTICÁMARA

Aquí vamos a demostrar que una multicámara de acero corriente, formada por un conjunto de cámaras concéntricas, aguanta más presión que la resistencia a la tracción del material con que están hechas las cámaras.

### Cámaras Cilíndricas

Figura N° 1: Descripción de la multicámara sin sistema de elevación de presión. Es una multicámara simple de forma cilíndrica y semiesférica en los extremos.



El diámetro externo de una cámara, es levemente inferior al diámetro interno de la cámara que va inmediatamente mas al exterior, de manera que puedan montarse. No se dibuja tapas por no hacer más complicado el dibujo.

#### Cámara 1.-

P0 es la presión externa nula.

P1 la presión que resiste.

D1 es el diámetro externo y

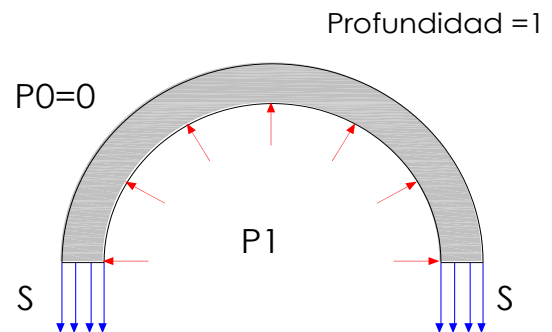
S la tensión máxima 3.000 [Kg/cm<sup>2</sup>]

Espesor paredes = 0.1 x D1

El cilindro con presión interior mayor a la externa, tiene los mayores esfuerzos en un plano que corte el eje del cilindro, como lo muestra la figura.

$$P1 \times 0.8 \times D1 = P0 \times D1 + 2 \times S \times 0.1 \times D1$$

$$P1 = 0.25 \times S$$

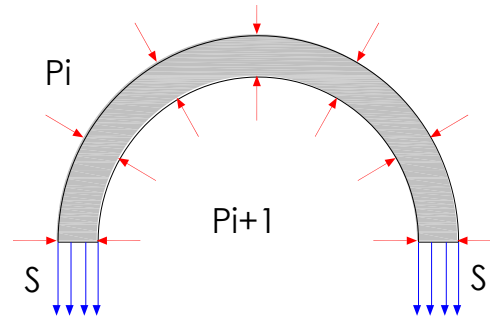


En el dibujo donde se representan los esfuerzos, el ancho o profundidad es unitario. El material es de acero, de resistencia a la tracción S es de 3.000 Kg/cm<sup>2</sup> y de espesor de paredes delgadas, es de 0.1 x D1 o menor.

En la **cámara 2**, que esta al interior de la cámara 1, tiene un diámetro externo levemente inferior al diámetro interno de la cámara 1. Para efectos de cálculo será considerada igual. El espesor de las paredes es de 0.1 x D2. Entonces la presión en la segunda cámara es:

$$P_2 \times 0.8 \times D_2 = P_1 \times D_2 + S \times 0.2 \times D_2$$

$$P_2 = 0.25/0.8 \times S + 0.25 \times S \quad P_2 = 0.5625 \times S$$



La presión  $P_2$  se logra con un émbolo y pistón que esta al interior de la cámara 1. Aquí no vamos a demostrar por que se puede elevar la presión desde la cámara 1 a la cámara 2, aquí estamos viendo cuanto resiste la multicámara. Solo vamos a poner, como límite, que la presión máxima que se puede generar con un émbolo, al interior de una cámara, es igual a  $0.8 \times S$ , mas la presión externa de la cámara. También el diámetro interno de la cámara 2, es levemente mayor al diámetro externo de la cámara 3. Pero para efectos del cálculo se considera igual; entonces :

$$P_3 \times 0.8 \times D_3 = 0.5625 \times S \times D_3 + S \times 0.2 \times D_3$$

$$P_3 = 0.5625/0.8 \times S + 0.25 \times S \quad P_3 = 0.953 \times S$$

Del mismo modo se obtiene que:

$$P_4 = 1.44 \times S \quad \text{con} \quad D_4 = 0.8^{**3} \times D_1$$

$$P_5 = 2.05 \times S \quad D_5 = 0.8^{**4} \times D_1$$

$$P_6 = 2.81 \times S \quad D_6 = 0.8^{**5} \times D_1$$

Si se prosigue con la misma metodología, se obtiene  $P_7 = 3.77 \times S$ , en que la diferencia de presión con la cámara anterior es de  $0.96 \times S$ , que supera los  $0.8 \times S$  que son los que se puso como límite. Entonces en las cámaras que siguen, estarán a una diferencia de presión conocida igual a  $0.8 \times S$  y lo que vamos a ajustar es el espesor de paredes de la cámara. Lo vamos a reducir hasta que la tensión en las paredes sea igual a los otros, es decir igual a  $S$ . Si se mantiene la regla anterior, y las paredes de la cámara son de espesor igual a  $0.1 \times D$ , quedarían con tensión menor a  $S$  y se achica el diámetro interno innecesariamente, entonces:

$$P_7 = 3.61 \times S$$

$$P_8 = 4.41 \times S$$

.....

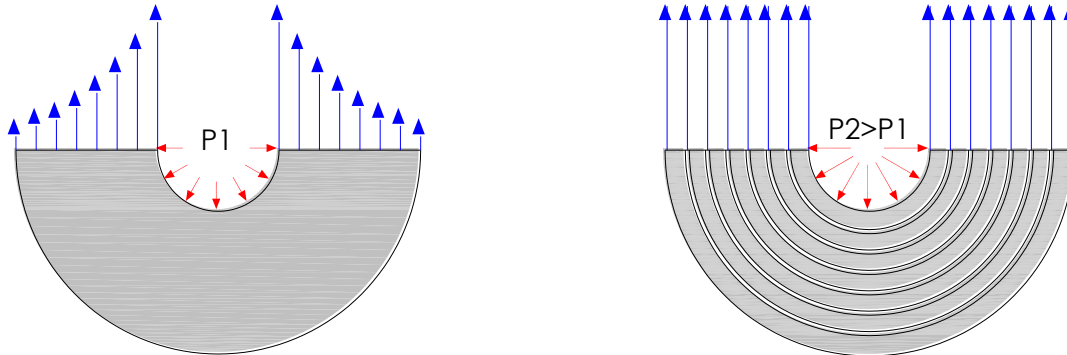
$$P_n = ( 4.41 + (n - 8) \times 0.8 ) \times S$$

Si  $n = 20$  se tiene que  $P_{20} = 13 \times S = 39.000 \text{ Kg/cm}^2$ ; supera con creces la resistencia que tiene el acero.

Entonces se ha demostrado que una multicámara o una cámara de acero, soporta sin inconveniente una presión en su interior, que no soporta el acero a la tracción, siempre y cuando la cámara en cuestión, este encerrada en otra cámara que a su vez este encerrada en otra mas externa y así sucesivamente, hasta que se llegue a la ultima cámara externa que soporta presiones “normales”.

Lo interesante es que si hay un cilindro cerrado de paredes gruesas, que constituye una cámara, pensando en que a más gruesa mayor será la presión que soporte, se deja de pensar que es más “eficiente” para maximizar la presión que soporta, poner varios cilindros de paredes delgadas, de las

**mismas dimensiones total, con presiones intermedias entre cilindros, para obtener presión mayor a la que soporta un solo cilindro de paredes gruesas.**



El de la izquierda es un solo recipiente que soporta líquido a presión. Como las paredes son gruesas aguanta de distinta manera los esfuerzos internos; a medida que es menor el diámetro, el esfuerzo en las paredes se hace mayor. En la figura de al lado hay siete cilindros concéntricos de las mismas dimensiones totales, pero con la variante que entre cada cilindro lleva líquido a presión intermedia; mas interno mayor presión. Se tiene que en el segundo caso la máxima presión es mayor a la que se logra en un solo cilindro de paredes gruesas, siendo del mismo material y no sobrepasando los esfuerzos que soportan las cámaras.

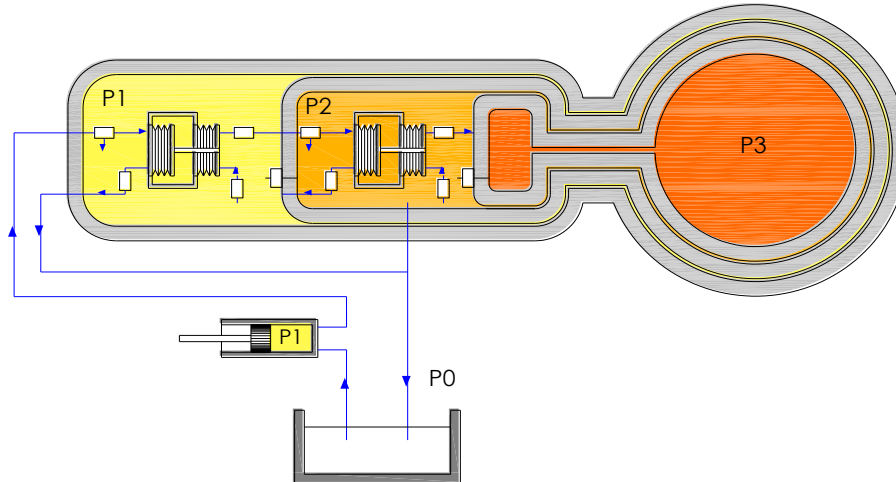
Se puede hacer el cálculo más exacto, considerando que las paredes del conjunto de cámaras es también de paredes gruesas, que no es uniforme la tensión que soporta; pero igualmente se demuestra que la presión interior que contiene la última cámara, la que en medida absoluta puede ser de varias veces la tensión máxima, no es la tensión de las paredes de la cámara que es mucho menor, por que las paredes soportan solo el diferencial de presión a que esta sometida una cámara.

## MOTOBOMBAS HIDRAULICAS

¿Cómo echar líquido a presión sobre presión... sobre presión? De manera iterativa, usando pequeños cilindros hidráulicos unidos de manera especial, como “motobombas”, un cilindro hace de motor y el otro de bomba. La nueva manera de lograr altísima presión, es por bombeo, pero no es el bombeo tradicional. A través de motobombas especiales por su simplicidad, se va bombeando el líquido ya bombeado en etapas anteriores, con motobombas sucesivas, que van instaladas en serie en un conjunto de cámaras concéntricas y que también quedan sometidas el “motor” y la “bomba” a ultra alta presión.

Dada una presión  $P_1$ , que se puede lograr con una bomba, el sistema genera condiciones para que en el ambiente que tiene la presión  $P_1$ , con un nuevo “motor” y “bomba”, se logre presiones  $P_2$ , más alta que  $P_1$ , y se aloje en un nuevo recipiente 2, que esta al interior de recipiente 1. Una vez que esta el recipiente 2, a presión  $P_2$ , repito la operación con una nueva “motobomba” que va a llenar un recipiente 3. Se repite la operación tantas veces como se desee hasta obtener  $P_{20}$  o  $P_{30}$  que es igual a 30.000 [Kg/cm<sup>2</sup>] o mas.

Se debe tener en cuenta que un recipiente, dentro de otro recipiente, dentro de otro y así sucesivamente, puede aguantar cualquier presión, no estando limitada por la resistencia del material con que se construyen, como ha sido demostrado en sección anterior.



Se dibujó fuelles en vez de cilindros, por que es mas claro comprender gráficamente.

Con más detalle. Consideremos una bomba constituida por un émbolo-cilindro, que toma líquido a presión atmosférica y lo bombea hacia un recipiente cerrado o cámara, que contiene otras cámaras menores en su interior, con sistemas de motobombas, émbolos, válvulas, etc. Pasa por una válvula de admisión llamada válvula de ingreso al motor VIM: si la presión  $P$  es menor o igual a una presión predeterminada  $P_1$ , el líquido se va al interior de la cámara, fuera de los émbolos de la motobomba 1; si la presión es superior a  $P_1$ , el líquido se va a la cámara 1, al interior del cilindro-émbolo motriz de la motobomba 1.

Al principio no hay presión por lo tanto  $P$  es menor a  $P_1$  y el líquido se va a la cámara 1, fuera de la motobomba 1. Pero después de varios bombeos, la presión en la cámara 1 alcanza a  $P_1$  y el líquido se va al cilindro-émbolo motriz de la motobomba 1, por que se abrió la válvula de ingreso al motor VIM, por acción del captor de diferencial de presión CDP (A) entre la presión exterior y la presión determinada que es  $P_1$ . Cuando el émbolo motriz de la motobomba se comienza a expandir, por el líquido que viene de la bomba exterior, también la hace el émbolo bomba, que esta solidario al émbolo motriz. Para que se expanda el émbolo bomba, toma líquido de la cámara 1 a través de una válvula de retención VR.

Cuando se llenan los émbolos; el émbolo motriz tomó líquido de la bomba que esta afuera o de la motobomba que esta en la cámara anterior y el émbolo bomba tomó líquido de la cámara donde se encuentra; se deben descargar, por lo tanto el émbolo motriz tiene una válvula de evacuación o de egreso del motor; VEM, que cuando se llena, se abre y descarga el líquido hacia la cámara anterior (o hacia afuera), que esta a menor presión. Actúa por la distancia de separación de los émbolos, cuando llega a un máximo se abre y cuando llega a un mínimo se cierra la válvula de egreso del motor VEM.

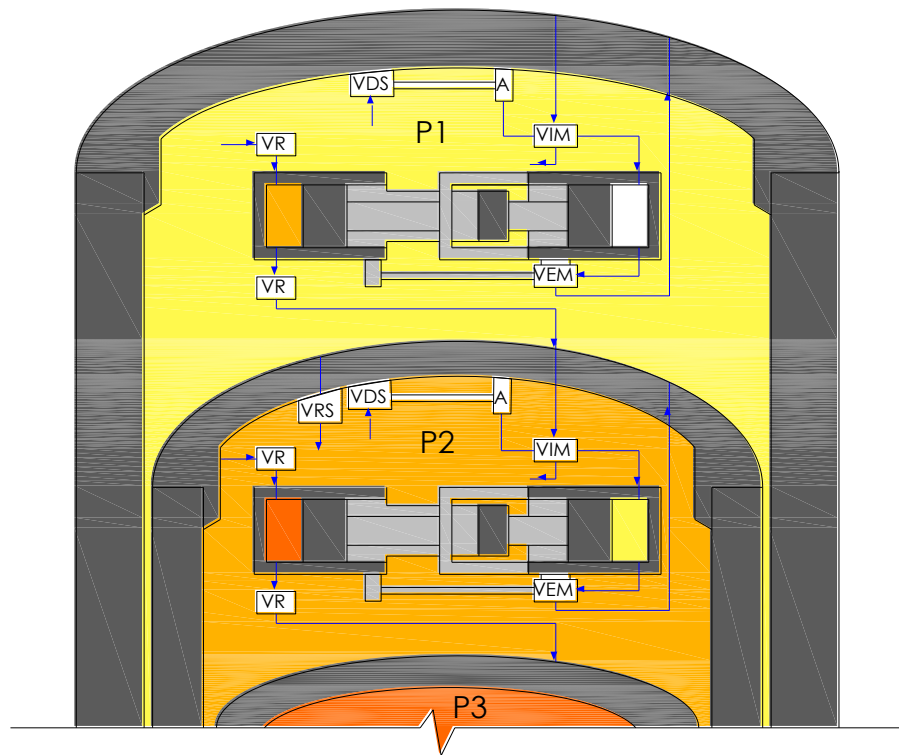
El émbolo bomba esta en condiciones de bombear el líquido a una presión mayor a  $P_1$ , por que actúa con la energía del émbolo motriz que esta a presión  $P_1$  descargando a presión menor (o nula). Hay otra cámara, cámara 2, al interior de la cámara, llamada cámara 1, que esta en condiciones de recibir líquido a presión mayor que  $P_1$ . Entonces el émbolo bomba descarga, pasando por una válvula de retención, a la cámara 2.

Esta cámara 2, como todas las cámaras, tiene una válvula de retención simple VRS, de manera que le entra líquido pero no puede salir y tiene una válvula de descarga o de seguridad VDS, de modo que si la presión dentro de la cámara, supera un valor de presión relativa, preestablecido, deja escapar líquido hacia la cámara anterior. Estas válvulas, no están conectadas con los émbolos, simplemente conectan dos cámaras pudiendo estar la que esta mas el interior a mayor presión, no así lo contrario. La otra es de seguridad, de modo que la diferencia de presión con la cámara anterior es demasiado, se abre dejando escapar un poco de líquido.

A la cámara 2, que es análoga a la cámara 1, llega el primer bombeo que hace el émbolo bomba de la cámara 1 o mejor dicho la motobomba 1. El primer bombeo que llega a la cámara 2, llega también a una válvula de ingreso al motor VIM y como la presión es menor a P2, otro valor preestablecido, no es suficiente para irse a la motobomba 2, por lo tanto se para el proceso.

Volviendo a la cámara 1, tenemos que disminuyó la presión a un valor levemente inferior a P1, ya que descargo los dos émbolos, el émbolo motriz lo descargo hacia fuera a presión nula y el otro, el émbolo bomba, a la cámara 2. De manera que le enviamos otro bombeo desde la bomba externa y esta vez se va fuera del émbolo motriz, por que la presión es levemente inferior a P1. Un bombeo adicional; una vez que recupero P1, se va a ir al interior del émbolo motriz 1 para mover al émbolo bomba 1, logrando que otro bombeo, pase a la cámara 2.

Después de repetir el proceso, tendremos P1 en la cámara 1 y P2 en la cámara 2. Un bombeo adicional llegará al motor de la motobomba 1 y simultáneamente se llenara la bomba de la motobomba 1, entonces se va a ir al interior del motor de la motobomba 2, llenándose también la bomba de la motobomba 2 del líquido que toma de la cámara 2 en donde se encuentra. Cuando descarga la bomba de la motobomba 2 a la cámara 3 y el motor de la motobomba 2, elimina también un bombeo desde la cámara 2 hasta la cámara 1, haciendo que haga trabajo en la bomba de la motobomba 2. Se repite el ciclo tantas veces para recuperar la presión en la cámara 2 y en la cámara 1, hasta que tendremos P3, otro valor predeterminado, en la cámara 3.



Actuando de esta manera, con las cámaras, émbolos y válvulas, hasta completar la cámara n, llegamos a tener Pn. Con las cámaras de material adecuado, con las motobombas, etc. se puede alcanzar Pn, que no tiene límites pudiendo alcanzarse 20.000 o 50.000 Kg/cm<sup>2</sup> y más.

Después que se somete a presión una pieza o muestra, es necesario quitarle la presión. En la tapa lleva un despiche de manera que al manipularla no se puede hacer fuerza sin antes despichar la cámara. Con este sistema se va despichando la cámara mas externa y por las válvulas de seguridad las cámaras mas internas empiezan a vaciarse, por que cuando despicho una cámara, la presión relativa de las cámaras que están mas el interior

tiende a aumentar y por lo tanto comienzan a evacuar. Puede diseñarse un sistema eléctrico de manera que se puede actuar desde afuera.

El equipamiento es el siguiente:

Válvula de ingreso al motor VIM: Esta válvula actúa ingresando el líquido proveniente de la bomba de la cámara anterior (directamente del exterior si esta en la primera etapa) y lo descarga en la cámara fuera del cilindro, si la presión es inferior a un valor preestablecido o al interior del cilindro motor si la presión es igual o mayor al valor preestablecido. Esta válvula actúa por un captor de la diferencia de presión CDP entre la cámara y la cámara anterior y esta ajustada para que se derive el líquido al motor si alcanza el valor preestablecido.

Captor de diferencial de presión CDP (A): Este captor funciona con la deformación que sufre las paredes de la cámara al recibir presión. A mayor presión, mayor deformación. Este captor consiste básicamente en una barra larga que esta al interior de la cámara, con un extremo fijo a la cámara y el otro libre. Por diferencia de presión entre la cámara y el exterior, la cámara se deforma desplazándose el extremo libre; accionando la válvula VIM, que va fija al borde de la cámara.

Válvula de egreso de motor VEM: Esta válvula permite la descarga del motor. Cuando el émbolo llega a su máximo; un tope, se activa la válvula permitiendo la descarga hacia la cámara anterior. Cuando llega a un mínimo; otro tope, se cierra la válvula y permite nuevamente el llenado.

Válvula de descarga o de seguridad VDS: Esta válvula se activa solo si actúa el captor de diferencia de presión entre las cámara y la cámara anterior, alcanza a deformar la cámara lo suficiente. Una barra delgada se aloja al interior de la cámara de modo que tiene un extremo fijo a la cámara y el otro opera una válvula de retención, fija a la cámara, solo si la deformación de la cámara es lo suficientemente alta.

Válvula de retención simple VRS: Es una válvula que hace pasar líquido solo en un sentido. En el ingreso de líquido a la bomba de la motobomba, en la descarga y al ingreso de la cámara va una válvula de retención simple VRS. Es para que nunca permita que haya más presión en una cámara que esta más el exterior

Motobomba: Dos émbolos y dos cilindros, unidos rígidamente, de manera que cuando se mueve un émbolo en su cilindro, se tiene que mover el otro émbolo en su cilindro. Va una motobomba por cada cámara.

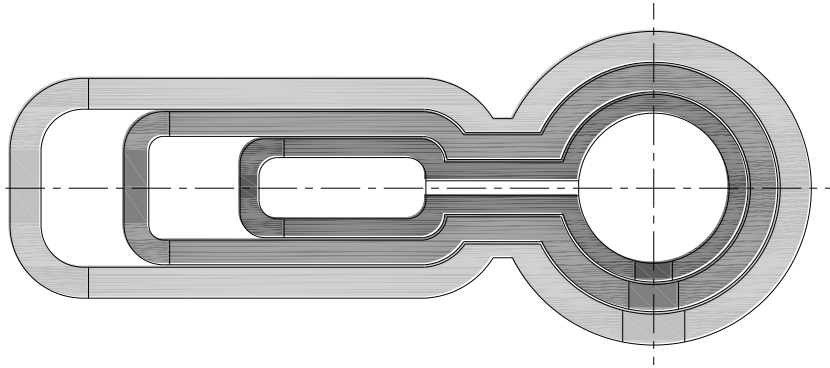
Barra del exterior de cilindro: Es una barra que va montada fija a un cilindro de la bomba de la motobomba. Se activan o desactivan las válvulas de egreso del motor VEM, que va fija en el otro cilindro.

## **MULTICAMARAS CILINDRICO ESFERICAS**

Una versión que no necesita desmontar todo el sistema de levante de presión para abrirlo y montar piezas, es que tenga doble puerta, por un lado se instalan los cilindros-émbolos, válvulas, etc. y por el otro lado lleva puertas por donde se mete el material a comprimir, sin necesidad de desmontar las motobombas. Pero mejor aun si se instalan dobles cámaras interconectadas: cilíndricas por el lado en que se montan las motobombas y esféricas, por el otro lado en que lleva puertas y no lleva motobombas, de manera que la multicámara esférica se usa solo para alojar las piezas a comprimir.

Resulta que a igualdad de diámetros una multicámara esférica, tiene mucha mayor resistencia que una multicámara cilíndrica, de modo que si se quiere tenga igual resistencia la parte cilíndrica a la esférica, esta última debe ser más ligera o debe ser de mayor diámetro interno o debe tener paredes más delgadas. Además, el lado esférico dado que no tiene motobombas, no necesita dejar espacios. Si se tiene una pieza grande de 1.0

[m3] a comprimir, se necesita una multicámara doble, con su parte esférica grande y con su parte cilíndrica de tamaño menor.



### DETALLES

Algunos aspectos que hay que tener en cuenta para que pueda actuar correctamente:

**Detalle 1.-** Cuando esta llenando el cilindro motor y el cilindro bomba, en una cámara cualquiera, no hay mayor diferencia de presión entre el interior de la cámara, fuera de los cilindros de la motobomba y al interior de los cilindros de la motobomba, de modo que si queda a medio llenar, por que se acabo temporalmente el liquido que esta enviando la motobomba de la cámara anterior, no hay problemas que transcurran 10 minutos, se puede esperar porque no hay diferencias de presión ni problema de filtraciones en la motobomba. Se mantiene a medio llenar aunque transcurra tiempo.

**Detalle 2.-** Los líquidos y sólidos, en el rango de presiones de trabajo son compresibles nada despreciables, por que es esa la cualidad que permite operar a las motobombas interiores, es por eso que las motobombas son pequeñas, del orden de 2.0 [cm<sup>3</sup>] para cámaras de 10 [lts], de manera que estando “llena” una cámara, sin presión relativa entre el interior y el exterior de esa cámara; y estando “llena” la cámara mas 50 bombeadas de 2.0 [cm<sup>3</sup>], se genera una presión relativa de la cámara por que se expandió y se contrajo el liquido, pero es una compresión manejable por que a esa compresión, después de varias bombeadas, cambia la válvula de ingreso y empieza a ingresar líquido al interior de otra motobomba que envía el liquido a una cámara mas el interior. Viendo como funcionan las motobombas estas operan por las diferencias de presión que ellas mismas generan; de modo que al “eliminar” por el bombeo que hace la bomba hacia la cámara interior simultáneamente con la “eliminación” del motor hacia la cámara anterior, no decaiga sobremanera la presión.

**Detalle 3.-** Los mecanismos para descomprimir las cámaras y para medir presión, mecanismos de seguridad, mecanismos para producir calor y medir su temperatura, etc. están hechos de manera muy rudimentaria, pero se pueden hacer por especialistas en la medida que se vaya a hacer el dispositivo concretamente.

### ¿QUE SE PUEDE HACER CON ULTRA ALTA PRESION?

Se ha demostrado que se puede hacer presión sobre presión, sobre presión indefinidamente y que no está limitada por el material que se construye el sistema y se puede hacer ultra alta presión, con motobombas y multicámaras de materiales corrientes.

Se puede hacer nuevos materiales por sinterizado a ultra alta presión de 30.000 [Kg/cm<sup>2</sup>] o 50.000 [Kg/cm<sup>2</sup>] o mas. Se puede replicar, en dimensiones “normales de tamaño real”, experiencias hechas en la Celda del Yunque de Diamante; donde es posible hacer presiones de 100.000 [kg/cm<sup>2</sup>] y mas, pero en pequeñísimas dimensiones.