

PERDIDA DE CARGA EN BOMBAS MECANICAS – PRIMERA PARTE

**EDUARDO J. DOTTORE – EDUARDO L. BAUSELA
BOLLAND & CIA S.A.**

Este trabajo fue preparado para ser presentado en las Jornadas de Sistemas de Extracción Artificial de Petróleo, organizadas por la Seccional SUR del IAPG, Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, 24-25 de octubre de 2002.

SINOPSIS

Una de las condiciones de diseño fundamental para el funcionamiento eficiente de una bomba de accionamiento mecánico, es la de permitir que el fluido ingrese a la bomba y salga de ella con el menor esfuerzo posible. La zona más restringida de la bomba la representan las jaulas, piezas que contienen las válvulas, tanto viajera como estacionaria. Siempre se ha hecho hincapié en que una jaula estacionaria con una sección de pasaje deficiente provocará un mal llenado de la bomba. Así mismo se ha insistido en que una jaula viajera con una sección de pasaje pequeña podrá provocar cierta flotación del pistón con la consiguiente consecuencia de favorecer la generación de tensiones de compresión en las varillas más profundas. Es decir, la preocupación de todo fabricante de bombas mecánicas en el ámbito internacional ha sido la de diseñar piezas con las mayores secciones de pasaje posibles.

Pero se han presentado experiencias de campo que parecían contradecir la idea generalizada que a mayor sección de pasaje de la jaula se obtenía una mejor circulación del fluido y un mejor llenado de la bomba. Se sospechó entonces que el problema radicaba en que históricamente se habían dejado de lado consideraciones de tipo fluidodinámicas, tales como variación brusca de la sección de pasaje a lo largo de la jaula, o cambios en la dirección de la vena fluida debido a curvas o frentes de choque, etc.. Es decir, la pérdida de carga que se genera al pasar fluido a través de las jaulas no habría sido considerada en la mayoría de los casos como condición de diseño.

El objetivo de este trabajo es la de presentar al productor petrolero los resultados obtenidos a la fecha en un banco de ensayo construido específicamente para medir pérdidas de carga en componentes de bombas mecánicas. Los resultados no solo permiten tener una idea comparativa de las pérdidas de carga que se presentan en piezas con aplicaciones similares, sino que además ha permitido probar distintas jaulas en la búsqueda del diseño óptimo.

INTRODUCCION

Consideremos una bomba de accionamiento mecánico, estándar, del tipo de las insertables, simple efecto, de pistón móvil y, por ejemplo, con anclaje superior.

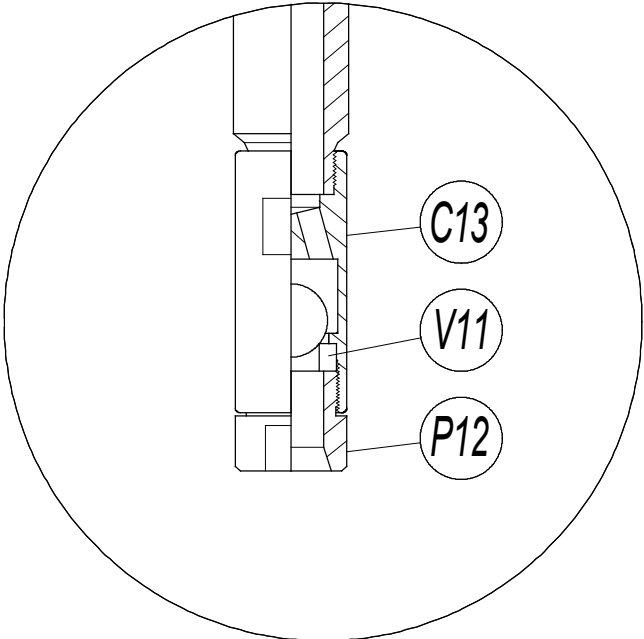
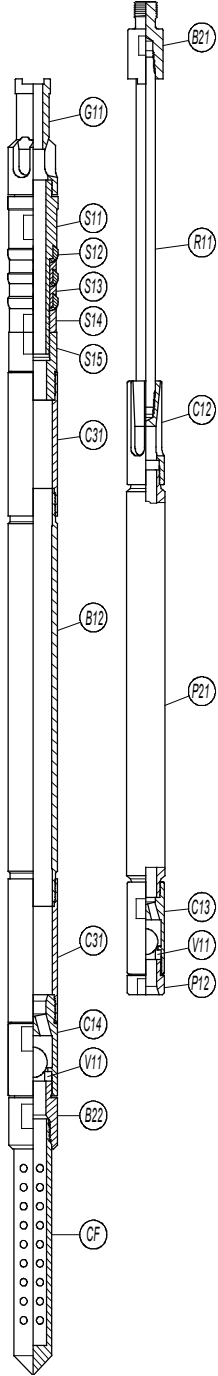


FIGURA 2

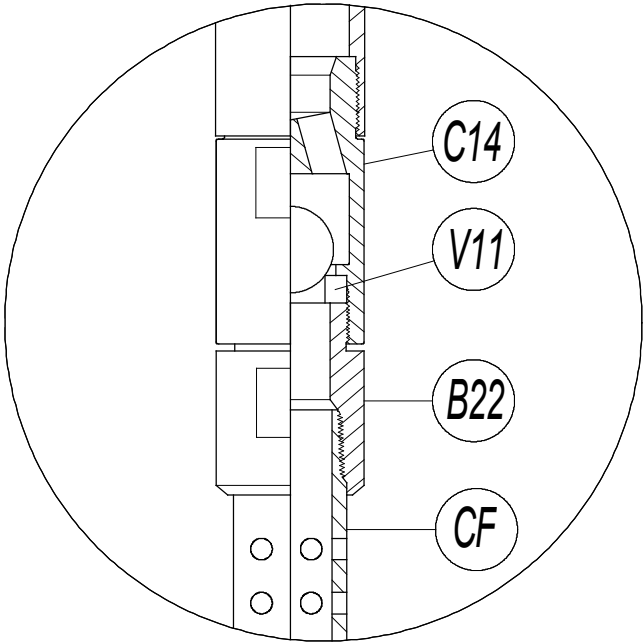


FIGURA 1

Si se analizan los componentes del subconjunto estacionario (ver Figura 1) desde aquella pieza en la parte inferior en la que ingresa el fluido, pasando por todas ellas hasta llegar a la cámara de la bomba, se verifica que por razones constructivas la sección de pasaje va decreciendo. O sea, el caño filtro tiene mejor sección de pasaje que el tapón, este a su vez mejor que el asiento de válvula y este mejor aún que la jaula, tal como se muestra la tabla siguiente:

Tabla 1: Secciones de Pasaje del Subconjunto Estacionario

TAMANO DE BOMBA	SECCIONES DE PASAJE (mm2)			
	CAÑO FILTRO	TAPON	ASIENTO	JAULA
125	485,0	452,4	337,51	186,25
175	861,0	742,6	558,65	377,62
200	861,0	742,6	558,65	377,62
225	1180,5	804,2	856,34	513,10

Nota: los valores detallados son orientativos

Haciendo el mismo análisis para el subconjunto móvil (ver Figura 2) se verifica que también en este caso la jaula es la pieza que tiene la menor sección de pasaje, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2: Secciones de Pasaje del Subconjunto Móvil

TAMANO DE BOMBA	SECCIONES DE PASAJE (mm2)		
	TAPON	ASIENTO	JAULA
125	176,7	115,35	95,77
175	506,7	337,51	186,25
200	506,7	466,83	273,82
225	804,2	558,65	377,62

Nota: los valores detallados son orientativos

Es por esta razón que se le ha dado una especial atención a las jaulas y siempre se ha tratado de darles la mejor sección de pasaje posible. Pero debido a limitaciones dimensionales existe un compromiso entre la sección resistente de las piezas y la sección de pasaje de fluido. Por lo general se verifica que dado un modelo de jaula y un determinado material, cuanto más se favorezca la fácil circulación del fluido aumentando las secciones de pasaje, más débil será la pieza debido a la disminución de los espesores que determinan las secciones resistentes. Para poder enfrentar a este problema, aparecieron diferentes diseños de jaulas tratando siempre de buscar la mejor sección de pasaje posible. En la tabla siguiente, y con carácter orientativo, se presenta un detalle de las secciones de pasaje típicas de distintos modelos o diferentes diseños de jaulas existentes en el mercado nacional e internacional.

Tabla 3: Secciones de Pasaje en jaulas

CODIGO JAULA	TAMAÑO DE BOMBA	SECCIONES DE PASAJE (mm2)			
		ESTANDAR	GUIAS DURAS	G. POSTIZAS	G. P. CALIF.
C14-20	125	186,25	192,94	223,66	333,30
C14-25	175	377,62	364,62	378,48	482,20
C14-30	225	513,10	503,52	546,89	807,50
C13-125	125	95,77	98,33	115,35	-----
C13-175	175	186,25	192,94	223,66	333,30
C13-225	225	377,82	364,62	378,48	482,20

Nota: los valores detallados son orientativos

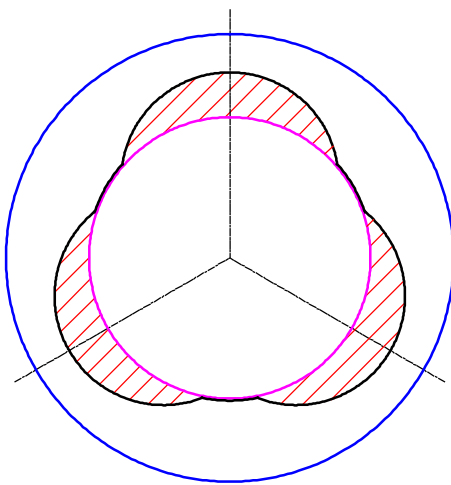


Figura 3: Jaula estándar

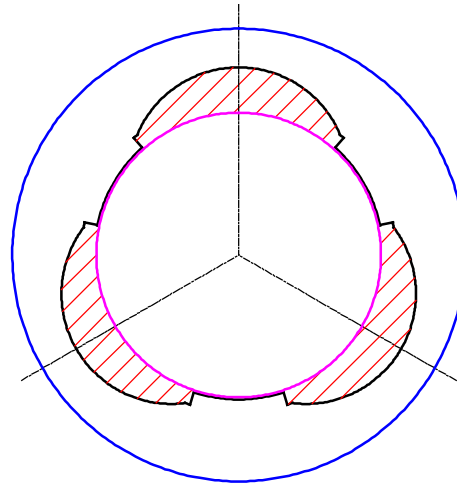


Figura 4: Jaula con guías duras

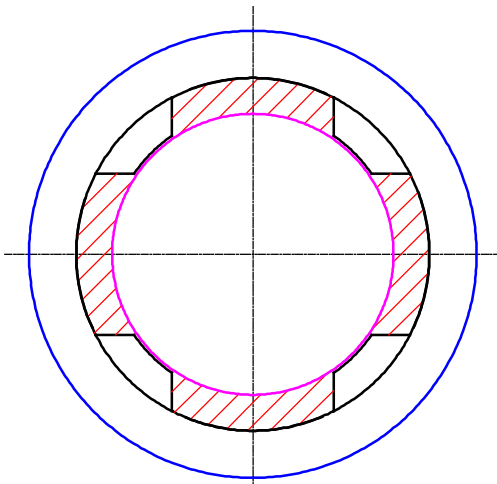


Figura 5: Jaula con guías postizas

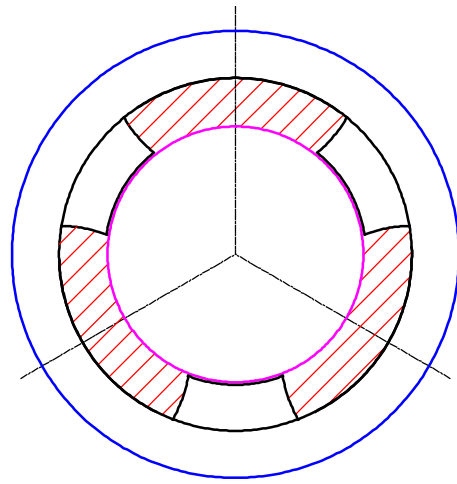


Figura 6: Jaula c/g pos. Calif. mecanizadas

Analizando la tabla anterior y basándonos en el criterio que a mayor sección de pasaje de la jaula se obtiene una mejor circulación del fluido y un mejor llenado

de la bomba, se podría asegurar que las jaulas menos recomendables serían la jaula común o regular y la jaula con guías duras. Luego vendría la jaula con guías postizas y bola estándar, para finalmente considerar a la jaula con guías postizas y bola California como altamente recomendable por la excelente sección de pasaje que presenta. Más aún, cualquier fabricante nacional o internacional podría presentar un diseño de jaula con secciones de pasajes más amplias que las cuatro jaulas antes detalladas y asegurar, basado en el criterio de las secciones de pasaje, que es la que más favorece el llenado de la bomba, la que genera una mejor circulación del fluido a través de ella y evita las posibles tensiones de compresión de las últimas varillas del fondo.

Pero la pregunta que cabe hacerse es: ¿tiene alguna importancia la forma que adopta la vena fluida al circular por dentro de la jaula? Ciertamente la tiene. Como ejemplo grotesco consideremos forzar la circulación de agua por dos piezas que tengan cada una de ellas una sección de pasaje de 100 mm². La única diferencia entre una pieza y la otra es que una tiene un único agujero de 100 mm² y la otra tiene 100 agujeros de 1 mm². La sección de pasaje es la misma en ambas jaulas pero, ¿se comportan las dos piezas de la misma manera? Pues no. Se puede tener la absoluta seguridad que no se comportan de la misma manera. No cabe la menor duda que la pieza con 100 agujeros de 1 mm² tendrá una pérdida de carga mucho mayor que la otra. En todo diseño de cañerías se tiene en cuenta las pérdidas que se incorporan al hacer circular un fluido por curvas, codos, tees, etc., es decir, por discontinuidades que generan alteraciones en la vena fluida. La pérdida de carga que se genera cuando un fluido circula por secciones de pasaje intrincadas, no es otra cosa que la pérdida de energía por fricción entre el fluido y la pieza. Es justamente esta característica de los fluidos en movimiento la que motivó el armado del banco de ensayo para medir pérdida de carga en partes componentes de bombas de accionamiento mecánico

DESCRIPCION DEL BANCO DE ENSAYOS

Tal como se muestra en la *Figura 7*, el banco de ensayos constituye un circuito cerrado por el que se hace circular forzosamente el fluido de ensayo. Está conformado por un tanque cisterna de 1000 litros, una moto-bomba centrífuga, un caudalímetro digital con una precisión de +/- 1 %, dos manómetros en baño de glicerina, una válvula de contrapresión y un sistema de cañerías.

Para efectuar el ensayo se coloca la pieza bajo estudio en el circuito montándola con los adaptadores (correspondientes a cada medida y tipo de pieza a ensayar) entre ambos manómetros. Se verifica que la válvula de contrapresión esté totalmente abierta y se enciende el motor que acciona la bomba. Esta succiona el fluido de ensayo del tanque cisterna y lo bombea al circuito haciéndolo circular por dentro de la pieza en ensayo, pasando también

por el caudalímetro y por los manómetros (instalados uno aguas arriba y otro aguas abajo de la pieza en ensayo), a través de la válvula, para finalmente retornar al tanque cisterna en donde se reinicia el ciclo de circulación.



Figura 7a: Banco de Ensayos



Figura 7b: Jaula Montada con sus Adaptadores

Por medio de la válvula de contrapresión montada en la descarga del circuito se regula el caudal que circula por el interior de la jaula. El ensayo consiste en hacer circular distintos caudales por dentro de la pieza en estudio, desde válvula de contrapresión totalmente abierta (caudal máximo) a totalmente cerrada (caudal nulo), pasando por distintos puntos intermedios que distan entre sí en 0,5 m³/h. Una vez que se verifica que se estabiliza la circulación del fluido se toma nota de los valores de presión (antes y después de la jaula) y caudal. Con estos valores se efectúan las curvas correspondientes.

INTERPRETACION DE LAS CURVAS

La *Tabla 4* muestra una planilla típica completada con la información tomada durante el ensayo.

Pieza : *Jaula de barril*

Fecha : *16 de Octubre 2001*

Código : *C14-25ABGD175*

Bola : *Regular - diametro 34,92 m/m*

Condiciones del ensayo

Fluido : *Agua dulce*

Temp. fluido : *15°C*

CAUDAL (m3/hora)	PRESIONES PSI (*)		DIF. (PSI)	DURACION DEL ENSAYO
	ANTES	DESPUES		
0,0	85	85	0	15"
1,5	85	84	1	15"
2,0	85	83	2	15"
2,5	84	83	1	15"
3,0	84	82	2	15"
3,5	84	82	2	15"
4,0	84	81	3	15"
4,5	84	80	4	15"
5,0	83	79	4	15"
5,5	83	78	5	15"
6,0	82	77	5	15"
6,5	82	76	6	15"
7,0	82	74	8	15"
7,5	81	73	8	15"
8,0	80	71	9	15"
8,5	80	69	11	15"

9,0	78	67	11	15"
9,5	77	65	12	15"
10,0	76	63	13	15"
10,5	75	60	15	15"
11,0	73	56	17	15"
11,5	71	52	19	15"
12,0	70	49	21	15"
12,5	68	45	23	15"
13,0	65	41	24	15"
13,5	63	36	27	15"
14,0	60	32	28	15"
14,5	59	27	32	15"
15,0	57	23	34	15"
15,5	55	19	36	15"
16,0	52	5	47	15"

Si se llevan los valores de la *Tabla 4* a un gráfico donde los ejes coordenados sean caudal pasante por la jaula (en el eje de las x) y diferencial de presión entre la entrada y la salida de jaula (en el eje de las y), se obtiene una curva como la mostrada en la *Figura 8*. El centro de coordenadas corresponde al punto de válvula totalmente cerrada (o sea caudal nulo) y el extremo derecho de la curva representa el caudal máximo que se obtiene a válvula totalmente abierta.

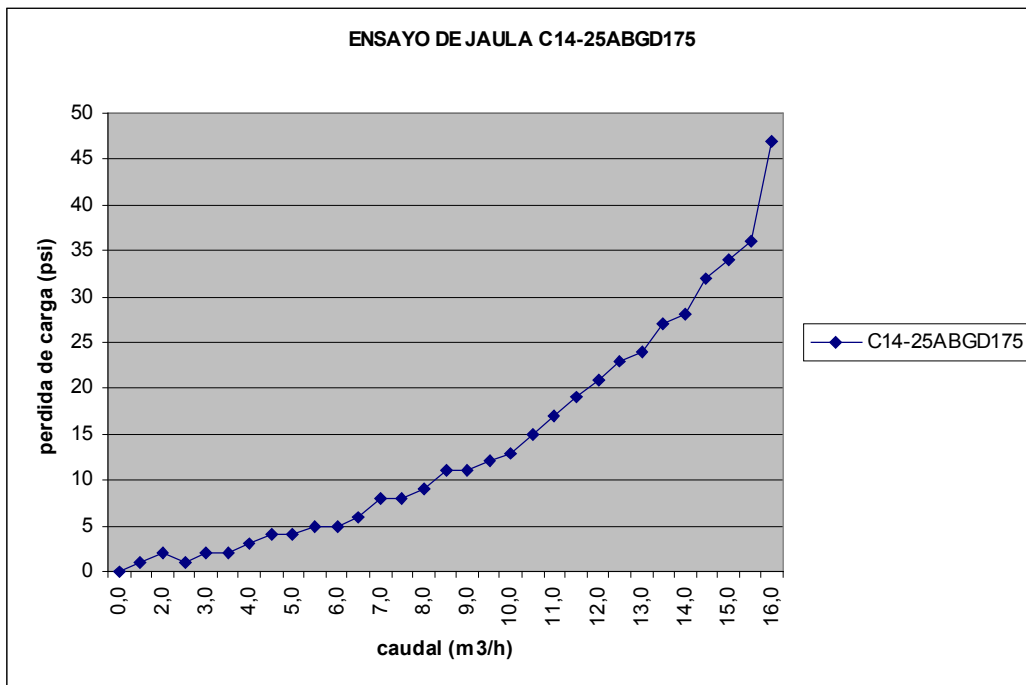


Figura 8

Las primeras conclusiones que se pueden sacar observando la curva son las siguientes:

- la pérdida de carga será mayor cuanto mayor sea el caudal que circule a través de la jaula
- la pieza será considerada mejor cuanto mas baja o cerca del eje de las x este la curva, dado que la perdida de carga es mas baja
- si la curva se acerca verticalmente (asintóticamente) a un valor de caudal dado indicaría que por esa jaula no podría circular más fluido que el valor en que la vertical (asíntota) corta al eje de las x.

REPETITIVIDAD

Para verificar si el banco es confiable se rehicieron algunos ensayos de una misma piezas en distintos momentos del día o en días diferentes como para garantizar la repetitividad de los resultados. En la *Figura 9* se pueden ver las curvas obtenidas en dos ensayos realizados en días diferentes con una jaula C14-25ABGD175.

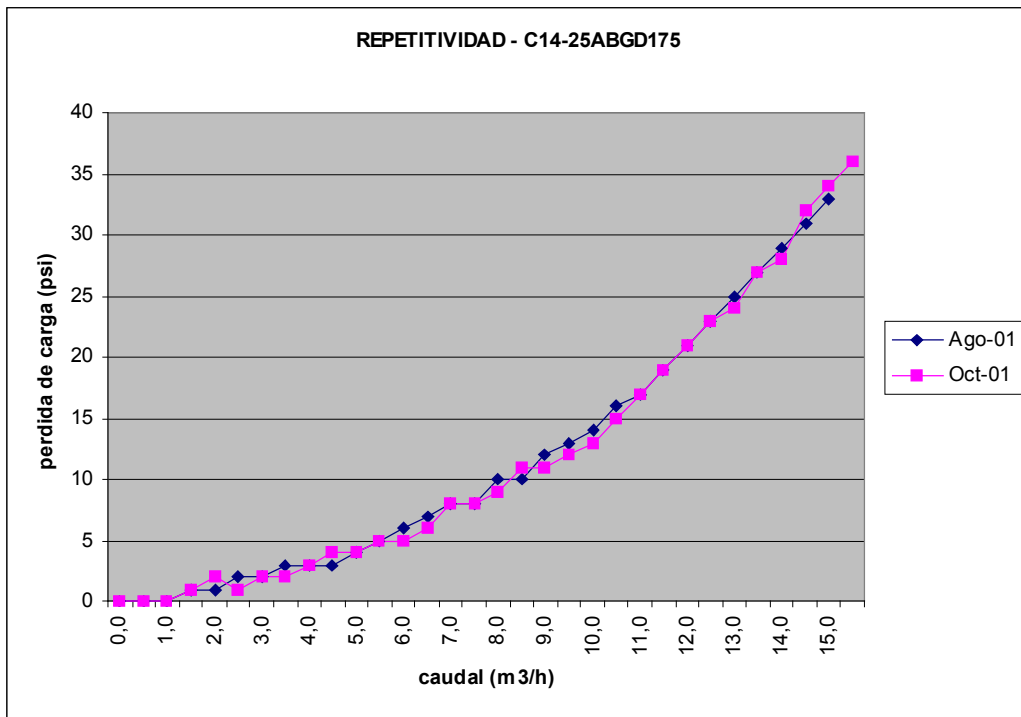


Figura 9

Como puede observarse los puntos que no coinciden difieren en 1 psi, derivado del error de lectura que se genera al tener 2 psi por división.

ENSAYO DE DISTINTOS MODELOS DE JAULAS

El objetivo fundamental de la construcción del banco de ensayos radica en la posibilidad de comparar el comportamiento de distintos diseños. Se han ensayado familias de jaulas y con los valores obtenidos se han podido elaborar gráficos que nos permiten arribar a conclusiones muy interesantes.

Consideremos por ejemplo los resultados de los ensayos obtenidos en jaulas móviles de bombas de diámetro 1 $\frac{3}{4}$ " (C13-175). Para no complicar la interpretación, en la *Figura 10* se muestra el comportamiento de solamente 5 diseños diferentes de jaulas móviles, a saber:

- C13-175AP, jaula con **guías postizas microfundida y bola estándar**
- C13-175AS, jaula con **guías duras o soldadas**
- C13-175HD, jaula **común** (fabricada en acero aleado en este caso)
- C13-175ABGD, jaula **antibloqueo** de gas con **guías duras o soldadas**
- C13-175APC, jaula con **guías postizas mecanizadas y bola California** (menor diámetro de bola que el estándar API)

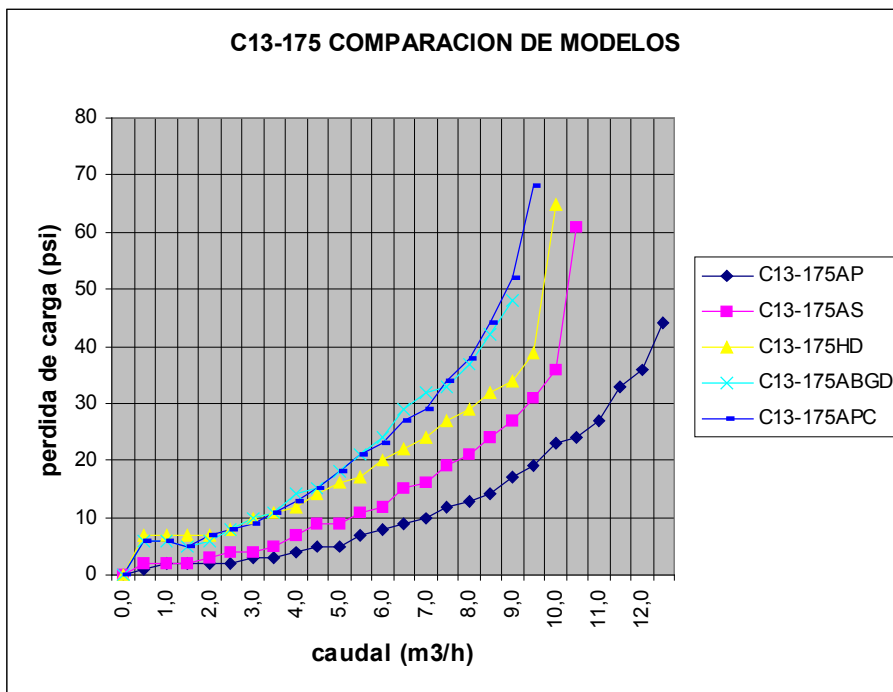


Figura 10

Como primera consideración, podemos afirmar que la mejor pieza es la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar, dado que como vemos es la que tiene la menor pérdida de carga de todas.

Si recordamos que la sección de pasaje de una C13-175 con guías soldadas es mayor que la sección de pasaje de una jaula común o regular (según vimos en la *Tabla 3* aproximadamente 193 mm² y 186 mm² respectivamente) era de esperar que la curva de aquella diera más cercana al eje de las x que la curva de ésta. Es decir, cualquier jaula con guías soldadas debería tener menor pérdida de carga que la jaula común si es que fuese función directa de la sección de pasaje. Pero si observamos a la *Figura 10*, vemos que la curva de la jaula común se encuentra comprendida entre dos curvas de jaulas con guías duras. A pesar que ambas jaulas con guías duras tienen la misma sección de pasaje dan pérdidas de carga diferentes, lo que entendemos es debido principalmente a que las piezas tienen diferentes largos.

Un resultado realmente sorprendente fue el de la jaula con guías postizas mecanizada para utilizar con bola California. Si bien esta jaula tiene aproximadamente un 50% más de sección de pasaje que la jaula con guías postizas microfundidas para bola estándar, vemos que la pérdida de carga medida en el ensayo es mucho mayor. En este caso no es el largo de la pieza el que genera una mayor pérdida de carga, sino lo intrincado del diseño del postizo mecanizado. Más adelante en párrafo aparte veremos como se utilizó el banco para mejorar distintos diseños, donde presentaremos como ejemplo los resultados de los ensayos de varios prototipos de jaulas con guías postizas mecanizadas.

Aunque las curvas presentadas para efectuar las comparaciones son específicas de jaulas C13-175, la tendencia es la misma para el resto de las jaulas. En la *Figura 11* se puede ver una familia de curvas de jaulas C13-225

Si bien este caso es la inversa que el anterior en el sentido que la sección de pasaje es algo mayor en la jaula común o regular que en la jaula con guías duras (según vimos en la *Tabla 3* aproximadamente 378 mm² y 365 mm² respectivamente), se confirma la tendencia que la curva de pérdida de carga de la jaula común se encuentra comprendida entre dos jaulas con guías duras.

También se confirma que la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar es la mejor. Notar que las secciones de pasaje de estas jaulas y las comunes en esta medida son casi iguales (378 mm² aproximadamente), pero la curva de pérdida de carga es mucho más baja en la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar.

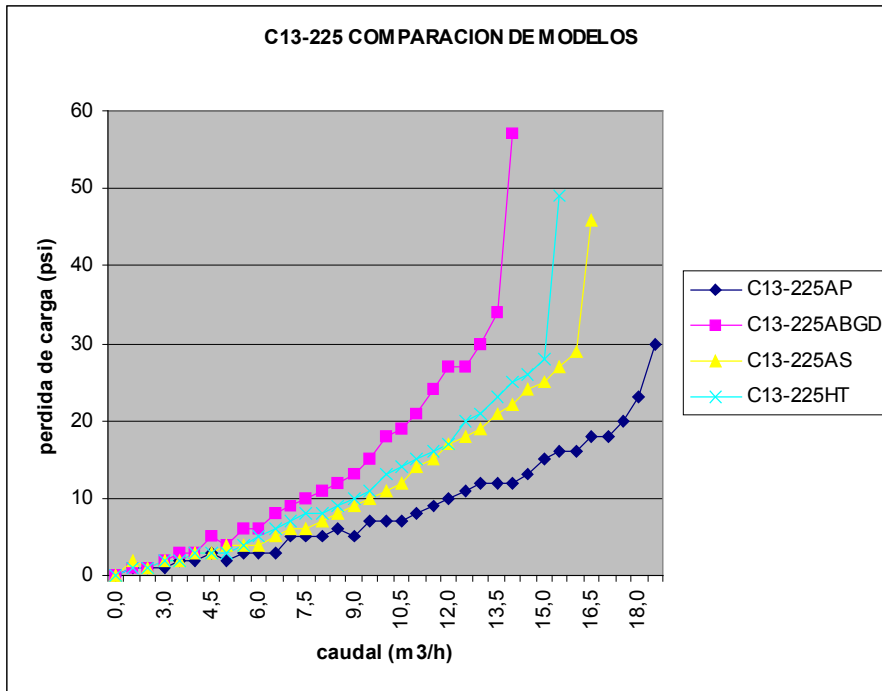


Figura 11

Vale decir que los ensayos mostrados hasta ahora confirman que **“una sección de pasaje amplia no es condición suficiente para que la pérdida de carga en la jaula sea baja”**. El caso mas significativo que confirma este hecho lo representa el ensayo realizado a jaulas importadas del Canadá. Estas jaulas, reconocidas no sólo por su amplia sección de pasaje sino también por su alto precio, tienen según lo indica su fabricante un incremento del 45 % de área respecto de la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar (en la medida de 2 ¼”). La *Tabla 5* muestra con carácter orientativo como son las secciones de pasaje de los distintos modelos de C13-225, incluyendo la Canadiense.

Tabla 5: Secciones de Pasaje en jaulas C13-225

CODIGO JAULA	SECCIONES DE PASAJE (mm2)				
	ESTANDAR	GUIAS DURAS	G. POSTIZAS	G. P. CALIF.	CANADA
C13-225	377,82	364,62	378,48	482,20	532,90

Nota: los valores detallados son orientativos

Como se ve en la tabla, la jaula Canadiense tiene una sección de pasaje superior a cualquiera de las demás jaulas de esa medida, siendo en realidad del orden del 41% cuando se la compara con la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar. Creo oportuno mencionar que el fabricante

Canadiense incluye una nota al pie del folleto que dice que sus "cálculos son estrictamente de secciones de pasaje y no están relacionados a la dinámica del flujo". Con esta afirmación parecería estar prediciendo lo que sucedería en el banco de ensayos. En la *Figura 12* se muestra el resultado de los ensayos realizados con la jaula Canadiense, y se lo compara con los resultados de la jaula con guías postizas microfundidas y bola estándar.

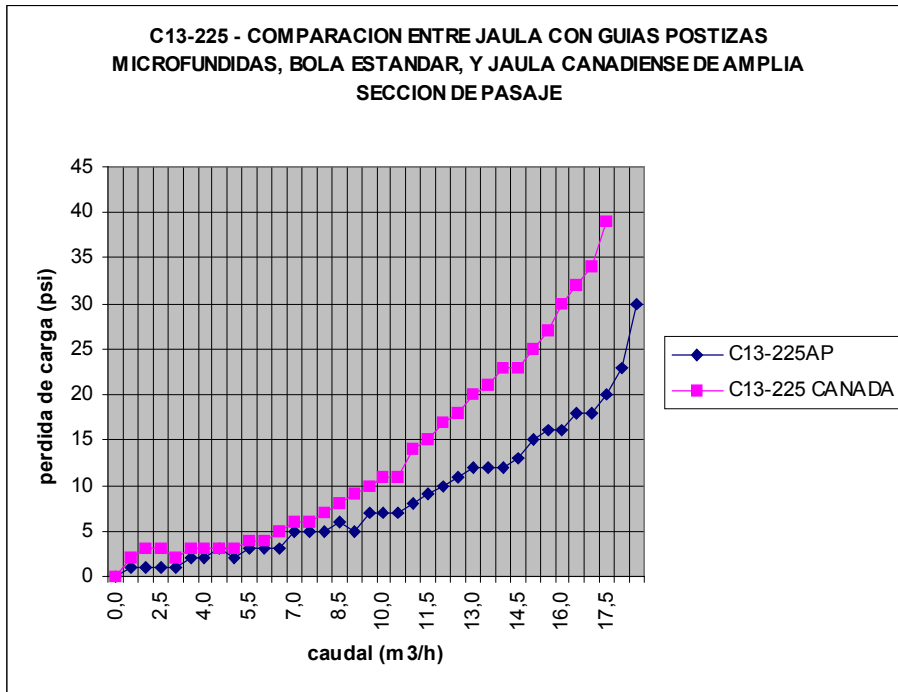


Figura 12

Como se puede observar en la *Figura 12* la jaula con guías postizas microfundidas y bola standard demostró ser la mejor de todos los diseños existentes hasta el momento de realizar los ensayos.

Lo detallado hasta aquí hace referencia a los resultados obtenidos con jaulas viajeras. Pero es importante destacar que la tendencia expuesta en los párrafos anteriores es aplicable a las jaulas estacionarias, tal como se muestra en la *Figura 13*.

Nótese que en el caso de las curvas de las jaulas estacionarias C14-25 mostradas en la *Figura 13*, la diferencia en la pérdida de carga entre la CANADIENSE y la de guías postizas microfundidas y bola estándar es mas grande que en el caso de la comparación de jaulas viajeras. Recordemos además que una mayor pérdida de carga en la jaula estacionaria se corresponde con un menor ingreso de fluido a la cámara de la bomba.

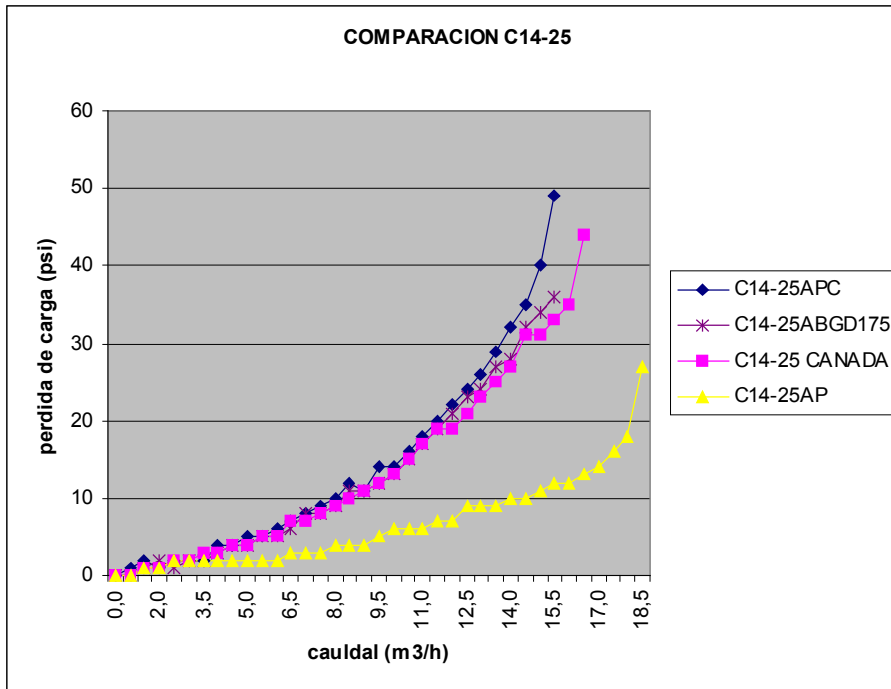


Figura 13

DISEÑO DE JAULAS NUEVAS

Una vez recuperados de la sorpresa sufrida con los resultados de los ensayos de jaulas con guías postizas mecanizadas para bola California, nos propusimos mejorar el diseño de las mismas. Creíamos que las jaulas con guías postizas microfundidas con bola estándar podían ser superadas por las jaulas con guías postizas mecanizadas para bola California, tal como intuitivamente se ha aceptado por años. Pero el desafío ahora era imaginar nuevos diseños bajo un nuevo criterio. No era ya la lucha de prescindir de una buena sección resistente a cambio de sección de pasaje, sino que era preciso idear diseños que fueran mas benignos desde el punto de vista de la dinámica de fluidos.

Se comenzaron entonces a esbozar distintos diseños. Gracias a la invaluable ayuda del software "MODELER", de Bentley Systems Corporation, que nos permite dibujar la pieza en 3 dimensiones, girarla virtualmente, rotarla, estirla, etc. (tal como se muestra en la *Figura 14*), se concluyó en que habría por lo menos cuatro diferentes modelos que podrían mejorar la performance de la jaula.

Además el diseño de las piezas estaba supeditado a que estas pudieran ser fabricadas en forma industrial. Afortunadamente la tecnología de las máquinas herramientas también evolucionó, y estos cuatro modelos eran aptos

para ser fabricados en el centro de torneado de última generación “MAZAK INTEGREX” (ver figura 15).

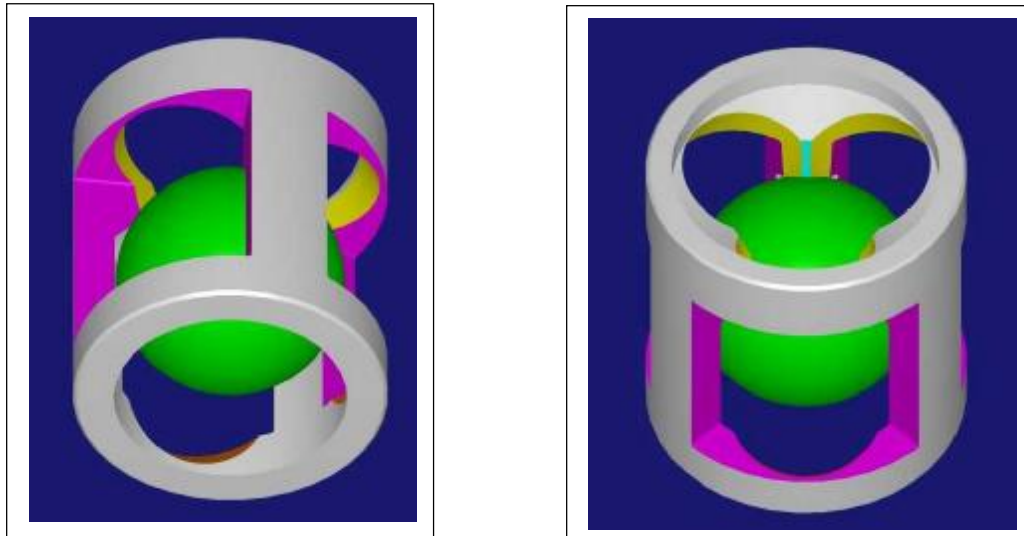


Figura 14: diseño de piezas con “MODELER” de Bentley Sytem Corporation



Figura 15: MAZAK INTEGREX

La Figura 16 muestra los resultados de los ensayos de los cuatro prototipos comparados con el diseño existente en los últimos años.

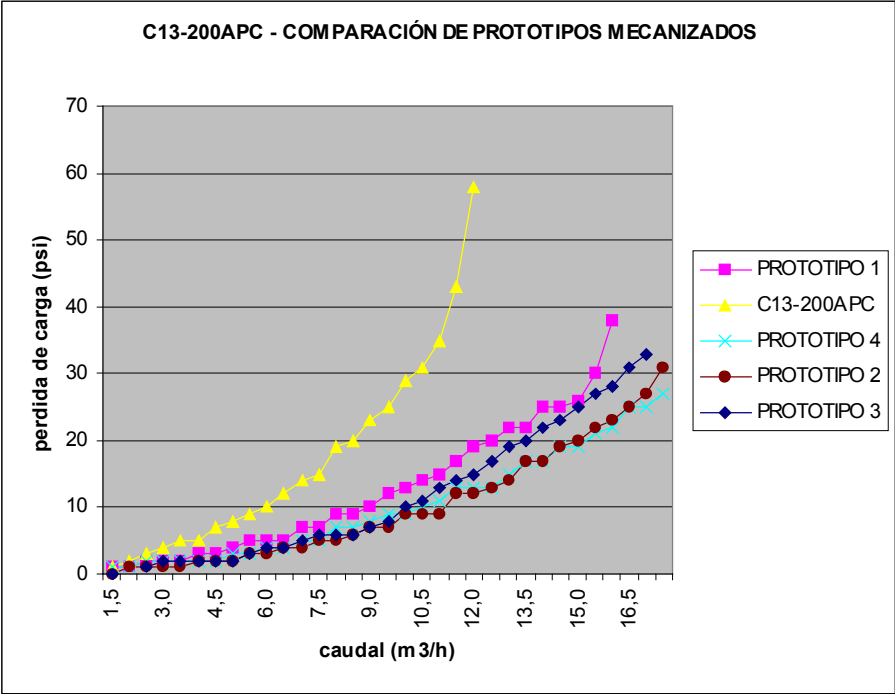


Figura 16

Como se ve en la figura, cualquiera de los nuevos diseños fueron ampliamente superiores que el diseño existente. Además, dos de los cuatro prototipos demostraron tener una pérdida de carga muy baja, por lo que finalmente se decidió modificar el diseño de la jaula con guías postizas mecanizadas para bola California y adoptar el diseño del prototipo 2. La Figura 17 muestra fotografías del diseño viejo (izquierda) y del nuevo (derecha).

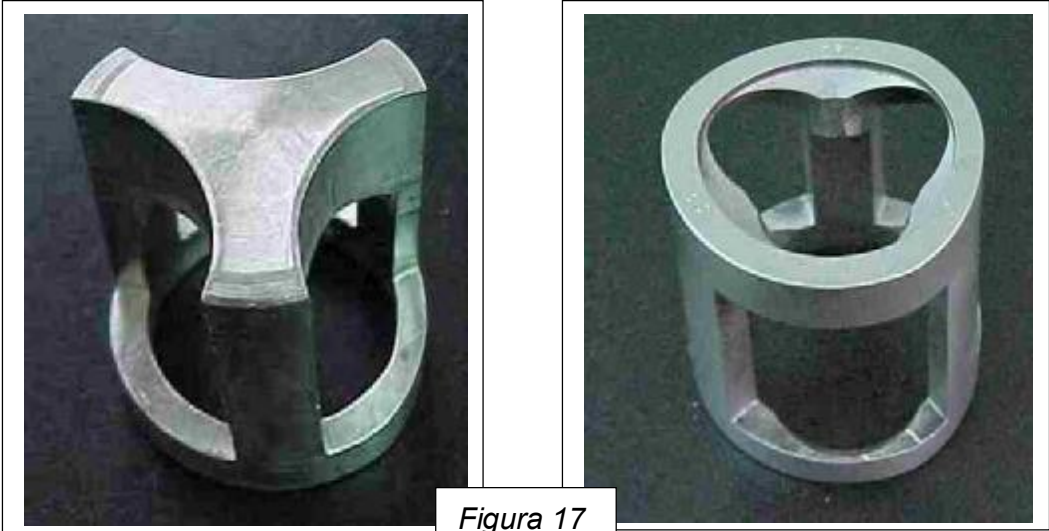


Figura 17

Nótese además en la *Figura 16* que el viejo diseño tenía una limitación que aunque se la sometiera a un diferencial de presiones infinito, por esa jaula no podría pasar un caudal instantaneo superior a la asintota a la curva, que estaría aproximadamente en los 12 m³/h.

CONCLUSIONES

- Jaulas estacionarias con amplias secciones de pasaje no garantizan un buen llenado de bomba
- Jaulas viajeras con amplias secciones de pasaje no garantizan que se evite la generación de tensiones de compresión en las varillas profundas
- Una sección de pasaje amplia no es condición suficiente para que la pérdida de carga en la jaula sea baja.
- El desafío ahora es proyectar nuevos diseños que generen la menor pérdida de carga posible en las jaulas estacionaria y viajera.