

PRESIÓN PREFERENCIAL PARA CILINDROS DE PRENSAS DE ALTO DESEMPEÑO

Guerald Seerguevitch Bobrovnichii¹

Alan Monteiro Ramalho²

João Jose de Assis Rangel³

Resumen

En este trabajo, se realizó un análisis sobre la presión preferencial con la cual se determina el diámetro externo mínimo del cilindro de la prensa y su correspondiente fuerza de trabajo. Fue determinado que para una prensa monocilíndrica, la disminución de la presión influye relativamente poco en el diámetro del cilindro. Reduciendo en hasta 30% la presión, el diámetro decrecerá solamente 5%. Sin embargo, en las prensas de cilindro compuesto, el diámetro externo es más influenciado. Comparando las presiones optimizadas en los cilindros compuestos de dos y tres anillos con el de cilindro simple, se verificó que el cilindro de dos anillos presentó una disminución del diámetro externo de 9,5%, y en el cilindro de tres anillos esa reducción fue de 13%. La optimización propuesta es usada en las prensas para la síntesis de diamantes sintéticos.

Palabras clave: Alta presión; Prensa hidráulica; Cilindro compuesto.

PREFERENTIAL PRESSURE FOR PRESS ROLLS OF HIGH PERFORMANCE

Abstract

It was performed, in this work, an analysis about the preferential pressure with which the minimum external diameter of the press roll and its correspondent workforce is determined. It was defined that the decrease of the pressure has relatively little effect on the diameter of the roll for a monolithic press. The diameter will decrease only 5% when reducing the pressure in up to 30%. However, the external diameter is more influenced in the presses of compound rolls. Comparing the optimized pressures in the compound rolls by two and three rings with the simple roll, it was verified that the roll with two rings presented a decrease of the external diameter of 9,5% and, in the roll of three rings, this decrease was of 13%. The proposed optimization is used in the rolls for the synthesis of synthetic diamonds.

Keywords: High pressure; Hydraulic press; Compound roll.

I INTRODUCCIÓN

Los cilindros hidráulicos son las partes de mayor carga y responsabilidad en una prensa. En la mayoría de los casos, son ellos los que determinan la calidad y el funcionamiento eficiente de las prensas. En otras áreas técnicas, también se utilizan recipientes o cilindros de grandes dimensiones, sometidos a alta presión. Actualmente, algunas técnicas para la obtención de un gran número de materiales son inviables sin la utilización de altas presiones [1].

La compactación de materiales en polvo, sobre presión hidrostática de líquidos o gases hasta 100 MPa, se desarrolló muy rápido [2]. Para estos procesos, es necesario

usar cilindros de elevada resistencia mecánica, dimensiones externas mínimas y con gran volumen de trabajo.

La obtención de diamantes sintéticos y otros materiales superduros está basada en la aplicación de altas presiones [3]. En función de la elevación continua de la capacidad de las prensas hidráulicas, construidas en los últimos años, se observa una tendencia de aumento de la presión del líquido de trabajo en el cilindro de las prensas hidráulicas (de 60 a 140 MPa) y también de los esfuerzos desarrollados por el cilindro [4]. Entonces, uno de los problemas de mayor relevancia en el diseño de prensas hidráulicas en general, incluyendo los equipos para la extrusión y el prensado isoestático (HIP),

¹Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

³Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – PEP, Universidade Candido Mendes – UCAM, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
E-mail: joao@ucam-campos.br

es escoger la presión óptima o preferencial, que consiste en la presión con que se obtiene el diámetro externo mínimo, para cada tipo de equipamiento. Esta presión determina las dimensiones del cilindro principal y, muchas veces, la propia capacidad de la prensa. Además, la presión óptima podrá indicar si la prensa tendrá configuración mono o multi-cilindros. Estas características dimensionales, en último análisis, determinan las dimensiones, peso y costo de la prensa en general.

Al diseñarse los cilindros, surgen dificultades insuperables, una vez que los métodos de cálculo establecidos conducen a construcciones totalmente irrealizables en relación con peso y dimensiones.

Para obtener elevada resistencia, las paredes de los cilindros deben ser gruesas y, consecuentemente, el peso y las dimensiones externas deben aumentar de tal manera que, algunas veces, el producto estará en el límite de las posibilidades de fabricación por la tecnología actual. Entretanto, datos experimentales mostraron que los cálculos existentes no representan el cuadro real del estado de tensión en las paredes de los cilindros obligando a utilizar tensiones admisibles de valores menores, dando lugar a una construcción más pesada y con dimensiones mayores [5].

A pesar de que ya existan cálculos numéricos que facilitan la determinación de las tensiones críticas, no fueron observados aspectos relacionados con la destrucción de los cilindros, principalmente de aquellos con apoyos en las coronas, después de 3-4 años de funcionamiento [6]. El carácter de esa destrucción deja claro que la ruptura es ocasionada por la fatiga del metal en los locales de gran concentración de tensiones. Por eso, se desarrollaron construcciones de cilindros sin fondo.

Una otra construcción usada en el diseño de cilindros hidráulicos es conocida como cilindro compuesto, que ha sido empleado con éxito en la industria. El cilindro compuesto es formado por varios anillos, encajados unos dentro de los otros, bajo un ajuste con interferencia, creando de esta forma tensiones previas de compresión en la superficie interna del cilindro [6].

Con la utilización de los cilindros compuestos, la optimización de construcción se tornó la principal tarea del diseñador, es decir, escoger el tamaño del encaje, los números de los anillos, y los materiales que puedan garantizar dimensiones externas mínimas bajo una determinada presión interna, o de lo contrario, en función de las dimensiones externas, obtener la presión interna máxima o el diámetro interno máximo.

Entretanto, en todos los casos, la presión de trabajo es un parámetro que determina, para una determinada fuerza axial, tanto las propias dimensiones del cilindro como las de la prensa hidráulica o de otro dispositivo para el tratamiento de materiales por presión. Desde el punto de vista de los autores, durante el proyecto de los cilindros sometidos a altas presiones, se debe, inicialmente, analizar, de forma racional, escoger una u otra presión en función de la resistencia, de las dimensiones externas y del peso del cilindro.

Este trabajo analizó la influencia de la presión sobre las dimensiones y el peso del cilindro con el objetivo de disminuir el peso del cilindro usado en las prensas de gran capacidad y/o fuerza.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Influencia de la Presión sobre las Dimensiones del Cilindro

La presión del líquido de trabajo determina el diámetro externo de cualquier cilindro. Esto, a su vez, influye en la construcción y en el peso de las prensas. Conociendo el esfuerzo de la prensa (F), se puede determinar el radio interno del cilindro de acuerdo con la Ecuación 1:

$$r = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot p}} \cdot \sqrt{F} \quad (1)$$

En la Ecuación 1, "p" es la presión del líquido de trabajo dentro del cilindro y, "F" es la fuerza nominal de la prensa.

Las tensiones en la región de mayor carga (superficie interna del cilindro) pueden ser determinadas según las fórmulas de Lamé [7]. Sumando todas las tensiones internas, en conformidad con la teoría energética de la resistencia, se pueden obtener las tensiones máximas equivalentes en la superficie interna del cilindro.

Igualando las tensiones equivalentes que actúan en la superficie interna del cilindro, la tensión admisible (σ_a) correspondiente a un determinado material, la siguiente relación puede ser obtenida para un cilindro de fondo falso o abierto de acuerdo con la Ecuación 2:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{3 \cdot R^4 + r^4}{R^2 - r^2}} \cdot p \quad (2)$$

$$R = r \cdot \sqrt{\frac{\sigma_a^2 + p \cdot \sqrt{4 \cdot \sigma_a^2 - 3 \cdot p^2}}{\sigma_a^2 - 3 \cdot p^2}}$$

Donde "R" es el radio externo del cilindro, y "r" es el radio interno.

Combinando las Ecuaciones 1 y 2, se puede obtener el diámetro externo del cilindro de acuerdo con la siguiente Ecuación 3:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_a^2 + p \cdot \sqrt{4 \cdot \sigma_a^2 - 3 \cdot p^2}}{\pi \cdot p \cdot (\sigma_a^2 - 3 \cdot p^2)}} \cdot \sqrt{F} \quad (3)$$

Analizando la Ecuación 3, se nota que, bajo σ_a y "F" constantes, el diámetro externo del cilindro disminuye con un aumento inicial de la presión y, después, comienza a aumentar. Consecuentemente, para cada material, existe una presión posible de ser determinada, en la cual el diámetro del cilindro es mínimo para una fuerza dada. Para la determinación de tal presión, denominada de óptima, basta derivar la Ecuación 3 en relación con "p" e igualar el

resultado a cero; de esa forma, se obtiene de acuerdo con la Ecuación 4;

$$P_{ot} = \frac{\sigma_a}{2\sqrt{3}} = 0,287 \cdot \sigma_a \quad (4)$$

El diámetro externo mínimo posible (D_{min}) del cilindro, bajo tal presión y para una fuerza dada, está de acuerdo con la siguiente Ecuación 5:

$$D_{\min} = 3,02 \cdot \sqrt{\frac{F}{\sigma_a}} \quad (5)$$

El gráfico correspondiente a las Ecuaciones 3 y 5 es mostrado en la Figura 1, para un esfuerzo de 10 MN. Para la determinación de las dimensiones del cilindro bajo una fuerza axial “F” cualquiera, los valores de “d” y “D” deben ser multiplicados por el coeficiente $\sqrt{F/10}$.

Si la presión es dada para la determinación del diámetro externo mínimo, es necesario escoger el material del cilindro, de determinada tensión admisible, por la siguiente Ecuación 6:

$$\sigma_a \geq 2\sqrt{3} \cdot p = 3,48 \cdot p \quad (6)$$

Es importante observar que la capacidad del material no es totalmente utilizada si $\sigma_a > 3,48 \cdot p$. Cuando se alcanza la condición $\sigma_a = 3,48 \cdot p$, la determinación de los diámetros “d” y “D” es fácilmente obtenida mediante diagramas simples, de acuerdo con la fuerza “F” de la prensa. La Figura 2

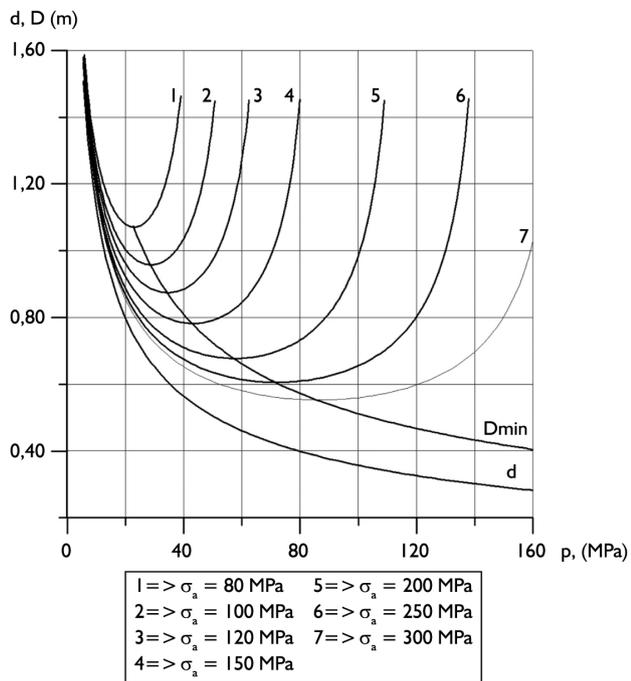


Figura 1. Dependencia entre la presión (p) y los diámetros interno (d), externo (D), y el diámetro mínimo posible (D_{min}) del cilindro; para una fuerza axial (F) de 10 MN y materiales de características mecánicas (σ_a) diferentes.

ilustra la utilización de uno de estos diagramas, donde es ejemplificado para un material con σ_a = 230 MPa (punto 1), se encuentra la presión de 63 MPa (punto 3) en función de la recta de presión óptima (punto 2). La intercepción del prolongamiento de la recta formada por estos dos puntos con la curva de la fuerza F = 100 MN (punto 4) determina el diámetro externo mínimo D = 2 m (punto 5) y el diámetro interno d = 1,42 (punto 6).

El perfil de las curvas de la Figura 1 que tanto bajo el aumento de la presión en comparación con la presión óptima, cuanto bajo la disminución de ella, el diámetro necesario del cilindro se aumenta. Es interesante analizar la influencia sobre las dimensiones del cilindro y los desvíos de la presión óptima. Para eso, se utiliza la Ecuación 3.

Si el diámetro externo del cilindro bajo presión óptima P_{ot} es indicado por el D_p y, bajo una presión cualquiera, por “p”, puede ser obtenida la siguiente Ecuación 7:

$$\frac{D}{D_p} = \sqrt{\frac{(\sigma_a^2 + p \cdot \sqrt{4 \cdot \sigma_a^2 - 3 \cdot p^2}) \cdot (\sigma_a^2 - 3 \cdot p_{ot}^2) \cdot p_{ot}}{(\sigma_a^2 + p_{ot} \cdot \sqrt{4 \cdot \sigma_a^2 - 3 \cdot p_{ot}^2}) \cdot (\sigma_a^2 - 3 \cdot p^2) \cdot p}} \quad (7)$$

Si la razón $\frac{p}{P_{ot}} = \beta$, entonces $p = \beta \cdot p_{ot}$, que substituyendo en las Ecuaciones 4 y 7, se concluye en la Ecuación 8 que

$$\frac{D}{D_p} = 0,696 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,287 \cdot \beta \cdot \sqrt{4 - 0,247 \cdot \beta^2}}{\beta \cdot (1 - 0,247 \cdot \beta^2)}} \quad (8)$$

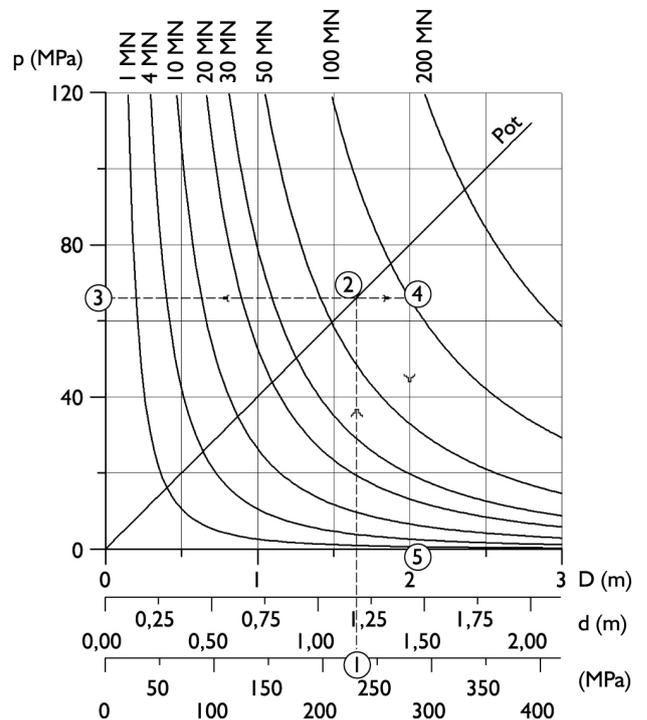


Figura 2. Diagrama para la determinación de las dimensiones preferenciales del cilindro bajo una determinada fuerza axial (F) y características mecánicas (σ_a).

Evidentemente que la Ecuación 8 sólo es válida para el intervalo $0 < \beta < 2$, pues cuando “ β ” tiende a cero, el diámetro externo, de acuerdo con la Ecuación 8, aumenta sin límites. Esto corresponde al caso de presiones muy bajas. Cuando “ β ” tiende a 2, las dimensiones del cilindro también aumentan; físicamente, esto significa que es imposible diseñar un cilindro en que se mantiene la condición presentada en la Ecuación 2 bajo una presión interna igual a $p \geq 2 \cdot P_{ot}$.

La relación D/D_p de “ β ” para el intervalo $0 < \beta < 2$ (de la Ecuación 8) es mostrada en la Figura 3. El análisis de esta relación muestra que, si se disminuye la presión, en comparación a la óptima, en 30% ($\beta = 0,7$), un aumento de 5% es ocasionado en el diámetro externo del cilindro. Y una disminución de 40% de la presión causa, en el diámetro externo, un aumento de solamente 9%. Considerando que las presiones elevadas, además de aumentar los costos, complican la transmisión hidráulica, dificultando la operación de la prensa, las mismas ocasionarán la disminución de la presión de trabajo de 30 a 35% en comparación con la determinada en (4). Entonces, la presión preferencial de trabajo del cilindro es $p = (0,65 / 0,70) P_{ot}$.

2.2 Influencia de la Presión sobre los Pesos de los Cilindros

Es interesante analizar la variación del peso del cilindro en función de la presión aplicada. El peso de un cilindro con longitud “ L ” puede ser expresada, considerando las Ecuaciones 1 y 3 de la manera que se presenta en la Ecuación 9:

$$M = L \cdot \gamma \cdot F \cdot \frac{3 \cdot p + \sqrt{4 \cdot \sigma_a^2 - 3 \cdot p^2}}{\sigma_a^2 - 3 \cdot p^2} \quad (9)$$

Donde “ γ ” es el peso específico del material del cilindro.

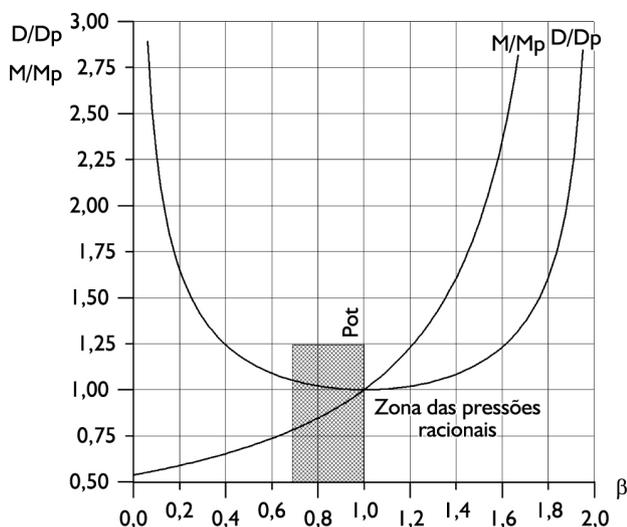


Figura 3. Cambios en las dimensiones (D/D_p) y en peso (M/M_p) del cilindro cuando ocurre el alejamiento de la presión en relación con la presión preferencial.

La razón de los pesos del cilindro sujetas a las presiones “ p ” y “ p_{ot} ” y bajo las mismas condiciones definidas anteriormente puede ser expresada por la Ecuación 10:

$$\frac{M}{M_p} = 0,269 \cdot \frac{0,861 \cdot \beta + \sqrt{4 - 0,247 \cdot \beta^2}}{1 - 0,247 \cdot \beta^2} \quad (10)$$

A partir de la Ecuación 10, se concluye que el peso del cilindro disminuye bastante con el decrecimiento de la presión (Figura 3). Para una disminución de 30% respecto a la presión óptima, el peso del cilindro disminuye 23% (para 40%, esa reducción es de 28,8%).

Por lo tanto, como criterio para la disminución del peso, se torna más racional disminuir la presión entre 30 y 35% en relación con la óptima. Analizando las curvas mostradas en las Figuras 1 y 3 en función de los materiales utilizados en la construcción de los cilindros grandes ($\sigma_a \leq 300$ MPa), se puede determinar que la presión preferencial se encuentra en el intervalo $40 \leq P_p \leq 85$ MPa.

Un aumento posterior de la presión sólo es racional cuando se utilizan materiales más resistentes ($\sigma_a \geq 600 \dots 1000$ MPa), que sean posibles de ser fabricados a través de la conformación plástica de grandes lingotes.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En los últimos 50 años, se han utilizado cilindros compuestos de dos o más anillos. En principio, tales cilindros utilizan presiones de modo racional (optimizadas), permitiendo la obtención de cilindros de menores tamaños. Las dimensiones mínimas para el cilindro compuesto pueden ser determinadas a partir de la Ecuación 11:

$$\frac{r}{R} = \sqrt[3]{1 - \frac{p \cdot \sqrt{3}}{n \cdot \sigma_a}} \quad (11)$$

Donde “ n ” es el número de bocinas en el cilindro compuesto, hechos del mismo material.

La presión óptima puede ser expresada de la siguiente manera en la Ecuación 12:

$$P_{ot} = \frac{n}{\sqrt{3 \cdot (n+1)}} \cdot \sigma_a \quad (12)$$

Sustituyendo “ P_{ot} ” de la Ecuación 12 en 11, y combinando con “ r ” de la Ecuación 1, tendremos la Ecuación 13:

$$D_{min} = 1,51 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{n+1}{n}\right)^n} \cdot \sqrt[3]{\frac{F}{\sigma_a}} \quad (13)$$

Como ha sido mencionado, para una disminución de 30 a 35% de la presión, en relación con la óptima, la Ecuación 12, dentro de un raciocinio lógico, puede ser transformada en la Ecuación 14:

$$p_p = \frac{(0,65 \dots 0,7)}{\sqrt{3} \cdot (n+1)} \cdot \sigma_a = (0,37 \dots 0,4) \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \sigma_a \quad (14)$$

Las Ecuaciones 13 y 14 muestran que, cuando se utilizan cilindros compuestos, se torna posible aumentar el nivel de presión del líquido del sistema hidráulico y, también, disminuir las dimensiones de los cilindros. Hay que señalar que, para las mismas dimensiones admisibles, la disminución de las dimensiones es muy pequeña. Así, con la utilización de un cilindro de dos bocinas, el diámetro externo disminuye cerca de 9,5%. Para el cilindro de tres bocinas, esa reducción está alrededor de 13%, cuando comparados con el diámetro externo del cilindro simple. Pero, para la evaluación del cilindro compuesto, es necesario considerar que el diseño de las prensas de alto desempeño a veces exige la fabricación de esos cilindros con una fuerza de 100 a 300 MN. Entretanto, para la fabricación de esos cilindros, se debe tener en cuenta que sus dimensiones y su peso ya están en el límite de la tecnología de fabricación. De este modo, una disminución de 10 a 20% en las dimensiones puede significar la posibilidad de fabricación de esos cilindros. Aparte de eso, en las secciones menores es más, fácil garantizar elevadas propiedades mecánicas del material usado en la aplicación de la construcción del compuesto, lo que permite aumentar el nivel de las tensiones admisibles. Por otro lado, en la construcción de prensas para la fabricación de materiales superduros, la disminución de los espacios en la región central de trabajo está ligada directamente a la utilización de los cilindros compuestos

REFERENCIAS

- 1 Juza J. An equation of state for water and steam in the range from 1000 to 10000bar. Phana: Academia; 1986. (Rozpravy Ceskoslovenske Akademie Ved, Rada Techicky Ved, Pocnik 76, Sesiti 3). Ruso.
- 2 Recent trends in cold and warm isostatic pressing equipment. MPR. 1987;(9):614-618. Ruso.
- 3 Bobrovnichii GS, Belovol VS. Nuevas prensas hidráulicas para la producción de materiales superduros. Nuevas máquinas y tecnologías para forjas. Moscú: VNIIMETMASH; 1991. p. 15-24. Ruso.
- 4 Ueda M, Okamoto H. Ultra-high pressures generating apparatus. Kobelco. Technology Review. 1991;(12):37-42.
- 5 Rozanov BV, Goldman LD, Maximov LI. Estudio y cálculo de las tensiones en los cilindros hidráulicos. Vestnik Mashinostroenia. 1964;N5:16-37. Ruso.
- 6 Bogdanov EF. Como escoger la presión del líquido de trabajo para el diseño de prensas hidráulicas. Máquinas y tecnología de conformación de los metales por presión. Moscú: Mashgiz; 1980. Ruso.
- 7 Timoshenko S. Resistência dos materiais. 3. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico; 1976.

Recibido en: 14 Jul. 2015

Aceptado en: 9 Set. 2015

de dos anillos. Por ejemplo, para la prensa de 2500 Ton. instalada en la Universidad Estadual do Norte Fluminense (UNEF), se utiliza presión de 125 Mpa en el interior del cilindro compuesto de dos anillos, permitiendo reducir el peso de la prensa en hasta 10 Ton.

4 CONCLUSIONES

Fue elaborada una concepción sobre la posibilidad de disminuir las dimensiones y pesos de los cilindros hidráulicos, manteniendo la misma fuerza axial.

Ha sido determinado que, para los cilindros simples de grandes dimensiones, la presión de trabajo no debe ser mayor que $p \leq 0,287 \cdot \sigma_a$ y tiene que ser inferior a 70 MPa.

Para el uso de cilindros compuestos, se ha definido que también es necesario disminuir la presión de trabajo en relación con la presión óptima.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (Capes), del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y el Estado de Río de Janeiro Fundación de Investigación Carlos Chagas Filho (FAPERJ) de apoyo financiero para esta investigación. También agradecen a María Marta García por su ayuda en la corrección del texto en Español.