

DISEÑO DE MOLDES PARA BUJES DE PULVIMETALURGIA USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

**Ing. Raúl Olivares Renny¹, MSc. Jesús Alfonso García², Dr.C. Marcelino Rivas
Santana², Ing. José Rafael Pérez Carrasquel¹**

- 1. Universidad Politécnica Territorial del Alto Apure “Pedro Camejo”, Mantecal, Venezuela*
- 2. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.*

Resumen.

El siguiente proceso de pulvimetalurgia tiene como objeto fabricar bujes requeridos para los motores de arranque de los tractores Agrinar, pertenecientes a las empresas de producción social de la región por otro lado también beneficiará a los pequeños y medianos productores de la zona, ya que los bujes son piezas que sufren excesivo deterioro por las condiciones del ambiente de trabajo y uso excesivo de los distintos equipos. Como objetivo principal se propone realizar el diseño de los moldes para la fabricación de bujes de los motores de arranque de los tractores Agrinar de la CVA “Pedro Camejo”, rehabilitando así a las mismas para su normal funcionamiento. Se diseñaron las matrices y los punzones a emplear en el proceso y a los cuales se le comprobó la resistencia mecánica empleando el método de elementos finitos.

Palabras claves: Pulvimetalurgia, Bujes, FEM, elementos finitos

1. Introducción

El progreso de la economía del país lo determina el desarrollo en la fabricación de maquinaria y sus componentes, por lo que es de vital importancia la producción de piezas por el proceso de la pulvimetalurgia. Casi todas las piezas de las maquinarias y equipos son fabricadas por medio de fundición y mecanizado. Son muy pocas las partes de estas maquinarias que se fabrican por el proceso de la metalurgia de polvo.

La pulvimetalurgia convencional y el sinterizado, es un proceso que se empezó a aplicar de forma industrial a principios del siglo XX.

La pulvimetalurgia: Es un proceso de fabricación de piezas estructurales por medio de polvos metálicos puros o aliados. La aplicación fundamental de este proceso es en aquellos bujes de complejidad tal, que dificultan grandemente su obtención por otros métodos de mayor simplicidad como la forja o el maquinado, entre otros (Ruiz, 1997).

En líneas generales, la elaboración de una pieza consiste en dar a la mezcla de polvo la forma deseada y posteriormente dotar a la pieza de las propiedades mecánicas finales, existiendo para ello diversos procedimientos. No obstante, salvo ligeras variantes el proceso de fabricación se subdivide fundamentalmente en cuatro etapas:

La elaboración y preparación del material, la compactación, el sinterizado y en determinados casos la ejecución de operaciones suplementarias.

Mucha experiencia en los numerosos recursos prácticos a los que a menudo hay que acudir, así como capacidad especial para idear y aprovechar tales recursos.

En el IV congreso internacional de metalurgia de transformación Landauro et. al. (2010.), mostraron un estudio de las propiedades de materiales sinterizados a base de polvos de hierro, grafito y cobre.

Mostrando que muchas de las piezas fabricadas por pulvimetalurgia pesan menos que otras fabricadas por otro proceso, también presentan una gran gama de piezas que pueden ser fabricadas por este método, se explica el proceso desde la fabricación del polvo el mezclado, prensado, sinterizado, calibrado, mecanizado y tratamiento térmico.

El producto de mayor aplicación producido por pulvimetalurgia con materiales base cobre son los cojinetes de contacto deslizantes (bocinas). La composición típica de estas piezas es cobre y estaño, cuyos porcentajes varían acorde con las propiedades mecánicas que deben garantizar las piezas durante su explotación.

La densidad que se logra por estos métodos es de aproximadamente un 75%, lo que garantiza una porosidad razonable con una resistencia a la compresión en los rangos de 138-240 MPa con un buen coeficiente de fricción.

2. Conceptos fundamentales utilizados en la metalurgia de los polvos.

Una de las piezas críticas de estos equipos son los bujes de los motores de arranques de los tractores AGRINAL MODELO 120T-4. Debido a que llevan un uso continuo de horas de trabajo; los bujes de los motores de arranque sufren desgastes severos y dificulta su perfecto funcionamiento. Uno de los procesos tecnológicos utilizados para la fabricación de bujes es la pulvimetalurgia, la cual garantiza buenas propiedades mecánicas y bajos costo de producción, el desarrollo de esta tecnología también servirá de apoyo a las prácticas en el laboratorio de materiales de la U.P.T.A.A.P. y la comunidad apureña en general.

La pulvimetalurgia es un proceso de fabricación de piezas estructurales por medio de polvos metálicos puros o aliados (Ruiz, 1997).



Figura 1. Piezas típicas realizadas por pulvimetalurgia.

Las principales características de los polvos a considerar son:

Forma, finura, distribución, capacidad para fluir, propiedades químicas, compresibilidad, densidad, densidad, propiedades de sintonización.

Forma. La forma del polvo depende de la manera en la que se produjo el polvo, esta puede ser esférica, quebrada, dendrítica, plana o angular.

Finura. La finura se refiere al tamaño de la partícula, se mide por medio de mallas normalizadas, las que consisten en cribas normalizadas, las que se encuentran entre las 36 y 850 micras.

Distribución de los tamaños de partículas. Se refiere a las cantidades de los tamaños de las partículas que participan en la composición de una pieza de polvo, esta distribución de tamaños tiene gran influencia en la fluidez y densidad de las partículas y en la porosidad final del producto.

Fluidez. Es la propiedad que le permite fluir fácilmente de una parte a otra o a la cavidad del molde. Se mide por una tasa de flujo a través de un orificio normalizado.

Propiedades químicas. Son características de reacción ante diferentes elementos. También se relacionan con la pureza del polvo utilizado.

Compresibilidad. Es la relación que existe entre el volumen inicial del polvo utilizado y el volumen final de la pieza comprimida. Esta propiedad varía considerablemente en función del tamaño de las partículas de polvo y afecta directamente a resistencia de las piezas.

Densidad aparente. Se expresa en kilogramos por metro cúbico. Esta debe ser constante siempre, para que la pieza tenga en todas sus partes la misma cantidad de polvo.

Sinterización. Es el proceso por medio del cual con el aumento de la temperatura, las partículas de los cuerpos sólidos se unen por fuerzas atómicas. Con la aplicación de calor, las partículas se presan hasta su más mínimo contacto y la efectividad de las reacciones a la tensión superficial se incrementa. Durante el proceso la plasticidad de los granos se incrementa y se produce un mejor entrelazamiento mecánico por la formación de un lecho fluido. Cualquier gas presente que interfiera con la unión es expulsado. Las temperaturas para el sinterizado son menores a la temperatura de fusión del polvo principal en la mezcla utilizada.

Existe una amplia gama de temperaturas de sinterizado, sin embargo las siguientes han demostrado ser satisfactorias.

Hierro	1095 °C
Acero inoxidable	1180 °C
Cobre	870 °C
Carburo de tungsteno	1480 °C

El tiempo de sinterizado varía entre los 20 y 40 minutos.

Ventajas y limitaciones del proceso de producción por la metalurgia de los polvos.

1-La producción de carburos sinterizados, cojinetes porosos y bimetálicos de

2-capas moldeadas, sólo se puede producir por medio de este proceso.

3-Porosidad controlada

4-Tolerancias reducidas y acabado superficial de alta calidad

Por la calidad y pureza de los polvos producidos, se pueden obtener también piezas de alta pureza.

5-No hay pérdidas de material

6-No se requieren operarios con alta calificación.

3. Materiales para bujes.

Los cojinetes se diseñan para que trabajen bajo determinadas condiciones de funcionamiento, siendo muy variadas, en algunos casos se someten a bajas o altas cargas de trabajo con diferentes velocidades de trabajo.

Las cargas pueden ser fijas, alternativas, rotatorias, oscilantes y hasta combinadas. Por otra parte el cojinete puede estar sometido a altas temperaturas en presencia de partículas abrasivas, etc.

No puede existir un metal único capaz de satisfacer todas las condiciones de funcionamiento a que están sometidos los cojinetes. Cada material presenta características que pueden ser favorables para determinadas condiciones favorables para determinadas condiciones de operación, pero presentan desventajas frente a otras.

Entre los requisitos que deben cumplir los materiales tenemos:

- Buena resistencia a la compresión.
- Resistencia al rayado.
- Resistencia al desgaste.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia a la corrosión.
- Evacuación del calor,

Resistencia a la compresión. Es la propiedad del material de soportar la carga aplicada sin que se produzca su destrucción. En los cojinetes el espesor del material tiene gran importancia en la resistencia a la compresión. Investigaciones demuestran que en cojinetes que contienen estaño cuando el espesor del material es de 0.5 mm la resistencia a la

compresión es de 8.3 MPa, sin embargo cuando el espesor se reduce a 0.1 mm la resistencia a la compresión puede aumentar hasta 29.4 MPa. Para espesores mayores de 0.5 mm disminuye considerablemente.

Resistencia al rayado. Esta propiedad está relacionada con la estructura superficial del material, es decir a sus cualidades intrínsecas de débil frotamiento e interviene sobre todo en caso de contacto accidental en seco o lubricación limitada. A medida que disminuye la resistencia al rayado aumenta la dureza y la resistencia a la fatiga del material.

Resistencia al desgaste. Existe una estrecha relación entre el desgaste, la presión aplicada (P_a) y la velocidad (V), la cual se conoce como factor del desgaste (F_D) y se determina por la siguiente expresión:

$$F_D = P_a \cdot V^3 \quad (1)$$

Resistencia a la fatiga. Los metales de mayor dureza superficial presentan mayor resistencia a la fatiga. En el caso de los bronce es muy elevada mientras que es muy pequeña en los materiales blandos antifricción.

Resistencia a la corrosión. La corrosión en los materiales para cojinetes toma particular importancia en los motores de combustión, donde las elevadas temperaturas en presencia de gases como el CO, CO₂ y SO₂ llevan a la formación de productos ácidos que atacan a los cojinetes.

Entre los materiales utilizados los de base cobre-plomo y las aleaciones de cadmio y plata son los más susceptibles a la corrosión. La resistencia a la corrosión mejora con la utilización de estaño, plomo, arsénico e indio.

Evacuación del calor. Aún en las mejores condiciones de lubricación se produce fricción entre las superficies por lo que aumenta la temperatura. Los bujes fabricados por el método de pulvimetalurgia tienen la ventaja que pueden ser autolubricados, ya que mediante un proceso al vacío se introduce el lubricante en los poros del material, lo cual permite la autolubricación durante su explotación y esto ayuda a la evacuación del calor, garantizándose una buena vida útil.

3.1. Materiales antifricción Cu-Sn.

Los cojinetes producidos a partir de mezcla de polvo de cobre con 10% de estaño porosidad y polvo de bronce pulverizado se utilizan para producir cojinetes porosos impregnados en aceite, bujes de aceite grafito. Los mismos poseen bajo coeficiente de fricción, soportan bajas cargas y mantienen un funcionamiento estable y sin ruido.

El aceite en los cojinetes autolubricantes se impregna en los poros. La porosidad en estas piezas está en el orden de 20 a 30% de volumen total. Los poros realizan la función de recipiente almacenador de aceite, el cual fluye hacia la superficie en contacto con el eje.

Esta película evita el contacto directo entre el eje y el cojinete. Disminuyendo el desgaste y el coeficiente de fricción el método de impregnación del aceite esta normalizado.

Estos cojinetes se utilizan fundamentalmente en equipos y maquinas tales como lavadoras, batidoras, ventiladores donde la velocidad es menor de 1,5m/s las cargas oscilan entre 5 y 10 kg/cm². Las mismas no necesitan lubricación durante 3000 – 5000 horas, también se utilizan en máquinas y equipos de la industria farmacéutica y alimenticia donde no se permite la lubricación exterior para evitar la contaminación.

Tabla No. 1: Características de los bronce sinterizados.

Material	Contenido			Porosidad	Resistencia a la compresión radial (KMPa)
	Cu	Sn	C		
Cu-Sn	R	10	Max 3	Max 25	138-240

Tabla No. 2: Características de los bronce sinterizados antifricción por la firma METAALPO Brasil.

COMPOSICIÓN QUIMICA					K	VALORES	DENSID
MATERIAL	CÓDIGO	ELEM	%MIN	%MAS	MPa		g/cm ³
Bronce al estaño	Ct-1000-K19	Cobre	87,2	90,5	135	24	6,0/6,4
	Ct-1000-K26	Estaño	9,5	10,5	185	14	6,4/6,8
	Ct-1000-K37	Grafito. Otros.	0 2	0,2 2	260	12	6,8/7,2
Bronce contenido medio de grafito.	Ctg-1000- K17	Cobre	85,7	90,0	120	22	6,0/6,4
	Ctg-1000-K23	Estaño	9,5	10,5	160	17	6,4/6,8
	Ctg-1000-K33	Grafito. otros	0,5 2	1,8 2	230	9	6,8/7,2
Bronce contenido alto de grafito.	Ctg-1004-K23	Cobre	85,7	90,0	70	11	5,8/6,2
	Ctg-1004-K15	Estaño Grafito. otros	9,5 0,5 7,0	10,5 1,8 7,0	105	<11	6,2/6,6

Tabla No. 3: Influencia del níquel sobre el desgaste de los materiales base-Cobre

CONTENIDO DE NÍQUEL	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	INTENSIDAD DE DESGASTE G/KM
0	0,4-0,6	-
5	0,4-0,6	5X10-7
10	0,3-0,5	7X10-8
20	0,2-0,4	1X10-8
25	0,4-0,6	5X10-8

3.2. Cojinete de bronce grafito.

El grafito presente en los cojinetes, durante el trabajo de fricción forma una capa en la superficie de contacto la cual se va renovando constantemente. Las mismas pueden ser también impregnadas en aceite con un menor contenido pues se fabrican con porosidad menor al 20%. Se utilizan fundamentalmente en lugares de difícil acceso a la lubricación exterior, o donde no se permite aceite.

El grafito no presenta solubilidad con el bronce (Cu-Sn) por lo que permanece atrapado en la matriz. Esta característica da la posibilidad de lubricar el cojinete al desprenderse de la matriz formando la capa aislante entre el eje y el cojinete. Las bajas propiedades mecánicas de estos cojinetes a pesar de tener una menor porosidad están dadas por la presencia de grafito, el cual ejerce un efecto negativo en la estructura del material, el mismo interrumpe la continuidad de la matriz disminuyendo su resistencia. Es por ello que se debe utilizar un tamaño de las partículas inferior a 51Mm y que el mismo está distribuido uniformemente.

3.3. Perspectiva y desarrollo de los materiales antifricción.

El auge de los materiales compuestos ha producido el desarrollo de materiales nuevos para diferentes aplicaciones. Recientemente los materiales de composición han comenzado a incursionar prácticamente en el campo de uno de los productos pulvimetalúrgicos mas importantes, es decir los cojinetes autolubricantes.

La resistencia a la compresión radial es otro factor que limita el empleo de estos cojinetes, cuando las mismas tienen que soportar cargas superiores a 250 MPa.

La mayor evidencia del interés en desarrollar materiales compuestos antifricción por pulvimetalurgia, está dado por el gran número de patentes registradas por diversos países.-

Las investigaciones en el campo de materiales compuestos ha permitido trabajar en direcciones hacia la reducción o sustitución del estaño como elemento básico en las propiedades físico – mecánicas en los materiales antifricción de cobre.-

La gran cantidad de patentes registradas con relación a materiales antifricción demuestra las amplias ventajas que ofrece la pulvimetalurgia para el desarrollo de las mismas.

3.4. Lubricantes sólidos compuestos que aportan propiedades antifricción.

La adición de lubricantes sólidos a los materiales antifricción conlleva a una disminución al coeficiente de fricción, mayor resistencia al desgaste y un trabajo más estable y silenciosos en el conjunto de fricción. Por lo tanto se considera a partir de varias investigaciones preliminares que el criterio de una material antifricción no está limitado a un coeficiente de fricción bajo. Es necesario también que exista un lubricante que sea capaz de formar una capa continua que se adhiera a la superficie en contacto. Cualquier rotura en la capa conduce a un contacto metálico entre la matriz del cojinete y eje y eso es suficiente para impedir la acción del lubricante.

En el desarrollo de materiales se le presta especial interés a la condición de la formación de la película en el periodo inicial y la renovación de la misma durante el tiempo de trabajo en el proceso de explotación. La formación de la película durante la fricción del material del cojinete es el resultado de la interacción de los componentes de este material con el medio circundante o del resultado de las propiedades estructurales de las sustancias que sustituyen el lubricante, las cuales forman parte de los componentes del material cojinete y su estructura determinando el efecto de auto lubricación (Torres, 2004).

Entre los lubricantes sólidos utilizados en primer lugar se encuentra el grafito, bisulfuro de molibdeno (MoS_2) y nitruro de boro en un segundo campo y con usos en condiciones de trabajo especiales se utilizan seleniuros, fluoruros y sulfuros.

Del análisis bibliográfico efectuado se hace evidente que la pulvimetalurgia tiene un amplio campo de trabajo en los materiales antifricción, este proceso permite tener composiciones con diversos elementos dando lugar a mezclas y prealeaciones complejas con propiedades diversas que dependen de la base metálica que se utilice y la composición.

El cobre y el hierro constituyen los elementos básicos para la elaboración de estos materiales. La utilización de uno u otro elemento depende de las condiciones de explotación. El cobre a pesar de tener un costo superior al hierro tiene un mayor campo de aplicación debido a sus excelentes propiedades anticorrosivas, tecnologías, las cuales están dadas por poseer una mayor conformabilidad, comprensibilidad y menor temperatura de sinterización.

Por lo tanto en correspondencia con lo anteriormente planteado esta investigación se desarrollara en el campo de los materiales de composición, antifricción base – cobre.-

4. Estudio de las piezas típicas del tractor AGRINAR modelo 120T-4.

4.1. Selección del material. Composición química.

El desarrollo y obtención de polvo metálicos y materiales de diversos componentes en polvo tienen como objetivo final la utilización de estos en la producción y recuperación de piezas, para efectuar un correcto uso de los mismos es necesario conocer sus características y propiedades (Weyler, 2000).

Determinar con exactitud el porcentaje de cada componente o elemento presente en el polvo metálico o mezcla, es de gran importancia para establecer los parámetros tecnológicos del proceso de producción de las piezas.

En la pulvimetalurgia, al igual que en la metalurgia existen dos grandes líneas: el desarrollo y la producción de polvos metálicos y piezas base-cobre.

El material utilizado es el polvo de bronce fabricado en el centro de investigación de pulvimetalurgia (SIME) por el método de atomización con un posterior recocido en atmósfera de hidrógeno.

La composición química del mismo es aproximadamente 10% de estaño y el resto de cobre y la granulometría es del 100% por debajo de 160µm.

Tabla No. 4: Características de los bronce producidos en el SIME.

MARCA DE MATERIAL	CONTENIDO			POROS %	HB Kg/mm ²	Rcr=K MPa	COEFICIENTES DE FRICCIÓN
	Cu	Sn	C				
BRONCES	R	9,5-10	-	13-15	47-55	325	0,20
BRONCES	R	9,5-10	0,8	12-14	47-53	300	0,17
BRONCES	R	9,5-10	2	14-16	31-38	100	0,15
BRONCES	R	9,5-10	3	16,18	28-32	70	0,16

4.2. Curva de compactibilidad.

La curva de compactibilidad se realiza en un molde con la siguiente relación de diámetro.

Diámetro interior del anillo interior ----- 16mm

Diámetro exterior del anillo interior----- 30mm

Diámetro interior del anillo exterior----- 30mm

Diámetro exterior del anillo exterior ----- 60mm

Relación de diámetro. ----- 4,5mm

La prensa utilizada es una prensa hidráulica de 40Tn y las presiones de prensado fueron de 200-400-600-800-MPa. El método utilizado fue de simple efecto.

La densidad del material compacto se determinó por la siguiente fórmula

$$\rho_c = \frac{100\%}{\frac{\%Cu}{\rho_{Cu}} + \frac{\%Sn}{\rho_{Sn}}} \quad (2)$$

Donde:

%Cu - % Sn: % de los diferentes elementos que componen la mezcla.

ρ_{Cu} - ρ_{Sn} : Densidad de los elementos que componen la mezcla $\rho_{Cu}=8,95\text{g/cm}^3$ y $\rho_{Sn}=5,29\text{g/cm}^3$

ρ_c : Densidad del compacto

Para el caso de la mezcla obtenida la densidad de la pieza compactada será de $8,375\text{g/cm}^3$.

La determinación de la densidad en verde se realiza por la expresión:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Donde:

m: masa de la probeta (g)

v: Volumen de la probeta (cm³)

Inicialmente se pesa aproximadamente 8g se vierte el polvo en el molde y se realiza el prensado, la probeta obtenida se mide con un micrómetro para determinar su volumen y se pesa en una balanza analítica para obtener una mayor precisión. Después se flotea una gráfica que nos da la relación entre la presión de prensado y la densidad en verde de la probeta.

La porosidad se obtiene a través de la formula.

$$P = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_c} \quad (4)$$

Con cada caso se plantea con una curva de presión y porosidad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

Tabla No. 5: Datos experimentales de la curva de compactabilidad.

NUMERO DE PROBETAS	D (cm)	H (cm)	V (cm ³)	M(g)	R(m/v)	Pv	Presión (MPa)
21	1,507	0,75	1,20	7,9741	6,645	20,6	200
22	1,507	0,83	1,218	8,0354	6,597	21,2	200
23	1,509	0,73	1,203	8,0120	6,600	20,4	200
41	1,507	0,600	1,070	8,0916	7,561	9,7	400
42	1,506	0,604	1,075	8,0404	7,479	10,6	400
43	1,507	0,601	1,071	7,9715	7,450	11,0	400
61	1,507	0,566	1,009	8,0758	8,003	7,44	600
62	1,509	0,577	1,031	8,0288	7,787	7,02	600
63	1,507	0,580	1,034	8,0304	7,766	7,27	600
81	1,510	0,552	1,988	8,0525	8,150	2,68	800
82	1,508	0,538	1,960	8,8756	8,203	2,05	800
83	1,508	0,559	1,998	8,0529	8,069	3,65	800

Las probetas obtenidas a 800MPa presentaron grietas por los que se eliminaron de los experimentos.

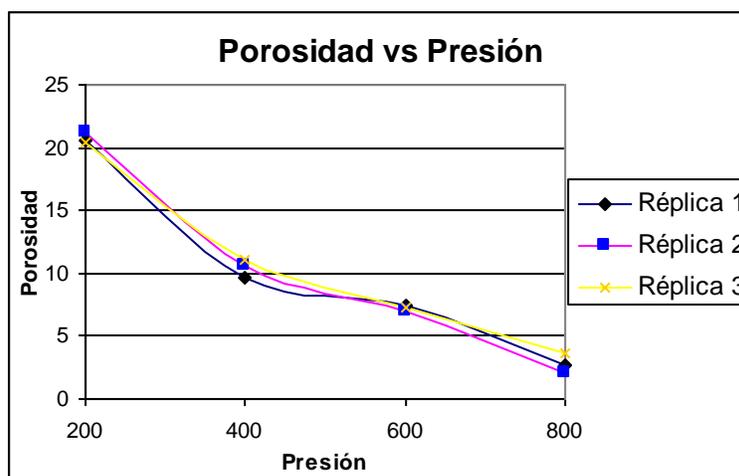


Figura No. 2: Relación entre Porosidad y presión.

Como se puede observar en la figura No. 2, existe una relación inversa entre la presión y la porosidad, obteniéndose para presión de 400MPa los valores de porosidad recomendados para estos casos (10%), siendo esta la presión empleada durante el proceso.

4.3. Diseño del molde para el prensado.

El diseño del molde se realiza de acuerdo con la metodología expuesta en los trabajos anteriores (Weyler, 2000).

Debido a la forma aproximada del molde los cálculos se simplifican considerablemente. Los pasos se muestran a continuación:

1. Datos iniciales.

Diámetro exterior del buje $D_{ext} = 16mm$

Material: Bronce

Presión de prensado: 400MPa

Selección de la relación total de diámetro. (a_t)

Según recomendaciones $a_t = 4$

2. Cálculo del diámetro exterior del anillo del molde.

$$a_t = \frac{D_{ext}}{D_{int}}$$

Donde D_{int} es el diámetro interior del molde (16mm). Despejando en la expresión anterior:

$$D_{ext} = a_t \cdot D_{int}$$
$$D_{ext} = 4 \cdot 16mm = 64mm \approx 60mm$$

Características:

Material: Acero Y10

Tratamiento térmico: Temple 800°C con enfriamiento en agua $T_m=20min$ y Revenido bajo 200°C tiempo de duración 1 hora.

Dureza: 60HRC

3. Cálculo del diámetro intermedio. (D_{inter})

$$D_{inter} = \sqrt{D_{ext} \cdot D_{int}}$$
$$D_{inter} = \sqrt{60mm \cdot 16mm}$$
$$D_{inter} = 30mm$$

4. Determinación de la altura de matriz. (H)

Considerando la relación de compresión $K=3$ tenemos:

$$H = h_{pieza} \cdot k + 2 \cdot h_1$$

Donde

H_1 : Penetración de los punzones (10mm)

H_{pieza} : Altura del buje (12mm)

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$H = 12mm \cdot 3 + 2 \cdot 10mm = 56mm$$

Normalizando $H = 60mm$.

5. Punzón superior. Características.

Material: Acero 9XBG

Tratamiento térmico: Temple a 830° C con enfriamiento en aceite, tiempo de mantenimiento $T_m = 3min$ y Revenido bajo a 200° C durante 1 hora.

Dureza: 57HRC

6. Punzón inferior. Características.

Material: Acero 9XBG

Tratamiento térmico: Temple a 830° C con enfriamiento en aceite, tiempo de mantenimiento $T_m = 10min$ y Revenido bajo: 200°C durante 1 hora.

Dureza: 58HRC

7. Cálculo de la sobremedida del diámetro exterior del anillo interior de la matriz.

La sobremedida puede determinarse empleando la siguiente ecuación:

$$S = \frac{2P_r \cdot r_i}{E}$$

Donde P_r es la presión, r_i el diámetro interior y E el módulo de Young. Sustituyendo estos valores en la expresión anterior queda:

$$S = \frac{2 \cdot 400 \cdot 16}{2 \times 10^6} = \underline{0,011mm}$$

Ello significa que con $S = 0.011mm$ se garantiza el apriete necesario para **equilibrar** las tensiones en la zona de intercepción de los 2 anillos.

5. Análisis de resistencia de los componentes mediante Elementos Finitos.

Para comprobar la resistencia mecánica de cada uno de los elementos que conforman el equipo, se realizó un análisis por elementos finitos.

5.1. Matriz

Para el análisis de la matriz, se realizó un estudio estructural de contacto de los anillos que conforman la misma, para determinar las tensiones generadas en la zona de interferencia.

Se realizó un análisis del tipo estructural, empleando como elemento el SOLID45, el cual tiene forma de hexaedro y se utiliza para la modelación de estructuras tridimensionales. Está compuesto por 8 nodos con 3 grados de libertad en cada nodo: desplazamientos en dirección de los tres ejes de coordenadas.

Como modelo de material se seleccionó el lineal, elástico e isotrópico, considerando que este elemento trabajará solo sometido a deformaciones elásticas y que estará expuesto a una fuerza que no tendrá variaciones significativas. Como propiedades se establecieron el módulo de Young 200000MPa y el coeficiente de Poisson 0.3.

El mallado estuvo compuesto por 41177 elementos de longitud 3mm y 8736 nodos, tal y como puede observarse en la figura mostrada a continuación.

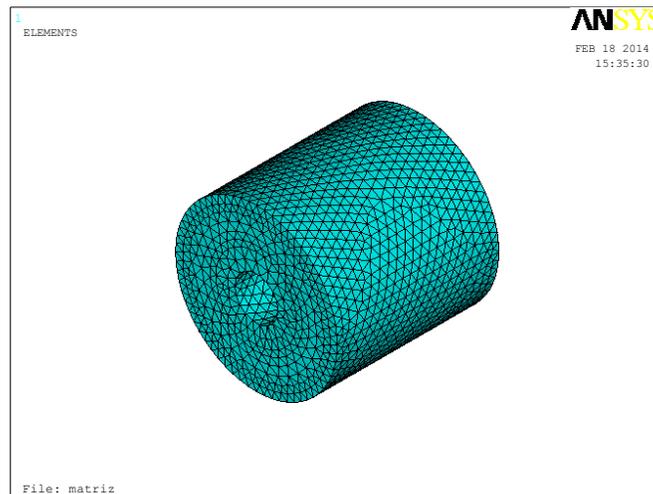


Figura No. 3: Mallado del modelo geométrico.

Como condiciones de fronteras se establecieron la restricción de los desplazamientos en la cara frontal de la matriz, la cual se encuentra apoyada, y la aplicación de una carga de presión de 240MPa en la superficie del agujero interior.

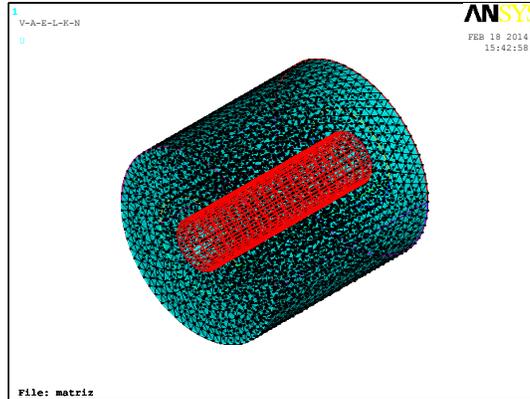


Figura No. 4: Condiciones de frontera.

Para la creación del par de contacto, se establecieron como superficies de contacto la superficie interna del anillo exterior, como *Target Surface* y la superficie externa del anillo interior como *Contact Surface*. Empleándose como elementos el *Target170* y el *Contact174* respectivamente.

En la figura se pueden observar que las tensiones de Von Mises máximas generadas son de 456.054MPa en la zona interior del anillo, mientras en la zona de transición las tensiones disminuyen considerablemente.

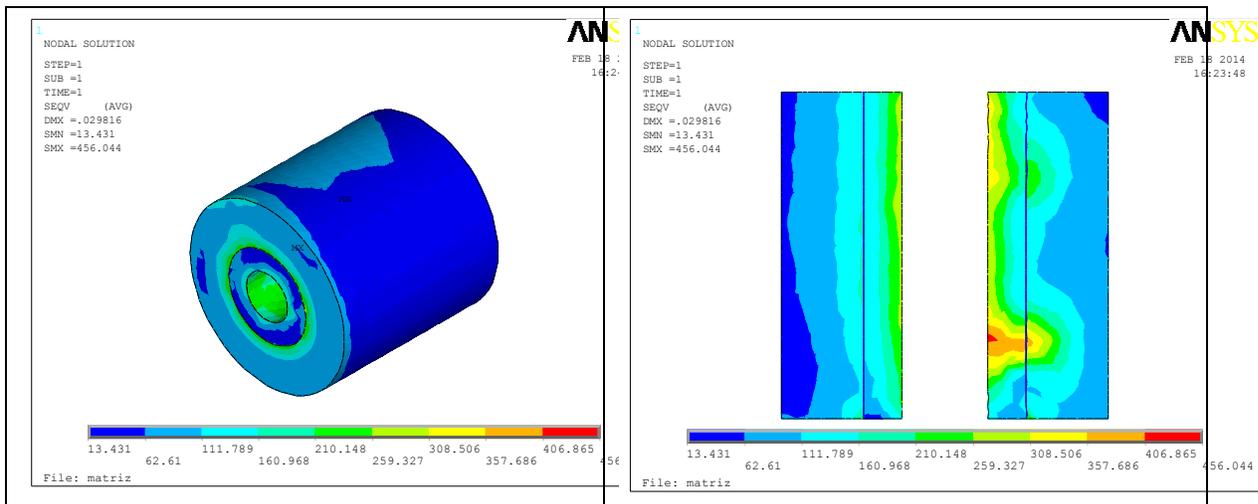


Figura No. 5: Tensiones de Von Mises. a) Vista isométrica b) Sección.

En la tabla No. 6 se representan los estados tensionales para el caso en estudio, observándose que las componentes de tensión más significativas son las normales en dirección del eje Y, con valores que oscilan entre -629.106MPa y 285.352MPa y las normales en dirección del eje X, oscilando entre -616MPa y 286MPa. Las tensiones tangenciales son inferiores en todos los casos.

Tabla No. 6: Componentes de tensiones en Matriz.

Componente de Tensión	Mín.	Max.
-----------------------	------	------

Tensiones normales en eje X (S_X)	-616	286
Tensiones normales en eje Y (S_Y)	-629.106	285.351
Tensiones normales en eje Z (S_Z)	-432.716	225.086
Tensiones tangenciales en plano XY (S_{XY})	-180.821	228
Tensiones tangenciales en plano XZ (S_{XZ})	-148.209	142.391
Tensiones tangenciales en plano YZ (S_{YZ})	-135.599	126.399

En cuanto a los valores de desplazamientos (figura No. 6), pueden observarse que en la superficie superior se encuentran los máximos con valores de 0.0298mm, con la componente más significativa en dirección del eje Y.

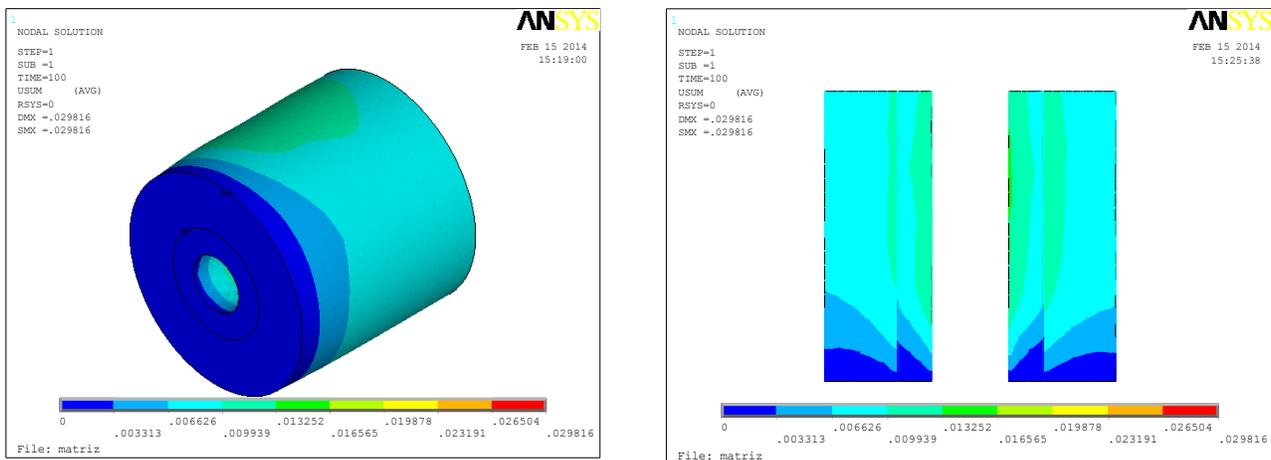


Figura No. 6: Desplazamientos máximos. a) Vista isométrica b) Sección.

5.2. Punzón superior

Para analizar en punzón superior, se realizó un análisis estructural estático, empleando como elemento el SOLID45, con un modelo de material lineal, elástico e isotrópico. Se introdujeron como propiedades el módulo de Young 200GPa y el coeficiente de Poisson 0.3.

El mallado estuvo integrado por elementos de tamaño 2mm en el cuerpo de la pieza y tamaño 0.5mm en el cambio de sección, con el objetivo de lograr una mayor precisión en esta zona, en la cual se esperan los valores mayores de tensiones.

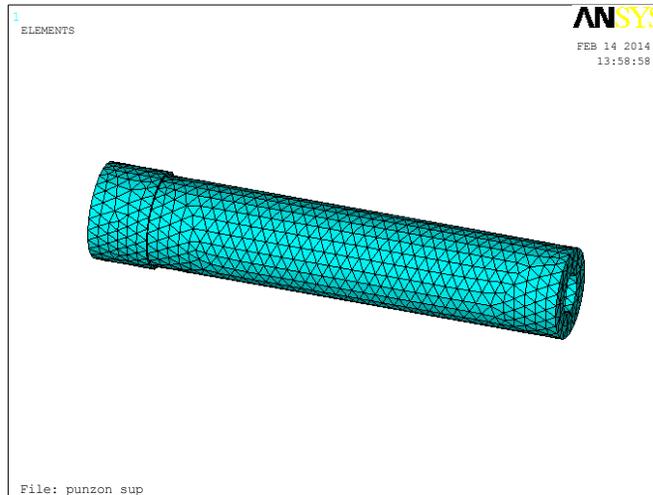


Figura No. 5: Mallado del modelo geométrico.

Finalmente el mallado quedó compuesto por 6345 elementos y 2315 nodos (Figura No. 5).

Como condiciones de fronteras establecidas, se limitaron los desplazamientos en el extremo de la superficie de menor diámetro, a través de la cual se sujeta el punzón a la prensa, y en el extremo opuesto se le aplicó como carga la presión de trabajo 400MPa.

Como resultado de este análisis se obtuvieron que los esfuerzos mayores se encuentran en la zona de cambio de sección, con valores de tensiones de Von Mises 570.262MPa (Ver figura No. 6), siendo las tensiones en dirección del eje X la componente más significativa.

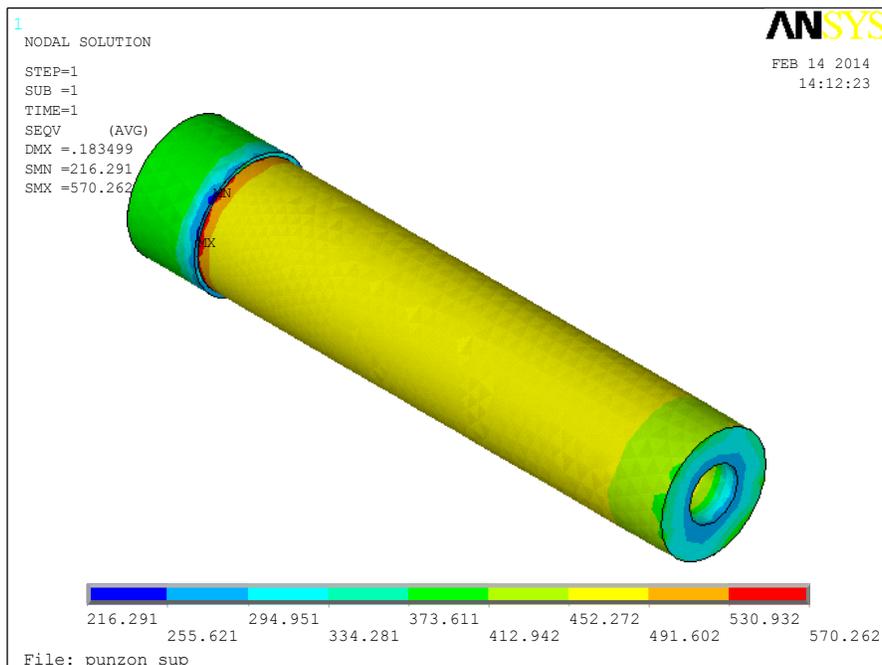


Figura No. 6: Tensiones de Von Mises en el punzón superior.

Los desplazamientos máximos se encuentran en el extremo de la superficie de mayor diámetro, con valores de 0.184mm en dirección del eje X (figura No. 7).

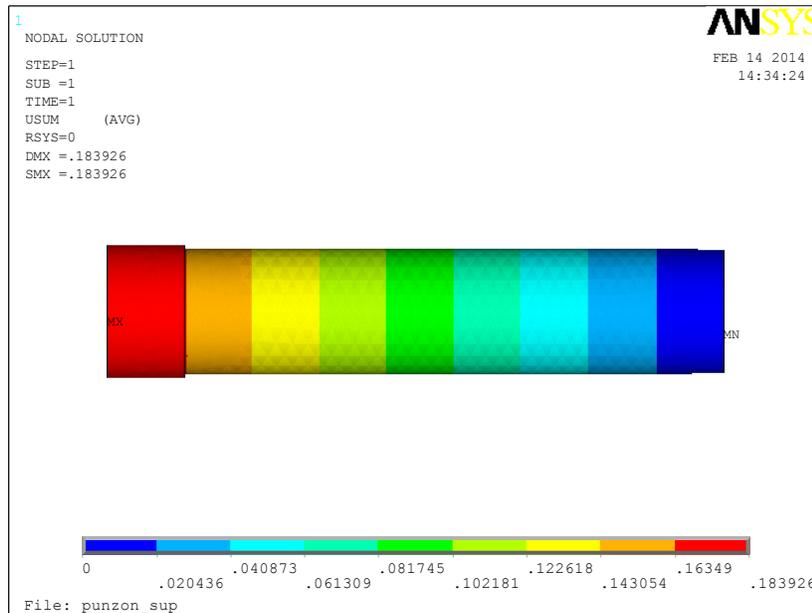


Figura No. 7: Desplazamientos en el punzón superior.

5.3. Punzón inferior

Para el análisis del punzón superior, se siguió una metodología similar al caso previo. Se realizó un análisis estructural estático, empleando como elemento el SOLID45, con un modelo de material lineal, elástico e isotrópico. Se introdujeron como propiedades el módulo de Young 200GPa y el coeficiente de Poisson 0.3.

Se empleó un mallado homogéneo compuesto por 4356 elementos de tamaño 2mm y 1952 nodos. Teniendo en cuenta la geometría de la pieza con este mallado se asegura una adecuada exactitud del análisis y adaptatividad al contorno de la pieza.

Como condiciones de fronteras, se limitaron los desplazamientos en dirección del eje y en la superficie inferior, la cual se encuentra apoyada. En la superficie superior se le aplicó una carga de presión de 400MPa (presión ejercida por el material comprimido sobre el punzón).

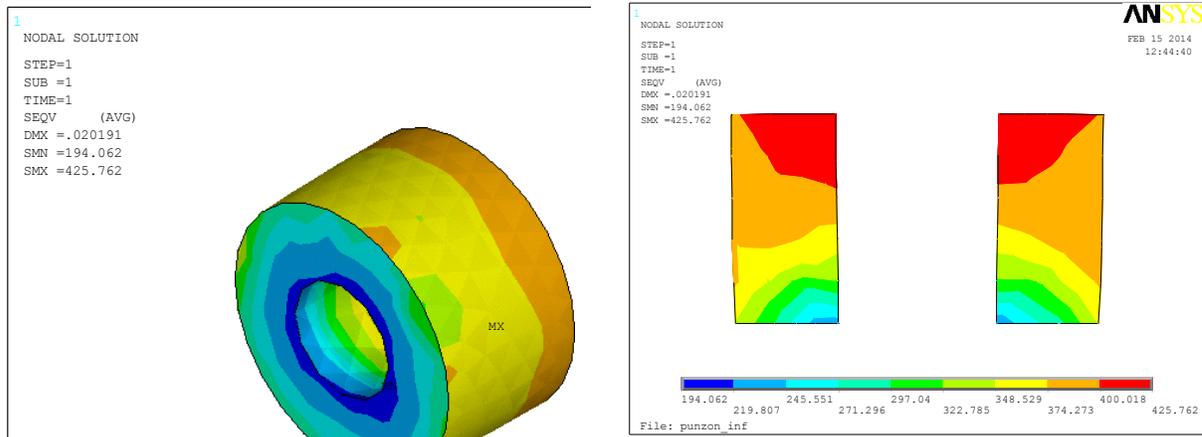


Figura No. 8: Tensiones de Von Mises en el anillo inferior. a) Vista isométrica b) Sección.

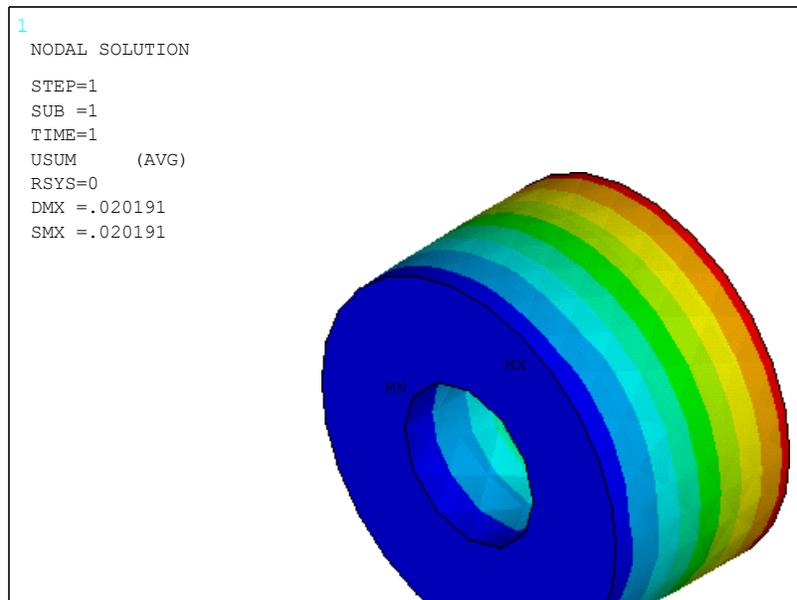


Figura No. 9: Desplazamientos en el punzón superior.

Como resultados puede observarse en la figura No. 8 que las tensiones máximas se encuentran en la superficie superior de la matriz, con valores de 425.762MPa en dirección del eje y.

Los valores de desplazamientos máximos se encuentran en la superficie superior con valores de 0,02mm en dirección del eje y (figura No. 9).

En todos los casos analizados, las tensiones máximas no sobrepasan el límite de fluencia del material, por lo cual está asegurada la resistencia mecánica de los mismos.

Conclusiones

Se diseñaron los troqueles para el conformado de los bujes a partir de polvo de cobre de los motores de arranque de los tractores Agrinar de la CVA “Pedro Camejo”, los cuales sufrían desgaste prematuro. Se comprobó la resistencia de todos los elementos que componen la

prensa empleando el método de elementos finitos en ANSYS, obteniéndose en todos los casos tensiones inferiores al límite de fluencia del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LANDAURO ABANTO A., MARTÍNEZ AGUILAR D.P., PRÍNCIPE RIJAS H. *Estudio de las propiedades de los materiales sinterizados a base de polvo de hierro, grafito y cobre*, 2010.

RUIZ VÍCTOR M.: *Resultados obtenidos en prácticas de cementación para engranajes rectos*. Tesis de Grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Guatemala 1997.

TORRES E.: *Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros*. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Facultad de Ingenierías Química y mecánica, 2004

WEYLER PÉREZ R. *Simulación numérica de procesos de compactación de materiales pulverulentos*, 2000.