



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

**“DISEÑO DE LA HERRAMIENTA Y DETERMINACIÓN DE LAS
VARIABLES DEL PROCESO PARA LA MANUFACTURA DE
PISTONES PARA COMPRESORES DE REFRIGERACIÓN POR
MEDIO DE TECNOLOGÍA PULVIMETALÚRGICA”**

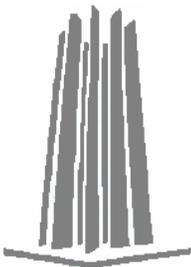
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N
SUSANA CAMBRÓN ZÁRATE
GERARDO OCHOA VELÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:
ING. JAVIER NAVA PÉREZ

MÉXICO.

2006.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por habernos dado la oportunidad de existir y por darnos las familias que tenemos.

A nuestros padres:

Bernardino y Maria Eugenia, Francisco (†) y Remigia, Lourdes y Lino (†) por dejarnos nacer, por todos sus desvelos que han tenido desde el día en que nacimos, por sus ejemplos de trabajo y tenacidad, así como los valores que nos han inculcado. Este logro también es de ustedes.

A nuestros hermanos:

José Daniel, Araceli, Haydeé, Lino, Rodrigo, Aaron, Francisco, Ma. Dolores, Marisela Gpe., Juan José, Alicia, Héctor Manuel, Jorge y Luis Enrique por hacer feliz mi infancia con los juegos y pleitos que compartimos y su valioso apoyo porque cuando los hemos necesitado siempre han estado con nosotros.

A nuestros abuelitos

Nachita y Antonio, por todo el cariño que me dieron desde que nací.

A nuestra hija:

Daniela Ochoa por enseñarnos a sorprendernos y a disfrutar nuevamente las cosas pequeñas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por la oportunidad de pertenecer a esta gran institución y por darnos formación académica para seguir superándonos.

A nuestros profesores:

Por el tiempo y el esfuerzo empleado en nuestro aprendizaje, por sus consejos que compartieron con nosotros, en especial al Ing. Javier Nava Pérez por el apoyo recibido para la realización de este proyecto.

DEDICATORIAS

A mi esposo Gerardo Ochoa y a mi hija Dany por todo el amor y la comprensión que me dan día a día, porque gracias a su paciencia he podido culminar con este ciclo.

Susana

A Mary y Enrique porque los considero como mis padres alternativos y siempre me han apoyado a sortear cualquier obstáculo al me he enfrentado, gracias por que este logro es también de ustedes.

A mi querida esposa Susy y mi hija Dany porque han logrado descubrir en mi cosas que no conocía y me ayudan a ser mejor cada día.

Gerardo

CAPITULADO

	Página
Introducción	iii
Capítulo 1. Conceptos Básicos	
1.1. Diseño	1
1.2. Diseño para la tecnología de pulvimetalurgia	5
1.3. Materiales empleados en herramientas de compactación	16
1.4. Compresores	20
1.5. Factores económicos	24
Capítulo 2. Polvos metálicos	
2.1. Breve historia sobre los polvos metálicos	28
2.2. Propiedades y características	30
2.3. Procesos de producción de polvos	34
2.4. Métodos de aleación	40
Capítulo 3. Pulvimetalurgia	
3.1. Características de los procesos pulvimetalúrgicos	43
3.2. Preparación del polvo	43
3.3. Compactación de polvos	45
3.4. Sinterización	52
3.5. Tratamientos postsinterización (operaciones de acabado)	56
Capítulo 4. Equipo	
4.1. Prensas de producción	61
4.2. Clasificación general de las prensas	62
4.3. Tipos de prensas	62
4.4. Mecanismos de transmisión para prensas	64
4.5. Mecanismos de alimentación para prensas	65
4.6. Hornos Industriales	66

4.7. Clasificación de los hornos industriales	67
4.8. Hornos para sinterizado	70
4.9. Atmósferas de sinterización	72

Capítulo 5. Diseño propuesto y determinación de variables del proceso

5.1. Antecedentes	79
5.2. Reconocimiento de la necesidad	79
5.3. Definición del problema	79
5.4. Recopilación de información	79
5.5. Conceptualización	80
5.6. Evaluación	88

Conclusiones	99
---------------------	----

Bibliografía	101
---------------------	-----

INTRODUCCIÓN

Las peculiaridades de los distintos tipos de polvos procedentes de un mismo metal dependen de su método de obtención y de los tratamientos a los cuales han sido sometidos.

La conformación de materiales puede hacerse a partir del estado sólido, granular o líquido.

En general, la manufactura de un producto a partir del estado granular o corpuscular cubre una amplia gama de materiales y de componentes o productos. Un material granular es una mezcla de partículas o granos sólidos que pueden tener tamaños variables. El uso de materiales granulares generalmente se debe a alguna de las siguientes razones:

- El material particular existe o puede producirse únicamente en estado granular.
- Las propiedades esperadas solo pueden obtenerse con materiales granulares.
- La manufactura del producto es más económica que por otros métodos
- Los componentes pequeños son difíciles de producir por otros métodos.

La producción de componentes a partir de materiales granulares generalmente sigue el mismo patrón:

- Producción del material granular
- Acondicionamiento o preparación para la conformación y estabilización
- Conformación
- Estabilización de forma
- Operaciones de acabado

Dependiendo del material y de los requerimientos de la pieza implican diferentes procesos básicos. A la producción de componentes de polvo metálico se le llama metalurgia de polvos o pulvimetalurgia (P/M).

En la última década, la producción de componentes a partir de polvos metálicos ha aumentado con rapidez y probablemente tendrá una expansión del 10 al 20% en los años venideros. Esto se debe a una o más de las siguientes razones:

- La producción de geometrías simples o complejas pueden efectuarse en una sola operación y con alta precisión dimensional.
- La cantidad de desperdicio de materia prima que se obtiene por este proceso es casi nula.
- Las propiedades finales son satisfactorias para la mayoría de aplicaciones, aunque no alcancen el mismo nivel que las correspondientes a los materiales sólidos.
- La producción de componentes que con otros métodos solo pueden producirse con dificultad.

- La pulvimetalurgia es el proceso más económico en muchas situaciones.

La metalurgia de polvos compite primordialmente con la fundición, la forja en frío y en caliente y el corte. Estos métodos normalmente implican diversas operaciones.

Cada método de fabricación de piezas estructurales ofrece ventajas y limitaciones específicas. La gran ventaja de la producción pulvimetalúrgica sobre otros métodos de fabricación es su capacidad para producir, sin formación de viruta, piezas estructurales complicadas de gran precisión dimensional en grandes series con costos razonablemente bajos. La técnica pulvimetalúrgica ofrece posibilidades únicas de crear formas que no se pueden fabricar con otros métodos o sólo con grandes dificultades y a elevados costos.

En la actualidad, la gama de piezas producidas por métodos pulvimetalúrgicos se extiende desde piezas relativamente simples hasta piezas extremadamente complejas.

Las piezas extremadamente simples son típicamente raras porque, la técnica de pulvimetalurgia (P/M) no puede competir fácilmente con los métodos convencionales de producción en masa.

Pero tan pronto como las piezas tienen alguna pequeña característica de diseño imposible o difícil de fabricar mediante métodos convencionales, su frecuencia en el espectro de las piezas estructurales pulvimetalúrgicas es muy alta.

Según se incrementa su grado de complejidad, de nuevo se vuelven menos frecuentes debido al incremento de costos en la herramienta y del proceso.

La presente tesis muestra el diseño del molde para la conformación de pistones para compresores dentro de la técnica pulvimetalúrgica, así como la determinación de las variables del proceso para la manufactura de estos.

Se eligió la fabricación de pistones sinterizados con la finalidad de aminorar los costos en la producción masiva de compresores y poder presentar una propuesta real para lograr este propósito.

Este trabajo consta de cinco capítulos los cuales están estructurados de la siguiente manera.

- Capítulo 1

En este capítulo abordaremos los conceptos básicos de diseño mecánico y nos enfocaremos al diseño en pulvimetalurgia, también mencionaremos de manera general los tipos y clasificaciones de compresores herméticos, veremos también algunas alternativas para la selección de materiales empleados en la fabricación de herramientas para compactación y por último trataremos los factores económicos involucrados en el proceso de diseño.

- Capitulo 2

Conoceremos en principio una breve historia acerca de la producción de polvos metálicos, posteriormente estudiaremos las propiedades y las características de estos polvos así como los métodos de producción y en última instancia se verán los métodos modernos de aleación existentes en este tipo de tecnología.

- Capitulo 3

Se analizará las características de los procesos pulvimetalúrgicos, trataremos de explicar en que consiste la preparación del polvo, así como las características de compactación y sinterización, al final abordaremos los tratamientos posteriores, también llamados operaciones de acabado.

- Capitulo 4

Presentaremos aquí una breve introducción acerca de los equipos utilizados en la producción de piezas fabricadas por el proceso pulvimetalúrgico, tipos y características de las prensas, tipos y clasificación de hornos industriales, aquí hablaremos mas a detalle acerca de los hornos para sinterizado y como las atmósferas protectoras de sinterización juegan un papel fundamental en el proceso.

- Capitulo 5

En este capitulo presentaremos la alternativa para el diseño del herramental, para lo cual definiremos la materia prima a utilizar en la fabricación de los pistones y la selección de materiales necesarios para la fabricación del herramental; plantearemos también las condiciones generales del proceso y definiremos las variables de control hasta el tratamiento post-sinterización, hasta la obtención de pruebas iniciales y los resultados dimensionales de los pistones.

CAPITULO 1

CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. DISEÑO.

Diseñar es crear algo nuevo o colocar cosas existentes en una posición diferente para satisfacer una necesidad. La definición formal de diseño es:

"Diseño: es establecer y definir soluciones a estructuras pertinentes de problemas que no han sido resueltos antes, o nuevas soluciones a problemas que se han resuelto previamente de una manera diferente".¹

La habilidad de diseñar es una ciencia y un arte. La ciencia puede aprenderse a través de las técnicas y procedimientos que pueden ser cubiertos por un curso, pero el arte del diseño sólo puede aprenderse por medio de la experiencia.

En todos los casos los problemas de diseño no tienen solo una respuesta correcta, es decir una respuesta que es adecuada o "buena" ahora, puede ser una solución impropia o "mala" mañana, si se produce una evolución de los conocimientos durante el tiempo transcurrido, o bien, si han ocurrido cambios en la sociedad o en las estructuras sociales.

Todo problema de diseño esta sujeto a determinadas restricciones para su solución. Se pueden utilizar muchas disciplinas técnicas (mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, teoría electromagnética, etc.) para la solución y también puede utilizar otras disciplinas no ingenieriles (economía, finanzas, derecho, etc.). Normalmente el diseño esta bajo los limites severos de tiempo y/o dinero.

1.1.1. Diseño en ingeniería mecánica.

El Diseño mecánico es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, la ciencia de los materiales y la ciencia mecánica aplicada.

El diseño en ingeniería mecánica incluye el diseño mecánico, pero es un estudio de mayor amplitud que abarca todas las disciplinas de la ingeniería mecánica, incluso las ciencias térmicas y de los fluidos. Aparte de las ciencias fundamentales que se requieren, las bases del diseño en ingeniería mecánica son las mismas que las del diseño mecánico.

1.1.2. Fases del diseño.

El proceso consiste en los siguientes pasos:

- Reconocimiento de una necesidad.
- Definición del problema.
- Recopilación de la información.

- Conceptualización.
- Evaluación.
- Presentación del diseño.

1.1.2.1. Reconocimiento de una necesidad.

A veces, el diseño comienza cuando existe una necesidad y decide hacer algo al respecto.

Identificar la necesidad y expresarla con determinado número de palabras es una actividad bastante creativa, pues la necesidad puede manifestarse simplemente con un vago descontento o bien por la intuición de una dificultad o en la sensación de que algo no es correcto. Con frecuencia, la necesidad no es del todo evidente; por lo general, se identifica de repente a partir de una circunstancia adversa o de una serie de circunstancias fortuitas que surgen casi al mismo tiempo.

Es evidente que si una persona es sensible y percibe fácilmente las cosas, entonces es más posible que identifique una necesidad, y también es más probable que haga algo al respecto. Una necesidad se identifica con facilidad después de que alguien la ha planteado.

Hay una diferencia bien clara entre el planteamiento de la necesidad y la definición del problema que sigue a dicha expresión. El problema es más específico.

1.1.2.2. Definición del problema.

Probablemente el paso más crítico en el proceso del diseño es la definición del problema. El verdadero problema no siempre es lo que parece ser a primera vista. A menudo su importancia se pasa por alto. El diseño final puede diferir grandemente dependiendo de cómo se define el problema.

Es ventajoso definir el problema lo más ampliamente como sea posible. La definición de un problema debe incluir una declaración formal del problema, que debe expresar específicamente lo que se piensa lograr con el diseño, es decir todas las condiciones por lo que ha de ser diseñado. Debe incluir los objetivos y metas, características y dimensiones del espacio que deberá ocupar el objeto, definiciones de cualquier término técnico especial, las restricciones que se pusieron y el criterio que se usará para evaluar el diseño.

Las especificaciones definen el costo, la cantidad de piezas a fabricar, la duración esperada, el intervalo o variedad de capacidades, la temperatura de trabajo y la confiabilidad. Entre dichas condiciones sobresalen las velocidades necesarias, las intensidades de alimentación en las máquinas, las limitaciones de temperatura, el alcance máximo, las variaciones esperadas en las variables y las restricciones en tamaño y peso.

Existen muchas condiciones intrínsecas que dependen del entorno particular del diseñador o de la propia naturaleza del problema. Los procesos de fabricación de

que se dispone, así como las instalaciones de cierta planta industrial son restricciones a la libertad de acción del diseñador; por tanto, forman parte de las condiciones intrínsecas. Todo lo que limite la libertad de elección del diseñador es una condición o restricción.

1.1.2.3. Recopilación de la información.

Quizás la mayor frustración que se encontrará cuando inicie el primer problema de diseño será la carestía de información. Su problema puede estar en una área técnica en la que usted no tiene ningún conocimiento anterior, y usted no puede tener una sola referencia básica del asunto. Al otro extremo usted puede encontrarse con una montaña de informes del trabajo anterior.

Los informes técnicos publicados, reportes de la compañía, los periódicos de comercio, patentes, catálogos, manuales y literatura publicados por vendedores y proveedores de materiales y equipo son fuentes importantes de información.

1.1.2.4. Conceptualización.

En este paso se determinan los elementos, mecanismos, procesos o configuraciones que en alguna combinación satisface la necesidad. Es el paso más importante para emplear inventiva y creatividad.

Muy a menudo la conceptualización involucra la formulación de un modelo que puede ser cualquiera de los dos tipos generales: analítico y experimental.

Un aspecto vital de la conceptualización es la síntesis. Síntesis es el proceso de tomar los elementos del concepto y clasificarlos en el orden adecuado. La síntesis es un proceso creativo y está presente en cada diseño.

1.1.2.5. Evaluación.

La evaluación es una fase significativa del proceso total del diseño. Es la demostración definitiva de que un diseño es acertado.

La evaluación involucra por lo general, un análisis completo del diseño, incluye pruebas de un prototipo en el laboratorio, así como también puede involucrar cálculo detallado.

Las técnicas de optimización probablemente se emplearán durante la evaluación para seleccionar los mejores valores de los parámetros importantes del diseño.

En tal punto es cuando se desea observar si el diseño satisface realmente la o las necesidades. La decisión de dirección acerca de cuándo detener el proceso de optimización será dictado principalmente por consideraciones de tiempo y dinero.

1.1.2.6. Presentación del diseño.

La comunicación del diseño a otras personas es el paso final y vital en el proceso de diseño. El diseño finalizado debe comunicarse adecuadamente, o puede perder mucho de su impacto o importancia, es indudable que muchos importantes diseños,

inventos y obras creativas se perdieron para la humanidad sencillamente por que sus autores no quisieron o no fueron capaces de explicar sus creaciones a otras personas. La presentación es una tarea de venta. Cuando el ingeniero presenta o expone una nueva solución al personal administrativo de alto nivel esta tratando de demostrar que su solución es la mejor. A menos que tenga éxito, el tiempo y el esfuerzo empleados para obtener la solución se habrá desperdiciado por completo.

En esencia, hay solo tres medios de comunicación que se pueden utilizar: la comunicación escrita, oral y gráfica.

La comunicación normalmente es por presentación oral al patrocinador así como por un informe del diseño escrito. Un estudio mostró que los ingenieros del diseño utilizan 60% de su tiempo discutiendo y preparando documentación escrita del diseño, mientras sólo el 40% del tema se utiliza analizando el diseño y haciendo el diseño. Detallado dibujos de diseño, programas de cómputo, y haciendo modelos son frecuentemente parte de la "liberación" del cliente.

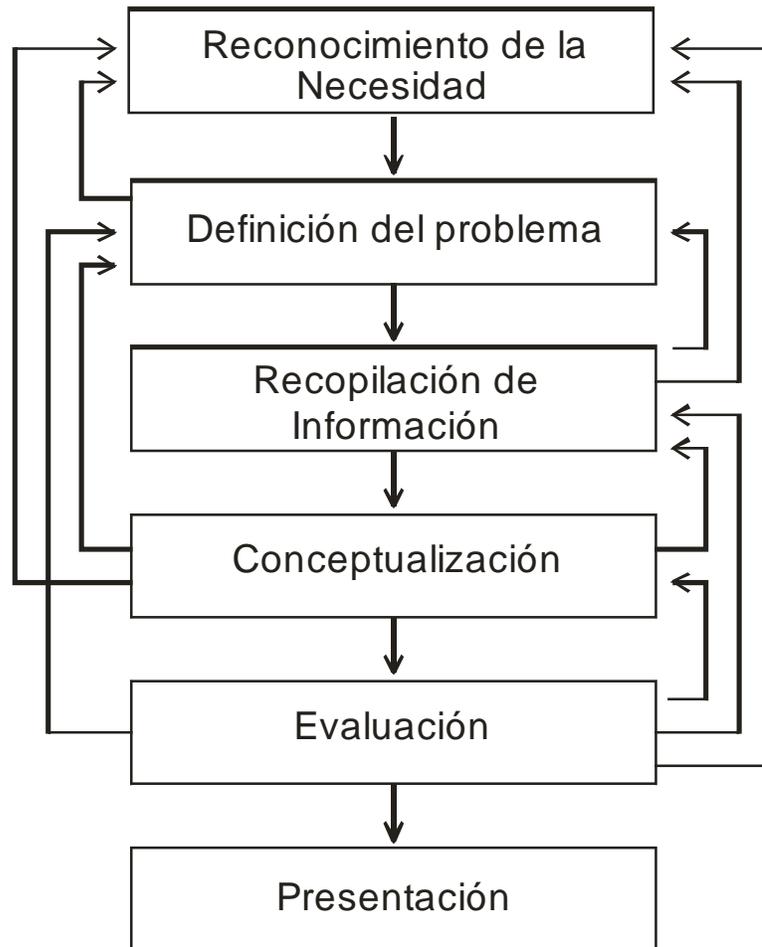


Figura 1.1. Esquema de los pasos del diseño.

1.2. DISEÑO PARA LA TECNOLOGÍA DE PULVIMETALURGIA.

La elaboración de piezas pulvimetalúrgicas ofrece ventajas de diseño únicas, pero deben considerarse ciertos aspectos específicos de la pulvimetalurgia.

1.2.1. Aspectos generales.

Existen ciertas restricciones de diseño específicas para la fabricación de piezas por pulvimetalurgia. El diseño apropiado de piezas estructurales requiere atención en los siguientes puntos:

- Comprobar que la cantidad de producción es suficiente para justificar la inversión necesaria en herramienta.
- Examinar la forma y las especificaciones dimensionales de la pieza propuesta y las sugerencias para cambios necesarios.
- Comprobar que las especificaciones están dentro de los límites de la pulvimetalurgia (propiedades físicas, mecánicas, etc.).
- Determinar si el proceso es más económico que otros posibles métodos de fabricación.

1.2.2. Precisión dimensional.

La precisión dimensional que puede conseguirse en piezas estructurales sinterizadas depende en parte de la direccionalidad de las dimensiones y del último paso de fabricación. En la dimensión perpendicular a la dirección de compactación se pueden mantener tolerancias más estrechas que en la dimensión de la dirección de compactación. Se obtienen tolerancias más estrechas si el último paso de fabricación implica una operación de calibrado o acuñado. Si, por otro lado, la última etapa de fabricación consta de una sinterización o un tratamiento térmico - como un tratamiento de endurecimiento - la precisión alcanzable disminuye. Es decir, las tolerancias dimensionales pueden compararse con las tolerancias de un pulido medio y un brochado obtenido mediante métodos de mecanizado convencionales. Las tolerancias de una pieza que es sinterizada, pero no calibrada, pueden compararse con las tolerancias medias obtenidas cuando se usan procesos de mecanizado comunes como el torneado, fresado, taladrado, etc.

Las tolerancias de las piezas estructurales endurecidas o cementadas, son comparables en la mayoría de los casos, con tolerancias de mecanizado mayores, con las tolerancias de las aleaciones ligeras moldeadas y las tolerancias de clase más estrecha de pequeñas piezas producidas por métodos de moldeo a la cera perdida. Las tolerancias aproximadas que se pueden obtener después de la sinterización pueden verse en la tabla 1.1.

Tamaño mm	Diámetro (+) mm ∅	Altura total (+) mm	Planicidad (+) mm ◊	Paralelismo (+) mm //	Angularidad de grados (+) ∠
10>20	15	100	25	15	25
20>30	30	150	30	30	30
30>50	50	250	45	75	45
50>80	80	350	75	150	60
80> .	130	500	100	200	100

Nota: Las cifras varían (±) con la composición del polvo y la temperatura y tiempo de Sinterización

Tabla 1.1. Tolerancias que se pueden obtener en piezas después de la sinterización.

La fabricación afecta a las tolerancias y a las propiedades físicas como se ve esquemáticamente en la figura 1.2.

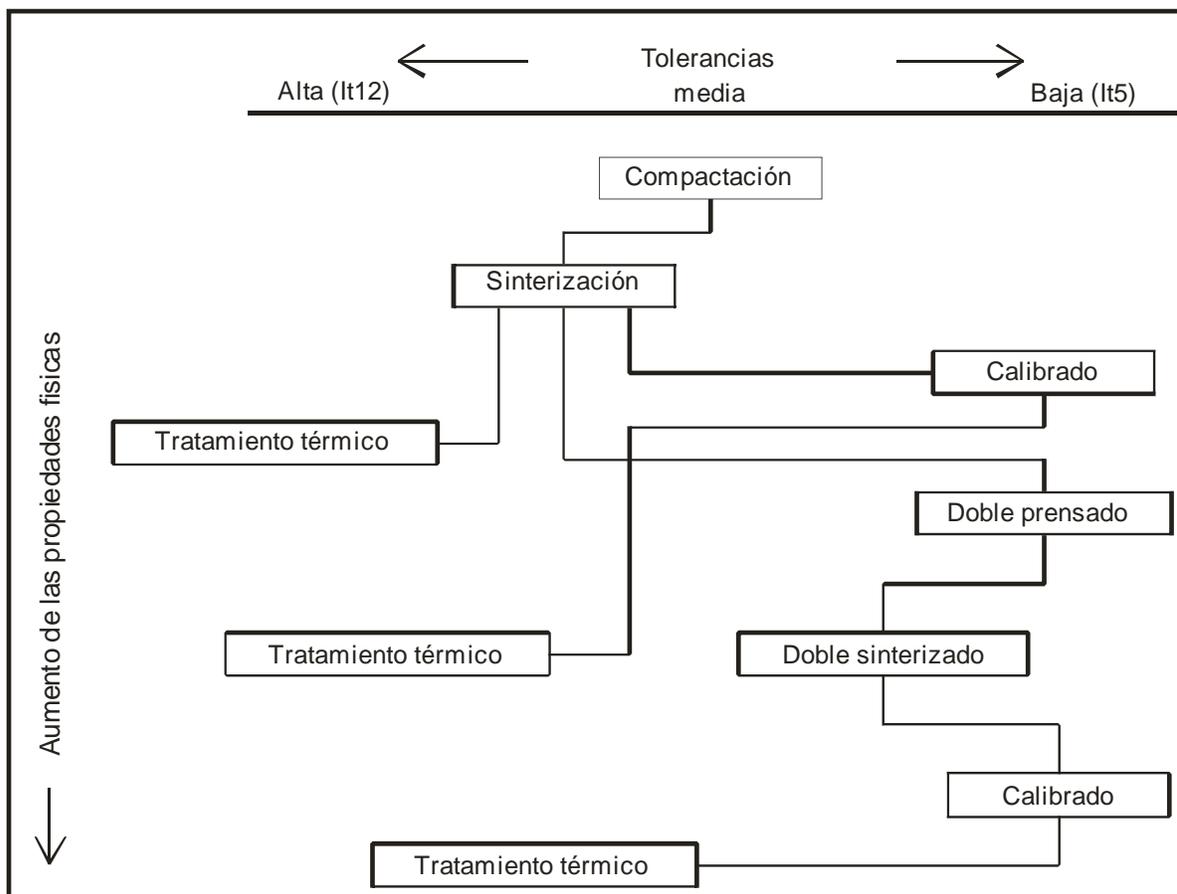


Figura 1.2. Esquema de cómo la fabricación influye en las tolerancias y las propiedades físicas de la pieza P/M.

1.2.3. Puntos a considerar en el diseño.

Los siguientes puntos deberán tenerse muy presentes al diseñar cualquier componente o pieza para evitar una complejidad innecesaria, formas imposibles al compactar, un elevado costo de la herramienta de compactación o que perjudiquen la vida de la misma.

1.2.3.1. Chaflanes, radios y formas cónicas.

Los bordes afilados entre la cara y las paredes laterales de una pieza deben ser eliminados con el objeto de reducir la formación de rebabas e incrementar la vida de la herramienta. Como se muestra en la figura 1.3 (a), el chaflán está formado por una pendiente con un ángulo y una zona plana de ancho W . Cuanto mayor es el ángulo alfa, mayor es la fuerza de compresión que se necesita para producir este ángulo. Normalmente, el ángulo del chaflán es de 45° , pero cualquier ángulo inferior a 45° es aceptable. Debido a la fuerza requerida para compactar el polvo, los ángulos mayores de 45° referidos a la horizontal deben evitarse. Esto ayudará a evitar la rotura de la matriz y de los vástagos del punzón. La altura H no debería rebasar al espesor de las piezas en más del 30%, debido a la variación en densidad que esto producirá.

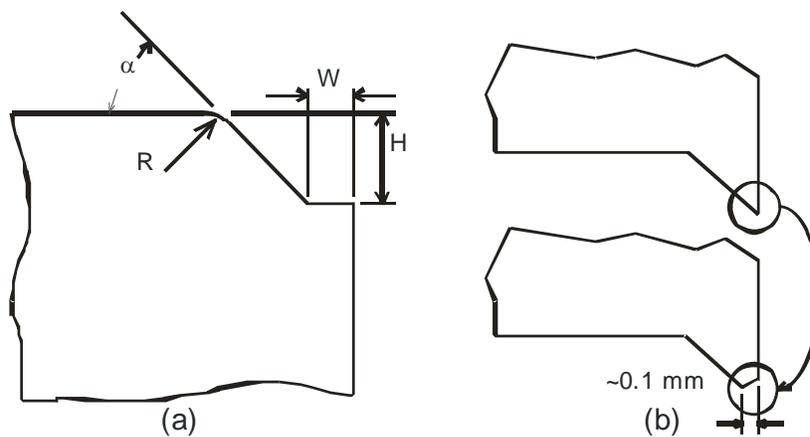


Figura 1.3. Chaflanes.

El ancho mínimo de la zona plana debe ser de 0.1 mm, aunque se recomienda un valor de 0.2-0.3 mm. Como se muestra en la figura 1.3 (b). Un valor típico para el radio R sería también de 0,2-0,3mm. Si no se considera la zona plana, la vida del punzón se verá afectada y finalmente se romperá formando su propia zona llana con una dimensión del orden de 0.1 mm.

Entre los elementos de la herramienta es necesario que quede un cierto espacio libre o hueco. Como consecuencia, una pequeña cantidad de polvo es extruida en este hueco durante la compactación, y cada pieza compactada terminará teniendo rebabas. El diseño de un chaflán ayudará a reducir la aparición de estas rebabas. Sin embargo, el tamaño de las rebabas crecerá a lo largo del tiempo con el desgaste de los elementos de compactación. Por ello es importante rectificar los punzones antes que las rebabas excedan la altura del chaflán.

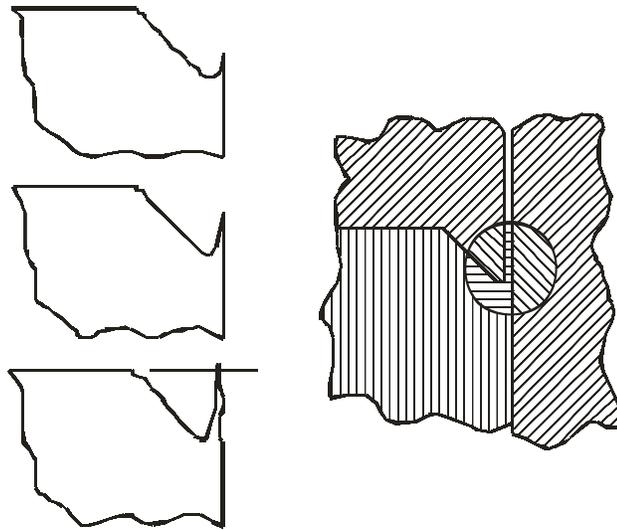


Figura 1.4. Chaflanes y rebabas.

Cuando una pieza de este tipo es conformada por dos punzones inferiores, como muestra en la figura 1.5 (a), no es imprescindible diseñar un radio donde el borde y el centro interceptan. Sin embargo, debemos recordar incluir un chaflán en el reborde periférico. Si, en cualquier caso, el reborde está conformado por una matriz escalonada, como se muestra en la figura 1.5 (b), se debería considerar la adición de un radio con el fin de evitar grietas durante la expulsión de la pieza. Cuanto mayor es el radio, mejor será la expulsión. Normalmente, el mínimo radio aceptable es de 0.2mm.

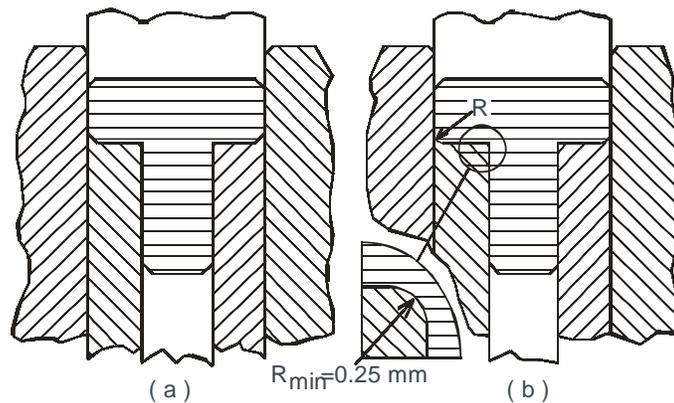


Figura 1.5. Radios.

Es posible redondear los bordes. Sin embargo, un radio perfecto como se muestra en la figura 1.6 (a), en realidad es imposible, debido a la punta creada en el extremo inferior del punzón. Es casi seguro que esta punta se romperá al comienzo de la operación de compactación. Por ello, es aconsejable añadir una zona plana.

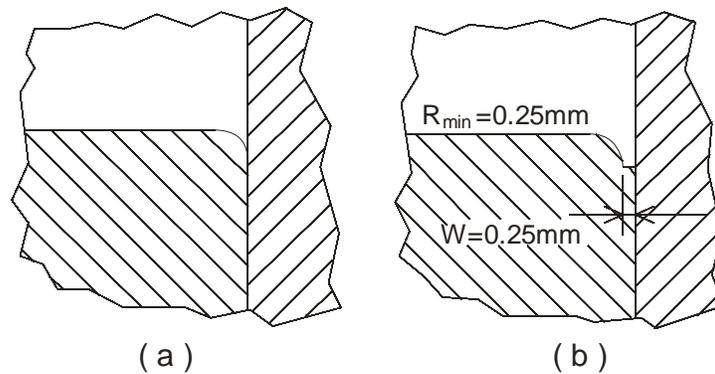


Figura 1.6. Bordes redondeados.

La figura 1.6 (b) muestra cómo debe ser creada esta zona plana. Un valor típico es de 0.2-0.3 mm. Aquí, el radio de curvatura no se ha mencionado; cualquier valor es válido, aunque cuanto mayor sea mejor, evitando que la punta de la parte redondeada no disminuya la altura de la pieza compactada en más del 30%. Sin embargo, no es recomendable diseñar un radio inferior a 0.2mm. En ese caso, la zona plana debe ser casi eliminada mediante un desbarbado (operación de pulido en tambor vibratorio).

Teóricamente se pueden fabricar esquinas y bordes exteriores agudos. Sin embargo, en la práctica es preferible redondearlos. Entonces será más fácil construir la matriz y ésta será menos susceptible a agrietarse. Si la matriz está diseñada en una única pieza, siempre presentará un radio mínimo. Este radio se produce por la herramienta utilizada en el acabado de la matriz.

En teoría, los bordes agudos y las esquinas interiores son fáciles de producir, pero se debe recordar que donde hay una esquina aguda, la pieza es más susceptible a agrietarse. Estas grietas se producen durante la expulsión de la pieza. Aquí, la retirada del vástago del punzón conduce a una contracción elástica del hueco dejado por la flecha, causando en la pieza esfuerzos de corte extremadamente elevados.

Por último, el redondeado de las esquinas permite un relleno más uniforme, dando lugar a piezas mejores, a la vez que se alarga la vida de la herramienta.

Una semiesfera perfecta como se muestra en la figura 1.7 (a), no puede obtenerse directamente durante la compactación. Un punzón con un borde fino no aguantará la presión de compactación y se romperá casi inmediatamente. Para reforzar el punzón, se debe tener en cuenta el tener una superficie plana (W) como se muestra en la figura 1.7 (b). Un ancho típico de esta superficie es de al menos 0.5 mm, aunque anchos mayores son también posibles dependiendo de la altura total de la pieza. La presión aplicada al punzón es mayor en su punta (extremo) que en el centro, por lo que no se puede alcanzar densidades uniformes en la pieza. La superficie plana alrededor de la semiesfera puede eliminarse mediante un mecanizado o un pulido agresivo. Ver figura 1.7 (c).

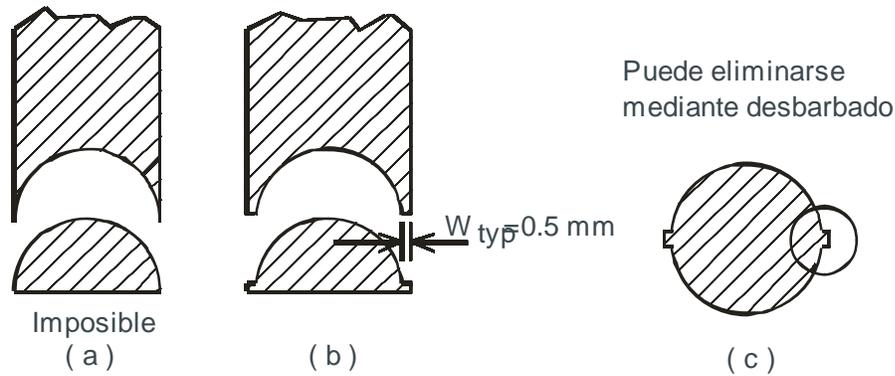


Figura 1.7. Extremos esféricos.

Una pieza cónica perfecta, no puede producirse sin una operación de mecanizado. Se deben añadir dos zonas planas en cada extremo como se muestra en la figura 1.8 (a). Estas zonas planas (de altura H) son fundamentales. La zona plana superior impide que el punzón superior se estrelle contra la matriz, mientras que el plano inferior ayuda a la eliminación del riesgo de formación de rebabas y el atascamiento de polvo entre la matriz y el punzón inferior. El valor típico para la altura es de 0.1-0.2 mm. Este valor, sin embargo, puede variar en función de la repetibilidad de la prensa.

La pieza mostrada en la figura 1.8 (b) es imposible fabricar debido a que el punzón superior finalmente chocaría con la matriz durante la compactación. Sin embargo, si es necesario que la parte superior sea perfectamente plana, esto se puede conseguirse con la ayuda de un punzón superior tipo yunque, como muestra en la figura 1.8 (c).

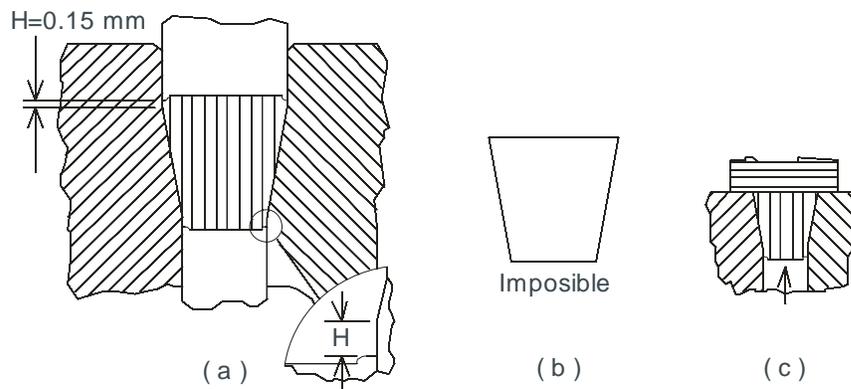


Figura 1.8. Formas cónicas formadas por la matriz.

1.2.3.2. Formación de escalones y ranuras.

Se puede obtener un escalón directamente con un único punzón con tal de que la altura no exceda el 20% de la altura total de la pieza. Si la altura del escalón es mayor que el 20%, se deberá considerar el uso de un segundo punzón, si no la densidad será extremadamente alta por debajo de este escalón. Se puede realizar

fácilmente un reborde como se muestra en la figura 1.9, mediante la transferencia de polvo con la ayuda de punzones exteriores (inferior y superior).

Esta acción se lleva a cabo con el fin de mantener una distribución de densidad más uniforme. No obstante, si se quiere compactar este reborde sin la transferencia de polvo con un solo punzón superior, se debe evitar tener una altura F del reborde mayor que su espesor T , como se ve en la siguiente figura.

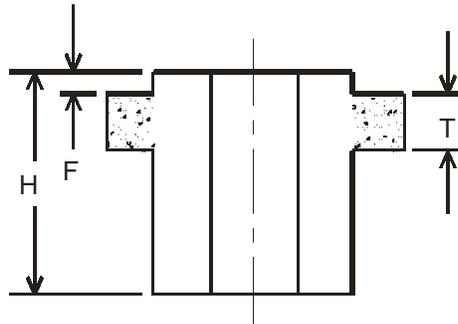


Figura 1.9. Escalón en la cara del punzón.

La cavidad en el punzón superior debería tener forma cónica con el fin de ayudar al punzón a resistir sin romper la pieza.

Se pueden fabricar caras con relieve, como muestra la figura 1.10, sin punzones subdivididos cuando $b_2 \leq 0.2 b_1$ y $b_3 \leq 0.1 b_1$. El ángulo α debería ser al menos de 5° .

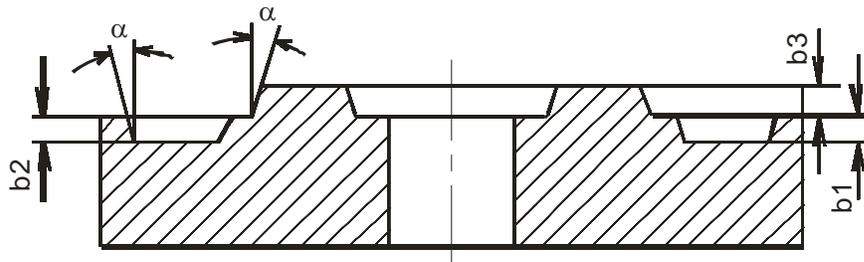


Figura 1.10. Caras con relieve.

Cuando se realiza una ranura con un punzón, se debe evaluar si la profundidad es aceptable. Como la cantidad de polvo debajo de la ranura es la misma que la de la zona de al lado de ella, la densidad local debajo de la ranura será finalmente mayor que en cualquier otra zona. Esto se debe a la alta relación de compresión.

Normalmente, en el caso de ranuras semicirculares, se debe evitar sobrepasar el 30% de la altura total de la pieza. En el caso de una ranura con ángulo, el valor indicado se convierte en un 20%. Aquí, no debería olvidarse incluir un ángulo con el fin de evitar que la pieza se quede pegada al punzón durante la expulsión.

Durante la expulsión de una pieza con un gran reborde, se produce una importante contracción en la unión entre el reborde y el espárrago aumentando una posible área de fractura. Con el fin de contrarrestar el efecto de esta contracción, se recomienda usar un radio en la intersección. Ver figura 1.11.

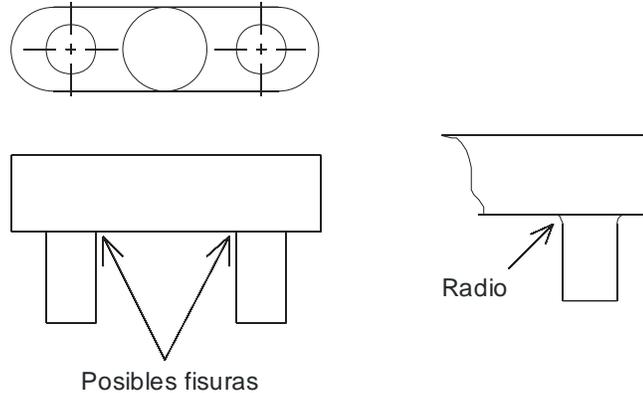


Figura 1.11. Rebordes y espárragos.

1.2.3.3. Espesor en paredes y barrenos.

En pulvimetalurgia se pueden producir fácilmente barrenos usando flechas durante la operación de compactación. Sin embargo, deben observarse algunos aspectos importantes.

Es posible realizar barrenos que ayudarán a aligerar la pieza y a ahorrar polvo mientras se reduce la superficie de compactación. Es más económico diseñar barrenos circulares que poligonales. La razón es que el herramental es más fácil de fabricar.

La distancia entre el barreno y la cara lateral de la pieza debería ser suficiente para permitir una buena fluidez del polvo durante el relleno de la matriz. Cuanto más profundo es el espacio de relleno necesitado para la pieza, mayor es la distancia necesaria. Típicamente, se deberían evitar distancias inferiores a 1.5mm. Ver figura 1.12.

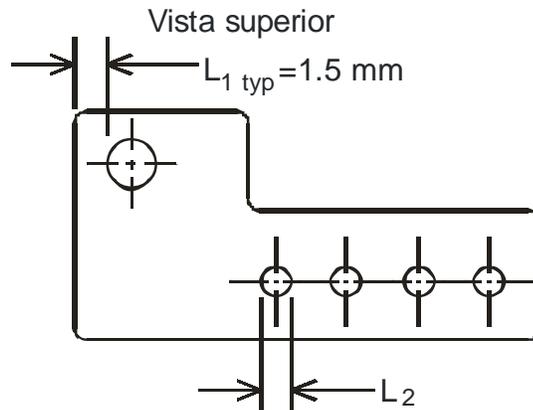


Figura 1.12 Barrenos.

El tamaño mínimo del barreno es obviamente aquel obtenido por la flecha más pequeña mecanizable. De nuevo, el tamaño mínimo de la flecha depende de la altura de la pieza. Si se produce un diámetro muy estrecho en una pieza de gran altura de compactación, durante la expulsión de la pieza, la larga y delgada flecha usada para generar este barreno estará sujeta a fuerzas de fricción tan altas que se romperá.

Durante la compactación, la flecha, que está guiada tanto en el punzón superior como el inferior, se doblará porque, bajo la alta presión de compactación, la pieza se expande radialmente más que los punzones. Esta acción está casi obligada a producir grietas en la pieza que finalmente romperán la flecha.

Cuando un barreno estrecho está sometido a fuerzas casi simétricas, la flecha no se doblará, pero su contracción elástica en la mitad hará la expulsión muy difícil y podría romper la flecha de forma rápida.

Las paredes estrechas deben evitarse. No son imposibles de fabricar, pero pueden causar una variedad de problemas en los ajustes de la herramienta y en su esperanza de vida. Más aún, después de la sinterización, las desviaciones (en planicidad, diámetro, etc.) serán más notorias y harán más difícil mantener las tolerancias.

Los factores indicativos de paredes estrechas son:

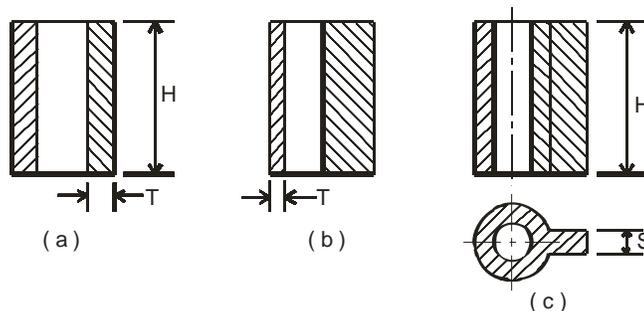


Figura 1.13. Espesor en paredes.

- Cuando el índice H/T , en la figura 1.13 (a), es mayor que 6.
- Cuando el espesor T , en la figura 1.13 (b), es menor que 0.8 mm.
- Cuando el índice H/S , en la figura 1.13 (c), es mayor que 6 (incluso cuando fue posible obtener en algunos casos razones superiores a 18).

Las piezas con barrenos ciegos son fáciles de fabricar. Lo ideal sería que el barreno estuviera orientado hacia abajo. A veces, sin embargo, se prensan desde arriba. Cuando es necesario, se emplea un determinado ángulo alfa para permitir la retirada del punzón. También nos debemos asegurar que la profundidad del barreno no exceda el 15% de la altura de la columna de polvo debajo del barreno. Si se necesita un barreno más profundo, se emplea entonces un vástago con un extremo puntiagudo.

No es aconsejable producir piezas unidas mediante el diseño de paredes delgadas. La herramienta necesaria sería extremadamente frágil. Lo ideal sería modificar el diseño con el fin de modificar esta característica.

También son difíciles de producir ángulos con bordes agudos, es aconsejable dejar una zona plana en el borde.

Una ranura como la mostrada en la figura 1.14 (a) permite el ensamblaje preciso de dos piezas. Este tipo de ranuras son imposibles de realizar directamente en la operación de compactación, ya que sería imposible realizar la expulsión de la pieza. Algunas alternativas pueden ser:

- Después del sinterizado se puede mecanizar una ranura si es realizada en esta dirección.
- Realizar una muesca en el eje opuesto mediante un abultamiento en la cara del punzón inferior como muestra la figura 1.14 (b).

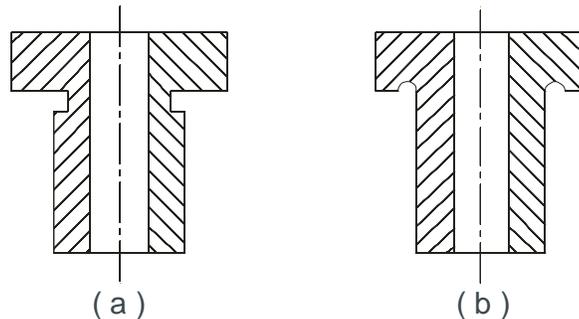


Figura 1.14. Ranuras y muescas.

Las roscas no se pueden obtener directamente mediante la compactación. Da lo mismo que sean exteriores o interiores, las roscas deben ser mecanizadas después de la sinterización. Para que esto sea posible, se tiene que añadir un margen suficiente a las dimensiones relacionadas de la pieza. El margen mínimo que tiene que ser añadido depende del tipo de rosca que se necesite. Generalmente, el equivalente del propio ancho de la rosca será suficiente.

En pulvimetalurgia es posible producir formas que serían difíciles de obtener de otro modo. Por ejemplo, se pueden fabricar piezas con esquinas ciegas. Se debe poner atención con el fin de que la pieza se pueda expulsar fácilmente después de la compactación.

Las piezas muy largas deberían mantener una relación altura/anchura inferior a 5. Si esta relación es superior a 5, el riesgo de ruptura de la pieza se incrementa rápidamente.

Los ensamblajes deberían ayudar a resolver algunas dificultades de producción o, a veces, a evitar el uso de operaciones secundarias. Por ejemplo, si se quiere

compactar una pieza que incluye un hueco o ranura, es posible diseñar la pieza en dos partes, las cuales serán ensambladas antes del sinterizado. Durante el sinterizado, la soldadura entre las partículas de polvo mantendrá las dos partes firmemente unidas.

Esta técnica es útil cuando la pieza a ser fabricada emplea una materia prima identificada como difícil de mecanizar.

Los caracteres alfanuméricos pueden realizarse en la cara final del punzón de prensado. Estos pueden tomar la forma de marcas elevadas, hundidas o en relieve. Se deberían cumplir las siguientes reglas:

- Un ángulo mínimo de 2° en el contorno del carácter.
- El ancho de la raya mayor que el espesor del carácter.
- Los símbolos que forman un barreno en la cara del punzón son una fuente de acumulación de polvo. Este problema se puede resolver recubriendo la cara de trabajo con grafito.

1.2.3.4. Consideraciones de diseño adicionales.

El diseño de piezas estructurales de polvo metálico está influenciado no sólo por aspectos relacionados con las técnicas de compactación y la herramienta, sino también por aspectos relacionados con el coste de la herramienta, el comportamiento durante el sinterizado y la funcionalidad de las piezas, sin embargo en este punto no trataremos lo relacionado con el herramental sino hasta el ultimo apartado de este capítulo.

1.2.3.4.1. Aspectos relacionados con el comportamiento del sinterizado y funcionalidad de las piezas.

En el proceso de sinterizado, las piezas pueden sufrir cambios dimensionales y deformaciones las cuales pueden corregirse por medio de operaciones posteriores como el calibrado y acuñado, o en algunos casos el mecanizado.

Dependiendo de la composición del polvo, las piezas pueden contraerse o dilatarse durante el sinterizado. Por ello, merece la pena examinar si las especificaciones de las propiedades físicas de la pieza permiten la elección de la composición de un polvo que minimice los cambios dimensionales durante el sinterizado. De otro modo, los cambios dimensionales pueden ser difíciles o imposibles de corregir mediante el posterior calibrado.

Durante el calentamiento en el horno de sinterización, las partes más finas de una pieza se calientan más rápido que las partes más gruesas, pudiendo deformarse la pieza. Por ello es aconsejable diseñar piezas que eviten diferencias extremas en el espesor de sus diferentes partes.

Los bujes largos con densidad menor en el centro tienden a formar una angostura o cintura debido a la contracción desigual. Estos talles pueden ser difíciles

o imposibles de corregir por calibrado; y en este caso, se debería examinar si la aplicación permite el uso de dos bujes cortos en vez de uno largo.

Las piezas con forma de disco y los anillos finos si no se apoyan adecuadamente, tienden a deformarse durante el sinterizado.

Las piezas de gran tamaño pueden dar problemas durante el sinterizado porque su superficie se calienta más rápidamente que su núcleo y se obstruye el quemado y eliminación de los lubricantes. Una velocidad de calentamiento demasiado elevada en el horno de sinterizado, puede causar la rotura de las piezas.

1.2.4. Normas.

La primera norma publicada en pulvimetalurgia es la norma alemana DIN 4990 (mayo de 1942) especificando los campos de aplicación de los carburos cementados. Más tarde, en 1953, la Organización Internacional de Normalización (ISO) amplió este primer paso redactando la norma ISO 513 y en 1967 creó un Comité Técnico especial, el ISO/TC 119 Powder Metallurgy.

En los Estados Unidos de América la Metal Powder Industries Federation ha establecido un conjunto de normas con objeto de regular la naturaleza y las características de los polvos metálicos, conocidas como normas MPIF. Existen otras normas, entre las cuales destacamos las alemanas de la Fachverband pulvemetallurgie o normas FPM.

1.3 MATERIALES EMPLEADOS EN HERRAMIENTAS DE COMPACTACIÓN.

1.3.1 Punzones.

Los polvos son normalmente compactados mediante presiones entre 300 y 650 N/m². Todos los punzones de compactación tienen que resistir estas elevadas cargas no sólo una vez, sino de 100,000 a 1,000,000 de veces sin romperse ni deformarse plásticamente. Tampoco pueden expandirse elásticamente bajo estas cargas, de modo que puedan atascarse en la matriz. Incluso una ligera deformación plástica durante un ciclo de compactación, conduciría tras varios ciclos a un acortamiento y engrosamiento apreciables del punzón. No hay que tener mucha imaginación para darse cuenta de las consecuencias: al acortarse el punzón, la altura de las piezas compactadas aumenta correspondientemente, y al hacerse más grueso el punzón finalmente se atascaría en la matriz y se rompería, dañando posiblemente todo el herramental.

Por tanto, los punzones deben tener un elevado límite elástico de compresión, elevada tenacidad y resistencia a la fatiga. En los casos donde los punzones forman parte de las paredes laterales del herramental de compactación, deben tener, además de las propiedades mencionadas suficiente dureza superficial. El endurecimiento superficial de los punzones, si fuera necesario, debe llevarse a cabo con sumo cuidado para evitar la fragilización y el agrietamiento superficial. Únicamente los aceros de herramientas más tenaces son apropiados como punzones. Idealmente, se deberían combinar las siguientes propiedades:

- Buena maquinabilidad tras un ligero ablandamiento.
- La mayor tenacidad y resistencia a fatiga posible tras el endurecimiento.
- La mayor estabilidad dimensional y menor susceptibilidad a la rotura posible en el proceso de endurecimiento.
- Mayor resistencia al desgaste posible.

Seleccionar el acero de herramientas adecuado para un punzón en particular y elegir el tratamiento térmico apropiado es cuestión de experiencia.

Pueden ser de ayuda tanto las especificaciones gráficas como los tratamientos térmicos sugeridos por los fabricantes.

En la tabla 1.2 se muestran las propiedades y los tratamientos térmicos sugeridos para tres aceros de herramientas típicos para punzones.

Nomenclatura sueca (SIS)	SIS 2140	--	SIS 2550
Nomenclatura DIN	~ 105WCr6	90MnV8	50NiCr13
Nomenclatura AISI	AISI 01	AISI02	--
Análisis: % C Si Mn Cr Ni Mo W V	0.95 - 1.2 0.5 - - 0.5 0.1	0.85 - 2.1 - - - - 0.12	0.55 - - 1.0 3.0 0.35 - -
Temperatura de normalización °C	800 – 820	800 – 820	790 – 810
Temperatura de recocido °C	750 – 770	690 – 710	740 – 760
Dureza tras el recocido. HB	190 – 210	180 – 200	220 – 250
Mecanizado	Bueno	Bueno +	Medio -
Endurecimiento	Media	Media	Buena
Resistencia a la descarburización	790-810	770-810	790-810
Temperatura de austenización °C	baño de aceite o sal	baño de aceite o sal	baño de aceite o sal
Medio de temple	250-260	230-240	260-270
Temperatura de templado °C	62-50	63-50	50-58
Dureza tras el revenido HRC	Buena+	Buena+	Buena+
Estabilidad dimensional	Buena+	Medio si el temple es en aceite	Buena si el temple es en aceite
Estabilidad a la deformación por alabeo	Buena+	Mejor si el temple es en baño de sal	Buena+ si el temple es en baño de sal
Resistencia al desgaste	Media+	Media	Media
Tenacidad	Buena	Buena+	Mejor si el revenido 2x

Tabla 1.2. Propiedades de aceros para herramientas adecuados para punzones.

1.3.2 Matrices y flechas.

Tanto las matrices como las flechas deben realizarse de carburos cementados, ya que por su extrema dureza y resistencia al desgaste son la elección más económica para grandes producciones en serie, aunque sean mucho más caros que el acero. Sin embargo, para producciones más pequeñas, algunos aceros rápidos suponen una alternativa más económica. Debido al alto contenido en carburos embebidos en la matriz del acero, los aceros rápidos tienen bastante resistencia al desgaste, aunque no tanto como los carburos cementados.

Las matrices de carburos cementados se deben calzar siempre con un anillo ajustado de acero tenaz para prevenir la rotura violenta bajo la elevada presión radial ejercida sobre la pared interior durante el proceso de compactación. El proceso de ajuste del anillo provoca tensiones tangenciales de compresión elevadas en la pared interior de la matriz, aumentando aun más la resistencia al desgaste. La relación entre el diámetro interior y el exterior del anillo de ajuste debe ser al menos 2:1, o mejor 4:1. Los cantos vivos o las incisiones en el perfil de la cavidad de la matriz deben ser evitados ya que provocan un elevado esfuerzo a tracción tangencial que podría reventar la matriz.

Por otro lado, cuando la forma de la pieza estructural requiere cantos vivos o incisiones en la matriz, no debe considerarse necesariamente un desastre si la matriz se rompe ya que, en la mayoría de los casos, el anillo de ajuste mantiene a la matriz fracturada en su sitio.

Durante la etapa de compactación y de expulsión, las flechas son sometidas alternativamente a elevados esfuerzos a tracción y a compresión, debido a las fuerzas de fricción, especialmente si son delgadas y de perfiles complicados. Por tanto, las flechas deben tener tanta tenacidad y resistencia a fatiga como sea posible. Pero este requisito está enfrentado a la demanda de alta resistencia a desgaste, es decir, a la mayor dureza superficial posible.

Este conflicto puede ser resuelto de una de las siguientes maneras:

- a) La flecha es realizada en una pieza tratada térmicamente para conseguir tenacidad y endurecida por inducción en el extremo superior donde más expuesto al desgaste está.
- b) La flecha se realiza en dos piezas, una pequeña superior de carburos cementados, unida por uno u otro método, a la pieza larga inferior de acero tenaz endurecido.

En general dentro de la gama de materiales utilizados en la industria de la fabricación de herramientas de compactación el uso de materiales típicos utilizados recomendados por los fabricantes son A2 (para punzones) y M2 (para matrices y flechas) que se pueden analizar en la tabla 1.3

ACEROS FORTUNA	** Análisis Básico Medio	TRATAMIENTO TERMICO		*** DUREZAS DE TRABAJO USUAL	EQUIVALENTE AISI APROXIMADO	CARACTERÍSTICAS
		TEMPLE	RECOCIDO			
W 18	0.70% C, 4.10% Cr, 18.00% W, 1.10V	1260 - 1300° C aceite - aire	870 - 900° C	60- 65 Rc	T1	Acero rápido indicado para herramientas de corte de alto rendimiento.
MO 500	0.83% C, 4.10% Cr, 5.00% Mo, 1.90% V, 6.10% W	1190 - 1230° C aceite - aire	870 - 900° C	60- 65 Rc	M2	Acero rápido indicado para herramientas de corte con alta tenacidad.
CA 1220	2.10% C, 12.00% Cr, 0.70% W	925 - 980° C aceite - aire	870 - 900° C	56 - 62 Rc	D3	Alta resistencia al desgaste, para troqueles muy complicados, que cortan espesores hasta 3mm.
CA 1215	1.50% C, 12.00% Cr, 0.95% Mo, 0.35% V	980 - 1025° C aceite - aire	870 - 900° C	56 - 62 Rc	D2	Alta resistencia al desgaste y gran tenacidad. Para corte de chapa hasta 5mm. de espesor. Recomendado para cuños (clavos).
CA 510	1.00% C, 5.00% Cr, 1.10% Mo, 0.80% V	925 - 900° C aire	845 - 870° C	58 - 62 Rc	A2	Acero para troqueles para trabajo en frío de diseño complicado.
SW 55	0.90% C, 1.15% Mn, 0.50% Cr, 0.50% W	760 - 815° C aceite	760 - 790° C	58 - 62 Rc	01	Aceros para troqueles de corte complicado, y cortes hasta 3 mm. de espesor.
WA 255	0.50% C, 1.50% Cr, 2.00% w, 0.20% V	900 - 955° C aceite	790 - 830° C	50 - 58 Rc	S1	Alta resistencia al golpe. Apto para trabajos en frío, troqueles, cuchillas, para chapa gruesa y en caliente (ojo: diferente revenido.)
W 10 V	1.00% C, 0.20% V	760 - 845° C agua	760 - 790° C	55 - 62 Rc	W2	Acero al Carbono para troqueles y herramientas cabeceadoras.
MOG 510V	0.35% C, 5.10% Cr, 1.50% Mo, 1.00% V	995 - 1040° C sales - aire	845 - 900° C	38 - 50 Rc	H13	Acero al Cromo-Molibdeno-Vanadio muy apto para continuos choques térmicos.
MOG 511	0.35% C, 5.10% Cr, 1.50% Mo, 1.00% V	995 - 1025° C sales - aire	845 - 900° C	38 - 50 Rc	H12	Acero al Cromo-Molibdeno-Tungsteno para trabajos en caliente, especialmente dados de forja y herramientas para prensas de extrusión.
NG 2 SUPRA	0.70% C, 0.75% Cr, 1.50% Ni	790 - 845° C aceite	760 - 790° C	48 - 56 Rc	L6	Acero al Cromo-Níquel-Molibdeno para trabajos en caliente, para dados de forja de muy alta tenacidad.
EWX 40	0.12% C máx. 4.60% Cr, 0.70% Mo	970 - 995° C cementado templado-aceite	870 - 900° C	58 - 62 Rc	P4	HOBGING IRON al Cromo-Molibdeno y bajo Carbono, para clavado profundo para moldeo de plástico (pulido espejo).
P 20 ESR	0.36% C, 1.80% Cr, 1.00% Ni, 0.20% Mo	Se suministra con tratamiento térmico de temple revenido		28 - 62 Rc	P20	Acero tratado fabricado por el proceso de Refusión bajo escoria desarrollado para moldes para plástico.
W 11 P	1.00% C	760 - 845° C agua	760 - 790° C	55 - 62 Rc	W1	Acero AISI W1, rectificado plata.
SW 55 P	0.90% C, 1.15% Mn, 0.50% Cr, 0.50% W	790 - 815° C aceite	760 - 790° C	58 - 62 Rc	01	Acero SW (AISI 01) rectificado plata.
<p>* Opcional ** Estos análisis pueden variar dentro de la norma *** La dureza debe ser elegida de acuerdo con el tipo de trabajo en que se aplique la herramienta</p>						

Tabla 1.3. Composición química y tratamientos térmicos para aceros

1.4 COMPRESORES.

Los primeros modelos de compresores para refrigeración fueron principalmente de tipo vertical, de una etapa, típicos de la maquina de amoniaco. Ya que el amoniaco fue el refrigerante más popular en aquellos días, estos compresores eran muy pesados para soportar presiones muy altas y en comparación con los compresores modernos, los antiguos operaban a velocidades relativamente bajas. Avance en el diseño de las válvulas, sellos en el eje del compresor, rodamientos y sistemas de lubricación produjeron un incremento gradual en la velocidad. Esto permitió que los compresores fueran más pequeños para una potencia dada (HP), puesto que se incrementaba el desplazamiento con la operación a mayor velocidad.

La introducción de nuevos refrigerantes también tuvo una incidencia considerable en el diseño y desarrollo de los compresores. Por ejemplo, cuando se usa amoniaco, todas aquellas partes del sistema expuestas al refrigerante tenían que ser construidas de acero. La introducción del dióxido de azufre y el cloruro de metilo como refrigerantes hizo posible la utilización de metales no ferrosos en algunos casos. El advenimiento de los refrigerantes de hidrocarburos halogenados sin embargo, tuvo quizás el mayor efecto sobre el diseño de los compresores. Hizo posible el uso de metales no ferrosos tales como el aluminio. Simultáneamente con la introducción del refrigerante 12 el compresor del tipo herméticamente sellado llegó a ser popular.

El desarrollo de compresores para aplicaciones de refrigeración comercial y aire acondicionado ha sido considerablemente influenciado por el uso de compresores en los refrigeradores domésticos. Los compresores herméticamente sellados y los aparatos de alimentación de refrigerante de tubo capilar fueron introducidos inicialmente y probados en aplicaciones de refrigeración doméstica. En los años treinta los compresores herméticamente sellados empezaron a ser normalmente usados por los productores de refrigeradores domésticos. A los pocos años los compresores accionados por bandas prácticamente desaparecieron del campo de la refrigeración doméstica. Los productores de cabinas para helado, enfriadores de bebida, enfriadores de agua, etc. Fueron los siguientes en la adopción de los compresores herméticamente sellados.

En 1935 el primer compresor hermético para servicio de aire acondicionado fue introducido y en los años cuarenta la mayoría de los productores de aire acondicionado habían cambiado a compresores herméticos para sus productos. La tendencia hacia el uso de compresores herméticos para refrigeración comercial y aire acondicionado ha continuado.

1.4.1. Clases de compresores.

Los sistemas frigoríficos a compresión, se pueden dividir en tres clases según el tipo de compresor:

- Herméticos
- Semiherméticos
- Abiertos

En los herméticos el compresor y su motor eléctrico están concentrados dentro de la misma carcasa por lo que todo el sistema esta hermetizado con soldaduras.

En los semiherméticos el motor y el compresor también tienen la misma carcasa, pero en lugar de estar hermetizada por soldadura, la carcasa tiene una tapa unida por tornillos y hermetizado por una junta, por lo que se puede acceder a su interior. Se llaman también herméticos accesibles.

En los abiertos el motor esta separado del compresor, comunicando el giro al compresor mediante un eje hermetizado con juntas.

La información posterior solo se refiere a los compresores herméticos de tamaño pequeño y mediano.

Tipos de compresores de acuerdo al diseño mecánico.

Los compresores según el diseño de su mecánica se dividen en tres clases:

Alternativos
Rotativos
Scroll

1.4.2. Tipos de compresores alternativos según su aplicación.

El motor eléctrico de la mayor parte de los compresores alternativos, se enfría evacuando parte de su calor por la carcasa del compresor pero, principalmente gracias a los gases fríos que retornan del evaporador.

El caudal de los gases de retorno es mucho mayor cuando el sistema frigorífico trabaja en la parte de su curva de temperaturas de evaporación altas, que cuando lo hace a temperaturas bajas, así hacer un motor que pudiese trabajar correctamente, desde -40 °C hasta 10 °C resultara muy caro.

La mayoría de fabricantes de compresores alternativos herméticos, dividen el campo de trabajo en varias zonas, siendo las más normales:

LBP	Refrigeradores y congeladores domésticos	-35°C a -10°C
LBP	Refrigeradores y congeladores comerciales	-40°C a -10°C
HMBP	Botelleros y cubiteros	-25°C a +10°C
HBP	Botelleros	-10°C a +10°C
AC	Aire acondicionado	-10°C a +10°C

Tabla 1.4. División del uso de compresores.

Aunque los compresores de AC pueden trabajar desde -10°C, normalmente los acondicionadores no suene trabajar por debajo de -5°C y en cambio si suelen hacerlo hasta 12°C.

1.4.3. Parámetros que definen un compresor.

Los parámetros para definir un compresor son:

- Aplicación o campo de trabajo
- Refrigerante
- Producción frigorífica
- Cilindrada
- Consumo eléctrico y producción frigorífica específica
- Voltaje y frecuencias nominales
- Clima
- Clases de enfriamiento del compresor

1.4.3.1 Aplicación o campo de trabajo

En la tabla 1.4 se explican las diferentes utilidades, de los sistemas frigoríficos. El compresor se selecciona según el campo de temperaturas a las que ha de trabajar, y el margen que garantiza el fabricante del compresor.

Seleccionar un compresor fuera de su margen de trabajo normal, puede provocar que el motor y el aceite se quemen, o que le falte potencia para soportar las sobrecargas frigoríficas.

1.4.3.2 Refrigerante

Una vez determinado el gas refrigerante a utilizar, es imprescindible utilizar un compresor diseñado para este gas. En ocasiones se puede emplear un compresor con un refrigerante diferente del que el catálogo indique, pero siempre hay que consultar al fabricante entre otros motivos, porque al emplear un gas diferente muchas veces hay que hacerlo trabajar en un campo de temperatura de evaporación distintas del normal del catálogo.

1.4.3.3 Producción frigorífica

La producción o capacidad frigorífica, determina la cantidad de calor que el sistema es capaz de sacar a través del evaporador en un tiempo determinado.

La unidad más corriente es kilocaloría por hora (kcal/h) y actualmente las normas internacionales han adoptado el watio (W). Muchos países de influencia anglosajona, todavía utilizan la unidad Térmica Británica por hora (BTU/h).

Para pasar de Kilocalorías a watios se debe dividir por el factor 0.86, es decir, $kcal/h/0.86=W$.

Dividiendo los BTU/h por 3.41 se pasa a W.

1.4.3.4 Cilindrada

La cilindrada es el volumen que desplaza el pistón en su recorrido por el cilindro del compresor. Este volumen resulta de multiplicar la sección del pistón por su recorrido. Se suele dar en cm^3 .

Al comparar dos compresores diferentes sin saber la producción frigorífica, se puede hacer por comparación de las cilindradas.

1.4.3.5 Consumo eléctrico y producción frigorífica específica

El resultado de dividir la producción frigorífica por el consumo eléctrico del compresor. Normalmente se expresa en kcal/W.h (llamada EER) o en W/W (llamada COP).

Actualmente se da mucha importancia al ahorro de energía, por eso los fabricantes están haciendo gamas de compresores domésticos, cuya calidad principal es una producción frigorífica específica baja.

1.4.3.6 Voltaje y frecuencias nominales

Las redes eléctricas de los distintos países, tienen muchos voltajes muy diferentes unos de otros, así hay 100V, 127V, 220 V, etc.

Todos los países tienen caídas de tensión en sus redes, de forma que su voltaje oscila bastante según la zona del país que se trate, esto obliga a los fabricantes del compresor hacer motores que abarquen una zona de voltajes que por lo general suelen ser de 15% inferior y un 10% superior, al nominal, por ejemplo un motor de 220V habría de poder arrancar y trabajar sin problemas desde 187V a 242V.

En los países donde todavía el voltaje es más variable, se hace un motor que abarque más campo de tensiones, entonces el nominal se pone en varios valores, por ejemplo 200-220V, de esta forma, el 15% en menor se cuenta a partir del mínimo voltaje y el 10% en más del máximo, por lo que en este caso resultaría en un campo de trabajo desde 170V hasta 242V.

Es muy importante escoger bien la tensión nominal del compresor según el país donde trabajará y conocer los voltajes reales de su red.

Así como hay muchas redes con tensiones nominales dispares, de frecuencia, prácticamente solo hay dos, 50 y 60 ciclos (Hz). La frecuencia del compresor y de la red, han de ser las mismas, sino es que hay que tener en cuenta que la tensión del compresor varía con un factor multiplicador, en más o menos, según la relación $60/50=1.2$; veces la nominal del compresor, por ejemplo un compresor de 220V/50 Hz si se quiere conectar a una red de 240V/60 Hz se transformaría a $220 \times 1.2 = 264$ V de nominal calculando el 15% en menos resultaría que no podría trabajar por debajo de $264 \times 0.85 = 224$ V/60 Hz por el contrario la red de 240 V/60 puede bajar hasta $240 \times 0.85 = 204$ V.

1.4.3.7 Clima

La temperatura del clima de los distintos países del mundo es muy variada, por eso las normas oficiales de frigoríficos han dividido estos climas en varias clases según la temperatura a la que se han de ensayar.

Estas clases son:

Templado	32°C	designado con la letra N
Subtropical	38°C	designado con las letras NT
Tropical	43°C	designado con la letra T

La diferencia de coste de un mueble frigorífico diseñado para un clima tropical respecto de otro para templado, es notable por ello se suelen hacer distintos según el clima, en cambio, los compresores se hacen para que puedan soportar los tres climas.

Hay excepciones, como algunos compresores de bajo consumo que solamente pueden trabajar en climas templados, otros preparados para algunos países “supertropicales” y que pueden trabajar a temperatura ambiente de 50°C, y después los que están diseñados para trabajar con enfriamiento natural y que sólo pueden utilizar en climas templados.

1.4.3.8 Clases de enfriamiento del compresor

Para evacuar el calor generado en el interior del motocompresor se utilizan tres métodos de enfriamiento:

Natural estático
Enfriador de aceite
Ventilado.

En el enfriamiento natural, el calor sale por toda la superficie de la carcasa, solo por el intercambio con el aire que envuelve al compresor y sin ayuda de ningún elemento adicional. Se emplea en los compresores domésticos pequeños de hasta aproximadamente 200W.

El enfriador de aceite se emplea en compresores domésticos y pequeños comerciales hasta un consumo aproximado de 350W.

El uso de un ventilador es necesario para compresores de mayor tamaño o menores de 350W pero que generen mucho calor en proporción a su tamaño pequeño, como pueden ser los utilizados en enfriadores de botellas.

1.5 FACTORES ECONOMICOS.

La consideración del costo es tan importante en el proceso de la decisión para el diseño, que tardaría uno tanto en examinarlo como en estudiar el diseño mismo.

En primer lugar debe observarse que no se puede decir nada en absoluto en lo que respecta a costos. El costo de los materiales y de la mano de obra aumenta por lo general de un año a otro. Sin embargo, es de esperar que los costos de procesamiento de materiales manifiesten una tendencia a la baja, debido al uso de maquinas herramientas automatizadas y robots industriales. El costo de fabricar un mismo producto varía de una ciudad a otra y de una planta a otra, debido a la

diferencia que hay en gastos generales, mano de obra, impuestos, ajustes por flejes y ligeras variaciones por manufactura.

1.5.1 Estimaciones de costos.

Hay muchas maneras de obtener valores relativos de los costos, de modo que se pueda hacer una comparación aproximada entre dos o más diseños. En algunos casos se requiere cierto grado de criterio. Otra forma de comparar el costo de un diseño con otro es simplemente contar el número de piezas integrantes, pues es probable que cueste menos el diseño que tenga menor cantidad de elementos. Se pueden utilizar muchos otros estimadores de costos, dependiendo de la aplicación, como extensión superficial, volumen, potencia, par de rotación, capacidad, velocidad y diversas relaciones de funcionamiento.

1.5.2 Uso de tamaños estándar.

Este es un principio básico para reducir los costos. Para tener la seguridad que se especifican tamaños estándares preferidos, el ingeniero de diseño debe tener conocimiento de las listas de existencia comerciales de los materiales a emplear. Tales listas se pueden consultar en bibliotecas u otros centros de información, o bien, se adquieren directamente con los abastecedores.

Aunque por lo general en los catálogos de fabricantes se incluye gran número de tamaños, puede suceder, sin embargo, que las piezas de determinados tamaños no se consigan fácilmente, pues se emplean rara vez que no se tengan en existencia. Realizar un pedido urgente de tales tamaños puede significar un aumento en gastos y tiempos de entrega. En consecuencia se debe tener conocimiento también de una lista de existencias, que de materiales de uso frecuente con medidas en pulgadas y milímetros.

En el diseño se especifican muchas piezas o maquinas que deben comprarse, como motores eléctricos, bombas, cojinetes y sujetadores. En este caso el diseñador también debe tratar de especificar elementos que se puedan conseguir con facilidad. Los que se fabrican y venden en grandes cantidades suelen costar mucho menos que los de tamaños poco comunes.

1.5.3 Ciclo de vida.

Empieza con la concepción de una necesidad y termina con la jubilación del producto. La selección del material es un elemento importante en el ciclo de vida.

El primer paso es la evaluación de las condiciones de servicio. Luego, deben determinarse las propiedades de los materiales que se relacionan directamente a los requisitos de servicio. El diseño puede empezar con la consideración de fuerza del rendimiento en forma estática, pero las propiedades que son más difíciles de evaluar, son por ejemplo fatiga, dureza, ductilidad y resistencia de corrosión; y tienen que ser consideradas.

Existe una conexión íntima entre el diseño, la selección de materiales y los procesos de la producción. La durabilidad es en función al número de ciclos de posible funcionamiento, es decir, la vida útil del producto.

1.5.4 Uso de tolerancias de fabricación.

Entre los efectos que tienen las especificaciones de diseños sobre los costos, los de las tolerancias son quizá los más significativos. Las tolerancias en el diseño influyen de muchas maneras en la productividad del objeto diseñado; tolerancias estrechas, por ejemplo, pueden necesitar pasos adicionales de procesamiento, o incluso originar que la fabricación de una pieza sea totalmente incosteable. El término tolerancia abarca tanto la variación de las dimensiones y los límites para la aspereza (o rugosidad) de las superficies, como la variación de las propiedades mecánicas impartidas por tratamientos térmicos u otras operaciones de procesado.

Puesto que las piezas que tienen tolerancias amplias se pueden producir con máquinas de alto rendimiento de producción, el costo de mano de obra será menor que si fuera necesario emplear operarios muy calificado. Así mismo, serán pocas las piezas de este tipo que se rechacen durante el proceso de inspección, y por lo general será más fácil montarlas o ensamblarlas.

1.5.5 Puntos de equilibrio.

A veces sucede que, cuando se compara el costo de dos o más diseños, el criterio para elegir uno de estos dependerá de condiciones tales como volumen de producción, velocidad de las líneas de ensamble o alguna otra condición. De esta manera se llega a un punto donde se igualan o equilibran los costos, el cual recibe el nombre de punto de equilibrio.

1.5.6 Aspectos económicos relacionados con el herramental.

Se emplea un tiempo considerable en instalar, ajustar y poner en funcionamiento la herramienta en la prensa, y, cuando las series de producción son pequeñas, los costes relativos suponen una proporción relativamente elevada de los costes totales de producción. Cuanto más complejo es un herramental, más tiempo se emplea en instalarlo y ponerlo en funcionamiento, y más altos son los costes que conlleva. Aquí, no solo es una cuestión de costes de mano de obra, sino también de costes de tiempo perdido de producción de la prensa.

Cuando están involucradas series pequeñas de producción, puede resultar más económico compactar piezas semiterminadas con un herramental simple, necesitando menor tiempo de establecimiento y puesta en marcha, y terminar la pieza mediante un mecanizado convencional.

1.5.7 Costo del herramental.

Los costos de fabricación del herramental de compactación pueden variar entre 10,000 y 100,000 dólares dependiendo del tamaño y del número de piezas móviles independientes.

El herramental para grandes cantidades de piezas debe, por supuesto, ser diseñado para una vida lo más larga posible. Esto significa: carburos cementados para la matriz y las flechas, alta calidad del acero y tratamientos térmicos óptimos para los punzones, máximo acabado superficial en las superficies deslizantes y un perfecto ajuste entre la matriz, los punzones y las flechas – con otras palabras, altos costos de material y taller –.

El costo directo de material para un herramental de compactación es aproximadamente el 15% de los costos totales de producción (sin incluir el costo de diseño). Con herramientas complicadas la repartición de los costos de materiales es incluso menor. Esto deja claro que reducir los costos de materiales conduce a ahorrar de manera equivocada.

Los costos residuales, las reparaciones del herramental, las pérdidas de producción, las entregas retrasadas como consecuencia de los fallos de los materiales del herramental o ensamblajes descuidados pueden aumentar considerablemente los costos iniciales totales de dicho herramental.

El tiempo empleado en el diseño, aún con la ayuda de programas computacionales de diseño, puede fácilmente abarcar varias semanas si el herramental es un poco más complicado.

El diseño asistido por computadora y la programación (CAD/CAM) así como los procesos de producción controlados por computadora, está siendo aplicado incluso en la industria pulvimetalúrgica.

Pero nunca podrán sustituir a la creatividad del diseñador, ni a la experiencia ni habilidad del fabricante de herramientas.

Desde el punto de vista económico, es importante vigilar cuidadosamente el funcionamiento de cada herramienta durante su ciclo de vida completo, así como documentar cada característica o causa de mal funcionamiento del herramental o de cualquier miembro de éste. Sólo mediante una rutina sistemática podrá acumularse un conocimiento realista que nos ayude a evitar futuros errores en su diseño y fabricación.

CAPITULO 2

P O L V O S M E T Á L I C O S

2.1. BREVE HISTORIA SOBRE LOS POLVOS METÁLICOS

La producción industrial de polvo de hierro empezó en 1937 con el apoyo de la General Motors Corporation en EE.UU. Desde 1922 Höganäs producía polvo de hierro esponja de alta calidad para la industria sueca como materia prima en la fabricación de aceros especiales como aceros de herramientas y aceros inoxidable.

Las primeras pruebas en 1937 demostraron que, debido a su alta porosidad, el hierro esponja producido por Höganäs podría ser utilizado mediante conminución para la fabricación de polvo de hierro. Höganäs empezó a producir polvo de hierro a pequeña escala en Suecia entre 1937 y 1939 y se realizaron envíos regulares a los EE.UU.

Estos tipos iniciales de polvo de hierro esponja no eran recocidos y contenían más de un 2% de oxígeno reducible y de un 0.15% de carbono. Por tanto, su compresibilidad era pobre y la reducción de óxidos residuales tenía que producirse durante el proceso de sinterización con consumo del carbono presente en las piezas compactadas. Bajo tales condiciones, era imposible emplear el carbono como elemento de aleación. La densidad en masa (densidad aparente) de estos polvos era relativamente baja, de 2.2 a 2.4 g/cm³.

Después de 1940, Höganäs introdujo un proceso de recocido en el cual el polvo de hierro puro era calentado en presencia de amoníaco disociado (75%H₂+25%N₂), obteniéndose menores contenidos en oxígeno residual y carbono, y en consecuencia, una mayor compresibilidad. Este tipo de polvo mejorado sustancialmente fue comercializado con el nombre de MH100.24 que fue el precursor del actual NC100.24.

Durante la 2ª Guerra Mundial, la pulvimetalurgia del hierro alcanzó un gran desarrollo en Alemania, donde, debido a la escasez de cobre, las carcasas de artillería para proyectiles, que eran producidas en grandes cantidades, se compactaban y sinterizaban a partir de polvo de hierro. En 1944, las cantidades ascendieron a 30.000 toneladas por año. Para este propósito, el polvo de hierro se obtenía principalmente por molienda de alambres y restos de planchas de hierro en molinos de martillos del tipo *Hametag*. Con este proceso se obtenían polvos adecuados para su aplicación, que han seguido produciéndose en Checoslovaquia hasta 1987-89. Sin embargo, los costes de producción eran tan altos que este proceso tuvo una vida muy corta en Europa Occidental después de la guerra.

Conjuntamente a los esfuerzos llevados a cabo durante la guerra, se desarrollaron otros procesos para fabricar polvo de hierro en Alemania. El más importante fue el llamado proceso RZ (Roheisen-Zunder-Verfahren) desarrollado por Mannesman AG. Hierro fundido desulfurado era atomizado por un chorro de aire. El polvo resultante estaba formado por pequeños aglomerados de partículas esféricas

cuya superficie estaba fuertemente oxidada y el centro tenía un alto contenido en carbono. Este polvo inicial se calentaba en cajas de hierro cerradas y el óxido superficial de las partículas reaccionaba con el carbono del interior, dando lugar a una atmósfera reductora de monóxido de carbono dentro de las cajas. Después de este tratamiento, el polvo estaba formado por partículas con una superficie esponjosa y un núcleo compacto. Gracias a la superficie esponjosa de sus partículas, el polvo tenía una buena resistencia en verde, pero debido a la relativamente alta cantidad de óxidos residuales, tenía una pobre compresibilidad.

La producción y utilización de los polvos de hierro tipo RZ, ha cesado hoy en día. Sin embargo, se emplea una versión del antiguo proceso RZ modificada por la Québec Metal Powders Corporation de Canadá para la producción de sus polvos Atomet. También aquí, la base del proceso es un hierro fundido líquido, que a diferencia del proceso RZ es atomizado con un chorro de agua en vez de aire. El polvo resultante se muele y mezcla con óxido de hierro. En un proceso de recocido posterior en condiciones reductoras, el carbono y el oxígeno son eliminados de la mezcla. Aunque todavía se produce este tipo de polvo, está evolucionando gradualmente a otros tipos obtenidos por atomización por agua de hierro líquido de bajo contenido en carbono.

Inmediatamente después de la guerra, Husquarna Vapenfabriks AB de Suecia, desarrolló un proceso para fabricar polvo de hierro a partir de hierro electrolítico. Este polvo de hierro electrolítico, extremadamente puro y de excelente compresibilidad, era ideal para fabricar componentes de alta densidad. Sin embargo, a causa de su alto coste de producción, encontró un mercado muy limitado y su fabricación cesó a principios de los setenta.

Desde 1950, también los polvos de hierro esponja Höganäs han sido producidos por Hoeganaes Corporation en Riverton, N.J., EE.UU.

En 1958, Esamann AB de Suecia, un fabricante de electrodos para soldadura, empezó a producir polvo de hierro por atomización por agua de hierro líquido de bajo carbono.

Este polvo tenía una alta densidad aparente y se usaba como uno de los componentes del recubrimiento de los electrodos para soldadura que la compañía fabricaba.

En 1962, la A.O.Smith Corporation en EE.UU. fue la primera en utilizar la atomización por agua de hierro y aceros líquidos de bajo carbono, seguidos de un proceso de recocido, en la fabricación de polvos para componentes estructurales sinterizados. Estos polvos tuvieron en éxito inmediato porque, debido a su alta compresibilidad, permitían la fabricación de componentes de alta densidad de excelente calidad.

En 1968, Höganäs AB comenzó a producir polvos de hierro y acero atomizados por agua en Suecia (absorbiendo la planta de Esamann) y en EE.UU.

(construyendo una nueva planta de atomización en Riverton, N.J.). Depurando el proceso de atomización por agua, Höganäs pronto consiguió fabricar polvos de hierro atomizados de mejor calidad, alguno de los cuales tenían un grado de compresibilidad similar al de los polvos de hierro electrolíticos, con lo que finalmente les sustituiría en el mercado.

Actualmente (2003), Höganäs AB fabrica polvos de hierro y acero en Suecia, Bélgica, EE.UU., Brasil, Japón, China y la India.

2.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.

Las peculiaridades de los distintos tipos de polvos procedentes de un mismo metal dependen de su método de obtención y de los tratamientos a los cuales han sido sometidos.

Las propiedades fundamentales, forma, composición química, tamaño de partícula, distribución, porosidad y microestructura, definen básicamente el tipo de polvo.

Las propiedades secundarias se derivan de las fundamentales y su determinación suele ser corriente en el control industrial. Entre ellas cabe citar la densidad, distinguiendo entre densidad aparente y densidad del polvo vibrado; la velocidad de derrame, la superficie específica, la compresibilidad, la compactibilidad o consolidabilidad, la plasticidad y la capacidad de endurecimiento por trabajo, llamada también acritud. Industrias como las del cemento, los colorantes o la minería, se interesan igualmente por estas propiedades.

2.2.1. Forma.

La forma indica la geometría de la partícula. Dicha geometría depende del método empleado para obtener el polvo. La forma puede determinarse directamente por observación microscópica óptica o bien electrónica, especialmente por microscopía de barrido electrónico (SEM). Dado que la forma de las partículas incide en las características secundarias del polvo (velocidad de derrame, compresibilidad, consolidabilidad, etc.) su conocimiento cualitativo es interesante desde el punto de vista práctico.

2.2.2. Composición.

La composición del polvo se obtiene mediante el análisis químico, el cual nos permite conocer la naturaleza del material y su pureza. Los métodos de análisis empleados en pulvimetalurgia son tan variados como interesantes, comprendiendo la gravimetría, la volumetría y numerosos métodos de análisis instrumental. Por otra parte, la práctica pulvimetalúrgica requiere, como característica de gran interés, conocer además la distribución de las impurezas. El óxido interior de la partícula pasa al componente sinterizado sin interferir apenas, mientras que el óxido superficial o bien es eliminado en la atmósfera reductora del horno o bien dificulta la unión de las partículas. Conviene, por lo tanto, conocer la cantidad de óxido superficial, que se expresa como la pérdida de hidrógeno (pH_2) que se produce en el

horno de atmósfera de hidrógeno, calculada pesando el polvo antes y después de la calcinación.

2.2.3. Tamaño y distribución.

El tamaño de la partícula queda definido por sus dimensiones. En el caso de partículas esféricas, el tamaño se expresa mediante su diámetro. Cuando se trata de partículas no esféricas, se aplica el concepto de diámetro medio, cuya definición depende del método escogido para su determinación. Por ejemplo, si se emplea el tamizado, se expresa el diámetro medio en términos de la malla; si se utiliza el recuento microscópico, se recurre a la media de varias dimensiones; etc.

Es raro encontrar polvos que tengan un tamaño de partícula uniforme, por ello se hace necesario introducir la distribución, que define la desviación de tamaños del conjunto y repercute en las características secundarias del polvo. La determinación de la distribución y del tamaño suelen hacerse simultáneamente.

Entre los métodos aplicados a la determinación del tamaño de las partículas cabe diferenciar los que necesitan medio húmedo de los que no lo necesitan:

- a) Medio húmedo: Sedimentación, centrifugación, microscopía y modulación del flujo eléctrico (Contador Coulter).
- b) Medio seco: Tamizado, elutriación, microscopía y permeabilidad (Fisher).

El método más empleado para determinar la granulometría de las partículas es el tamizado que consiste en la separación de partículas mediante tamices de distinta malla que las dejan pasar a las retienen, también se aplica para preparar fracciones destinadas a la mezcla de polvos con distribución de tamaños previamente programada.

Los tamices más divulgados son los que se adaptan a la escala de Tyler, recomendada por las normas ASTM E11. Se trata de tamices de malla de tejido de alambre, cuyo número Tyler indica la cantidad de mallas por pulgada lineal. Como cabe esperar este número varía inversamente respecto al que expresa la abertura de malla en micras.

2.2.4. Porosidad.

La porosidad indica el grado de compactidad de la partícula de polvo. Podemos distinguir dos tipos de porosidad, según el poro se encuentre en la superficie o en el interior de las partículas pulverulentas, y que denominaremos porosidad externa y porosidad interna, respectivamente. Los polvos de hierro obtenidos por reducción de sus óxidos presentan microporosidad interna. En cambio, los polvos de acero atomizados previa reducción de los óxidos formados, presentan cierta porosidad superficial, siendo sus núcleos compactos. Los polvos de procedencia electrolítica presentan características semejantes a estos últimos.

A su vez, en la porosidad interna pueden distinguirse dos tipos de poros: el tipo esponja, en el cual los poros se presentan como un conjunto de huecos aislados, y el

tipo erizo, en el cual los poros están interconectados. La porosidad interna se detecta mediante observación al microscopio o por medida de densidad. La porosidad de tipo erizo, así como la porosidad superficial, producen elevados valores de superficie específica, fáciles de detectar.

2.2.5. Microestructura.

La microestructura es el aspecto que representan a la observación microscópica los polvos desbastados y pulidos.

Mediante la observación microscópica puede estudiarse el tamaño, la forma y la disposición de los distintos cristales, denominados granos, que constituyen una partícula de polvo. Las características citadas dependen del método de obtención del polvo, de su pureza y del tratamiento térmico al que ha estado sometido el metal.

2.2.6. Densidad.

En este tipo de medidas es preciso hacer la distinción entre la densidad aparente y la densidad del polvo vibrado. La primera se define como la relación entre el peso en gramos y el volumen en centímetros cúbicos de una masa pulverizada. La densidad del polvo vibrado es esta misma relación, pero tras someter la masa pulverizada a sacudidas de intensidad y duración normalizadas, en un recipiente de dimensiones fijas. Esta densidad de polvo vibrado sólo tiene un reducido interés práctico.

La medida de la densidad aparente se efectúa pesando un recipiente de volumen conocido enrasado con el polvo problema. Esta medida depende de la forma de las partículas, de su tamaño y distribución, así como de su porosidad. Su interés reside en el hecho de que las matrices normalmente se llenan con un volumen fijo de polvos, por lo que la densidad indica la profundidad con la cual deben diseñarse.

2.2.7. Superficie específica.

Se define la superficie específica de la masa de polvo como la relación que hay entre su superficie y el peso, expresándose su valor en cm^2/gramo ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$). Su determinación se realiza midiendo la velocidad de disolución del polvo o de una reacción química, o bien por medidas de permeabilidad, microscopía, y especialmente, por fenómenos de absorción.

2.2.8. Velocidad de flujo.

Es el tiempo en segundos que una cantidad de 50g de polvo seco tarda en pasar a través de un embudo de apertura estandarizada. La velocidad de flujo depende del tipo y cantidad de lubricante añadido al polvo. La velocidad de flujo da idea de lo rápido que puede ser rellenado con polvo la herramienta de compactación, y por tanto es un factor limitante en el ciclo de compactación.

2.2.9. Compresibilidad.

La compresibilidad del polvo es la reducción de volumen que se obtiene por prensado del mismo. Se emplea también a fin de materializar numéricamente esta característica, la llamada relación de compresión, definida como el cociente entre la densidad del polvo compactado en verde —es decir, sin sinterizar— y la densidad

aparente. Como es lógico, a una mayor presión aplicada le corresponde una reducción del volumen mayor, o sea una mayor densidad en verde; por lo tanto, la relación de compresión es una relación asintótica que tiende a un valor máximo de la densidad.

2.2.10. Consolidabilidad.

La consolidabilidad del polvo es la presión mínima necesaria para producir un compactado de resistencia en verde satisfactoria

2.2.11. Resistencia en verde.

Es la resistencia que una barra rectangular en verde presenta a ser doblada. La resistencia en verde aumenta con la densidad de compactación y depende del tipo y cantidad del lubricante añadido al polvo. Se necesita una resistencia en verde suficiente para que la pieza compactada no se rompa durante la expulsión de la matriz de compactación y su posterior manipulado y transporte desde la prensa hasta el horno de sinterización. Cuanto más compleja y delicada es la forma de una pieza compactada, mayor debe ser su resistencia en verde. Si su resistencia en verde es suficientemente alta, incluso puede ser mecanizada antes de sinterizarse

2.2.12. Plasticidad.

La plasticidad es la cualidad de ser fácilmente deformable con carácter permanente que poseen los polvos. Cuanto mayor es la plasticidad, mayor es el aumento de la superficie de contacto de los polvos durante la compactación. En este caso, la resistencia en verde y la densidad aumentan considerablemente. La plasticidad es función de la composición química del polvo de su forma y de su microestructura.

2.2.13. Acritud.

La acritud es la capacidad que posee el polvo de endurecerse por el trabajo. La facultad de deslizarse que poseen los planos cristalográficos de empaquetamiento máximo unos sobre otros se traduce en un aumento del número de imperfecciones cristalinas y de la dureza y del límite elástico, así como en una disminución de la tenacidad. Este fenómeno altera la distribución de tamaños en el polvo e incrementa la densidad en la etapa de la compactación.

2.2.14. Spring-back (Tensión de recuperación elástica).

Es la expansión elástica de una pieza compactada cilíndrico (25mm de diámetro) después de su expulsión de la matriz de compactación. Su valor se expresa como la diferencia entre el diámetro exterior y el diámetro interior de la matriz dividido entre el diámetro interior de la matriz. El spring-back aumenta con la presión de compactación y depende del tipo y la cantidad de lubricante añadido al polvo, y del coeficiente de elasticidad del material con que está fabricada la matriz en la cual el polvo es compactado. El spring-back es importante para calcular las dimensiones exactas de la herramienta de compactación en función de las dimensiones requeridas de la pieza compactada.

La mayoría de las características o propiedades enlistadas del polvo influyen en los procesos de compresión y sinterización, así como en las resistencias inicial y final.

2.3. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE POLVOS.

Se han desarrollado diferentes métodos para la producción de polvos metálicos. Los más importantes son la reducción de minerales (hierro esponja), la volatilización (atomización) y la galvanoplastia. En la pulvimetalurgia convencional, los polvos producidos por la reducción de minerales se usan extensivamente, pero en años recientes el empleo de polvos producidos por volatilización ha crecido rápidamente. Los polvos que se producen por galvanoplastia sólo se usan para propósitos especiales y su mercado esta disminuyendo. Los tipos de polvos y sus propiedades tienen una influencia notable en las propiedades finales del componente, por lo cual es importante tener un conocimiento fundamental de los polvos.

En la actualidad los dos métodos diferentes de fabricación mediante los cuales se produce más del 90% de los polvos de hierro y acero en el mundo son: el *proceso para hierro esponja* y el *proceso de atomización por agua*.

Los polvos de hierro y acero para la fabricación de componentes estructurales sinterizados (incluyendo escobillas porosas sinterizadas), se producen en muchas partes del mundo. El consumo mundial de estos polvos ha estado aumentando progresivamente de forma rápida en las últimas tres décadas y a finales de 1999 excedía las 723,000 toneladas.

2.3.1. El Proceso Hierro Esponja

El proceso hierro esponja, es esencialmente un proceso químico en el cual la mena de hierro finamente dividida es reducida con coque en polvo, produciendo una masa esponjosa de hierro metálico sólido, que puede ser triturada en polvo de hierro fácilmente. La mena de hierro usada es magnetita (de alto contenido en Fe_3O_4) obtenida por minería selectiva en minas del norte de Suecia y Noruega. Esta magnetita, que contiene muy pequeñas cantidades de impurezas y extremadamente bajo contenido en sulfuro y fósforo. Ver figura 2.1.

El proceso comienza con dos materias primas: una "mezcla reductora" de coque en polvo y caliza (1), y magnetita preprocesada (2).

La magnetita y la mezcla reductora son secadas por separado en dos hornos rotatorios (3). La mezcla reductora ligeramente aglomerada una vez seca es triturada (4) y cribada (5), y la magnetita seca se pasa a través de un separador magnético (6). Después ambos materiales son cargados por medio de un sistema de carga automática en unas retortas cerámicas en forma de tubos (7), (18) y (19). Estas retortas tienen un diámetro interno de 40 cm y 2 m de longitud y están formadas a su vez por cuatro segmentos de tubo de carburo de silicio, apilados unos sobre otros.

Estas retortas se sitúan, de 25 en 25, en unos vagones de brida de carril que están revestidos con una capa gruesa de ladrillos refractarios. Estos vagones viajan

lentamente a través de un horno en forma de túnel de 260 m de longitud aproximadamente (8) en el cual las retortas son gradualmente calentadas a una temperatura máxima de 1200 °C. Cuando la temperatura dentro de las retortas aumenta, el coque en polvo empieza a quemarse formando CO, el cual, empieza a reducir la magnetita a hierro metálico mientras se oxida a CO₂.

El CO₂ así producido, reacciona con el coque en polvo restante formando de nuevo CO, que otra vez reduce más magnetita a hierro metálico. Esta reacción cíclica continúa hasta que toda la magnetita se ha reducido a hierro metálico y la mayor parte del coque en polvo se ha quemado. Paralelamente al ciclo reductor, la caliza de la mezcla reductora extrae el azufre del coque.

Una vez completada la reducción, las retortas son lentamente enfriadas hasta 250 °C aprox. antes de salir del horno. En cada retorta, hay ahora una torta de hierro esponja con una porosidad de alrededor del 75%, residuos de coque en polvo sin quemar y ceniza rica en azufre. En una estación de descarga automática (9), los tubos de hierro esponja son retirados y el coque restante y la ceniza extraídos de las retortas. Después de esto las retortas están listas para cargarse de nuevo y empezar un nuevo viaje a través del horno. Los tubos de hierro esponja (después de haber sido limpiados del coque y la ceniza adheridos), son triturados en varios pasos hasta obtener partículas de menos de 3 mm (10). El polvo así obtenido es almacenado en silos antes de continuar con el proceso. Desde un silo intermedio (11), el polvo se pasa a través de una cadena de separadores magnéticos especialmente diseñada (12), molinos (13) y tamices (14), para refinar las partículas hasta lograr un tamaño menor de 150µm (< 100 mallas Tyler) y una densidad bien determinada (densidad aparente).

Posteriormente, el polvo pasa por un horno de cinta (15) donde se somete a un recocido de ablandamiento a 800-1000 °C en hidrógeno, con lo que los restos de carbono y oxígeno se reducen a un nivel muy bajo. Durante el recocido, el polvo se aglomera en forma de tortas desmenuzadas, que son de nuevo trituradas en un molino especial. El polvo así tratado presenta una buena compresibilidad y alta resistencia en verde. Muchos hornos de cinta son capaces de transportar el gran volumen de polvo de hierro a tratar. Estos modernos hornos de cinta calentados eléctricamente están especialmente diseñados para este propósito. El ancho de cinta es de 1500mm.

El polvo procedente de varios hornos de cinta es recolectado en un silo especial (16), donde es homogeneizado en lotes de 60 o 120 toneladas. Cada lote es revisado cuidadosamente con respecto a las propiedades especificadas, si todo es correcto es empaquetado y almacenado, listo para enviar (17).

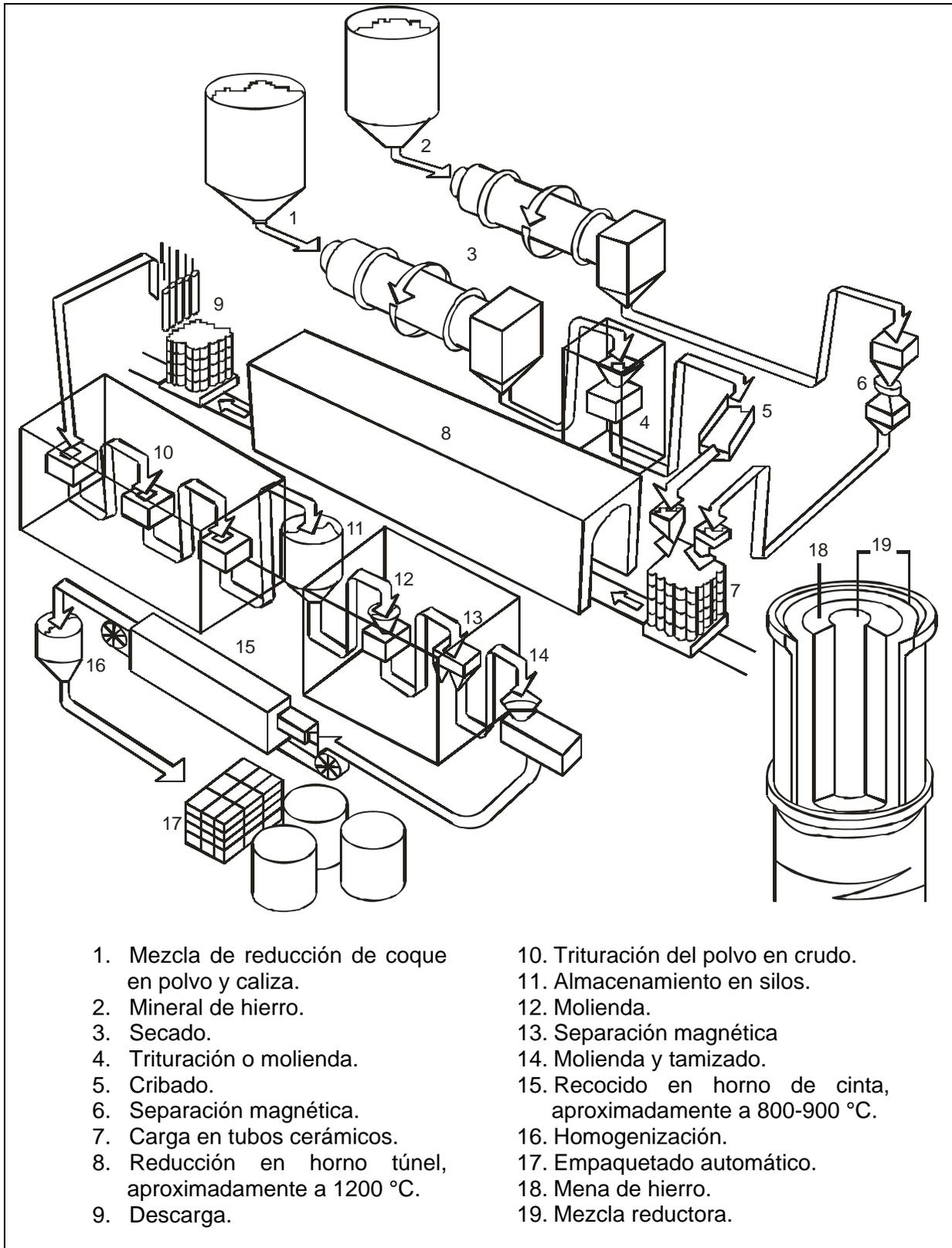
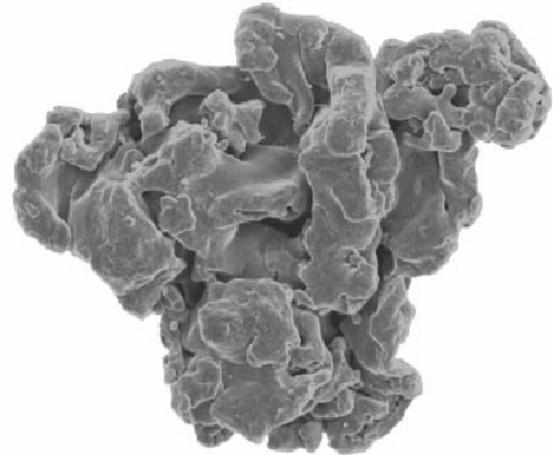
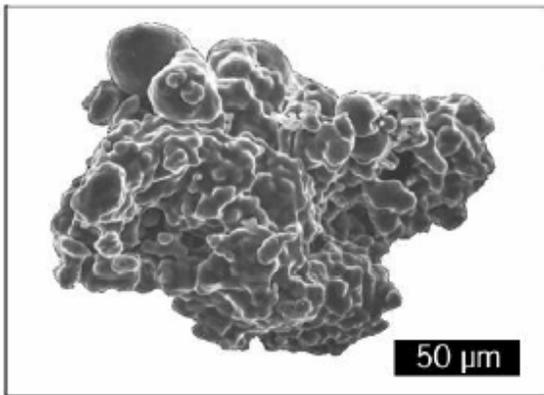


Figura 2.1.a. Esquema del proceso hierro esponja.



2.1.b. Polvo de hierro esponja

2.3.2. Proceso de atomización por agua.

La materia prima para este proceso es una cuidadosa selección de chatarra y hierro esponja. Ver figura 2.2. Esta materia prima (1) es fundida en un horno de arco eléctrico de 50 ton. de capacidad (2) donde, si se desea, pueden añadirse elementos de aleación.

El fundido se descarga, a través de un agujero en la parte de abajo del horno, a una cuchara de colada (3) donde es afinado con una lanza de oxígeno (4). Después la cuchara es transferida hasta la estación de atomización (5), y el hierro líquido (o acero) se hace pasar a través de un agujero en la parte inferior de la cuchara a un crisol especialmente diseñado (A).

Desde allí, el hierro líquido (o acero) fluye en forma de corriente controlada (B) a través de una boquilla anular (D) donde es golpeada por chorros de agua altamente presurizada (C). La corriente de hierro (o acero) líquido se explota en finas gotitas (E). Algunas de estas gotitas se enfrían inmediatamente en pequeñas esferas, mientras que otras, se enfrían y se unen en pequeños aglomerados de formas irregulares.

El aire arrastrado por el chorro de agua y el vapor de agua resultante del proceso de atomización, causan una oxidación superficial en las pequeñas gotas. Las gotitas solidificadas y el agua de atomización son recolectadas en un gran contenedor, donde se depositan como un lodo. A este lodo de polvo se le extrae el agua por escurrido (6) y secado (7).

El polvo seco es separado magnéticamente de las impurezas (8), tamizado (9) y homogeneizado (10), y finalmente transportado en unos contenedores especiales (11) hasta la fábrica para ser sometidos a otros procesos.

Cuando las partículas de polvo atomizado dejan la planta de atomización, además de estar oxidadas superficialmente, tienen una gran dureza porque debido a

las elevadas velocidades de enfriamiento impuestas por el proceso de atomización, han solidificado con estructura martensítica a pesar de su bajo contenido en carbono. Por lo tanto, el polvo es sometido a un recocido de ablandamiento y sus óxidos superficiales y el carbono residual reducidos en hornos de cinta como los descritos en el apartado anterior. Los procesos de homogeneización, control de calidad, empaquetado y almacenado son iguales que para los polvos de hierro esponja.

Los polvos de hierro producidos por galvanoplastia son más costosos que los producidos por reducción o volatilización. Los polvos electrolíticos se usan únicamente cuando se pueden aprovechar sus propiedades especiales (incluyendo alta pureza, densidad y compresibilidad).

Existen varios procesos más para manufacturar polvos que se utilizan solamente en aplicaciones especiales.

Los fabricantes de polvos proporcionan toda la información necesaria acerca de sus productos, la cual debe estudiarse cuidadosamente antes de seleccionar un polvo para una aplicación específica.

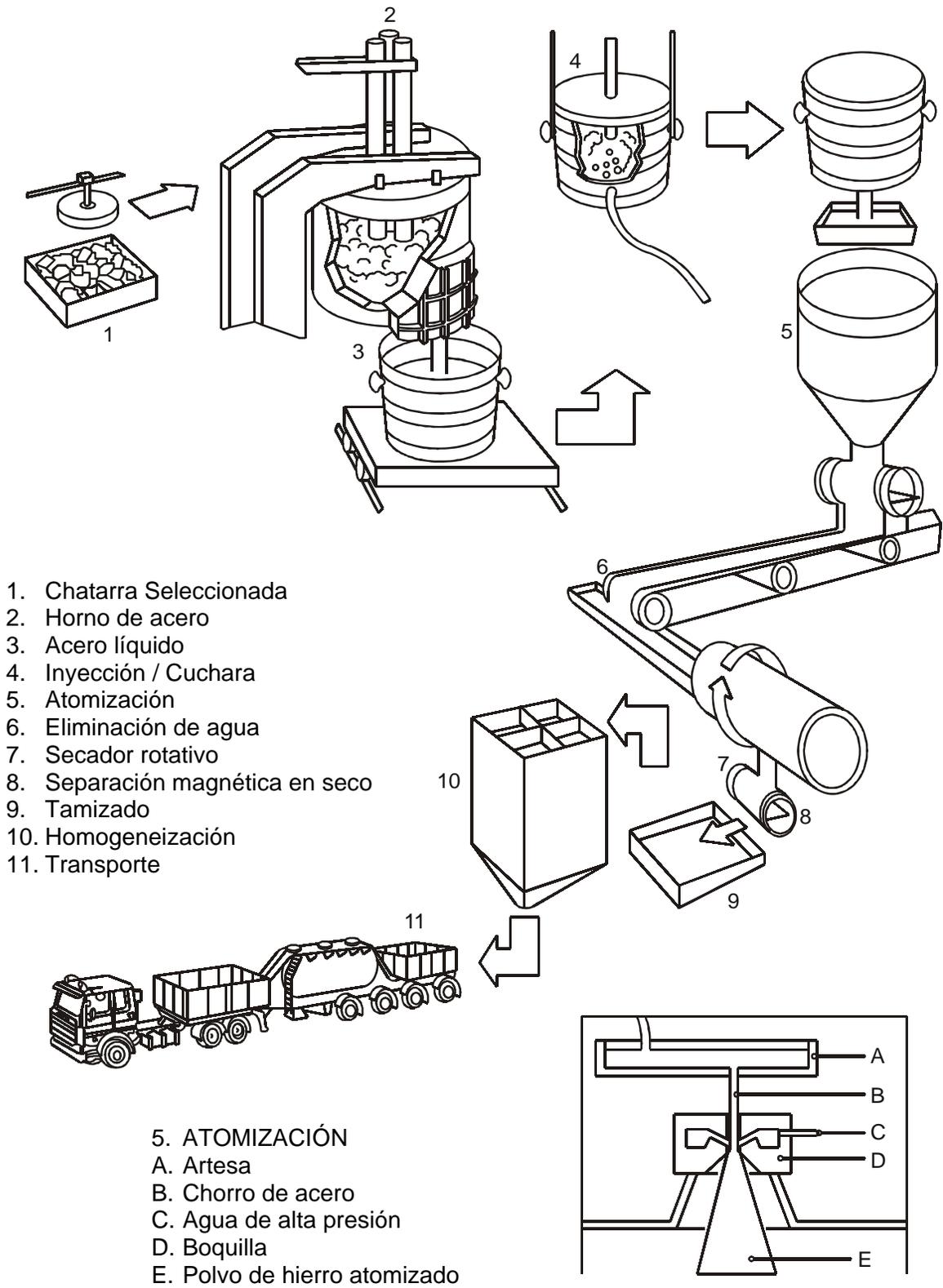


Figura 2.2.a. Diagrama del proceso de atomización por agua.

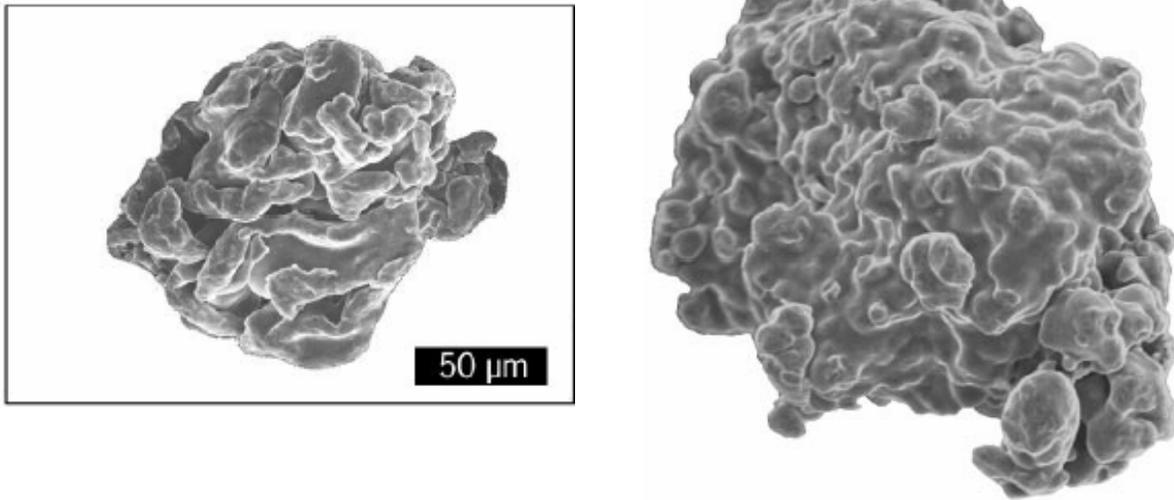


Figura 2.2.b. Polvo hierro atomizado.

2.4. METODOS DE ALEACION

Para lograr materiales féreos sinterizados endurecibles, han de añadirse carbono y otros aleantes apropiados como por ejemplo, cobre, níquel y molibdeno. Mientras que el carbono es normalmente añadido al polvo de hierro en forma de grafito, los elementos de aleación metálicos suelen introducirse mediante uno de estos dos métodos:

2.4.1. Método 1 (*Polvos aleados homogéneamente*)

Atomización por agua del hierro líquido aleado, obteniéndose un polvo aleado homogéneamente.

Ventajas:

- Los aleantes no se segregan cuando el polvo es manipulado.
- Se obtienen piezas sinterizadas aleadas homogéneamente.

Inconvenientes:

- Presentan una baja compresibilidad porque sus partículas están endurecidas por solución sólida.
- Si se quiere cambiar o corregir la composición del polvo aleado, por poco que sea, habrá que atomizar un nuevo fundido (normalmente 50 toneladas de una vez).

2.4.2. Método 2 (*Mezclado de polvos*)

Mezclado mecánico de polvo de hierro puro con los distintos aleantes en forma de polvo, y permitiendo que el proceso de aleación tenga lugar durante la sinterización de los componentes compactados a partir de la mezcla de polvo.

Ventajas:

- Presentan una mayor compresibilidad.
- No se requiere una operación adicional de mezclado, ya que el polvo de todas formas ha de ser mezclado con el lubricante.
- La composición de la mezcla puede variarse o corregirse fácilmente remezclándolo con cantidades adicionales de polvo de hierro o aleantes.

Inconvenientes:

- Las piezas sinterizadas resultantes presentan menos homogeneidad, porque los aleantes añadidos (excepto el carbono) difunden muy despacio en el hierro sólido.
- Los aleantes tienden a segregarse cuando la mezcla es transportada y manipulada. (Sin embargo, los polvos mezclados pueden hacerse resistentes a la segregación por medio de tratamientos especiales).

2.4.3. Distaloy y Starmix

Para acabar con el problema de segregación en la mezcla de polvos, algunos productores de polvos entre ellos Höganäs AB han desarrollado dos procesos especiales patentados para la producción de mezclas de polvo de hierro resistentes a la segregación. Mediante estos procesos se produce una gran variedad de mezclas tanto estándar como con composiciones especiales conocidas comercialmente como Distaloy y Starmix.

El proceso Distaloy, consiste en lo siguiente:

Los aleantes empleados en el proceso Distaloy son principalmente cobre, níquel y molibdeno (nunca grafito) en forma de polvo con tamaño muy fino. El proceso comienza con el pesado de un lote de producción de 5 o 15 toneladas de polvo de hierro y los correspondientes aleantes requeridos en las proporciones exactamente controladas. Este lote es mezclado en un mezclador de doble cono. Cuando la mezcla es descargada del mezclador hay que tomar precauciones especiales para evitar la segregación.

La mezcla así producida es tratada térmicamente en un horno continuo de atmósfera reductora a una temperatura por debajo del punto de fusión del aleante con dicha temperatura más baja. Durante este tratamiento térmico las partículas finas del aleante añadido se aglomeran de forma segura a la superficie de las partículas de polvo de hierro más gruesas.

La mezcla de polvo así tratada contiene los aleantes lo más finos y dispersos posible y es totalmente resistente a la segregación. El hecho de que las partículas de hierro estén localmente prealeadas no tiene efectos negativos sobre la compresibilidad de la mezcla.

El grafito y los lubricantes han de ser excluidos del proceso Distaloy ya que durante el tratamiento térmico de la mezcla, el grafito carburaría las partículas de hierro, con lo que disminuiría la compresibilidad de la mezcla de polvos, y los lubricantes se quemarían.

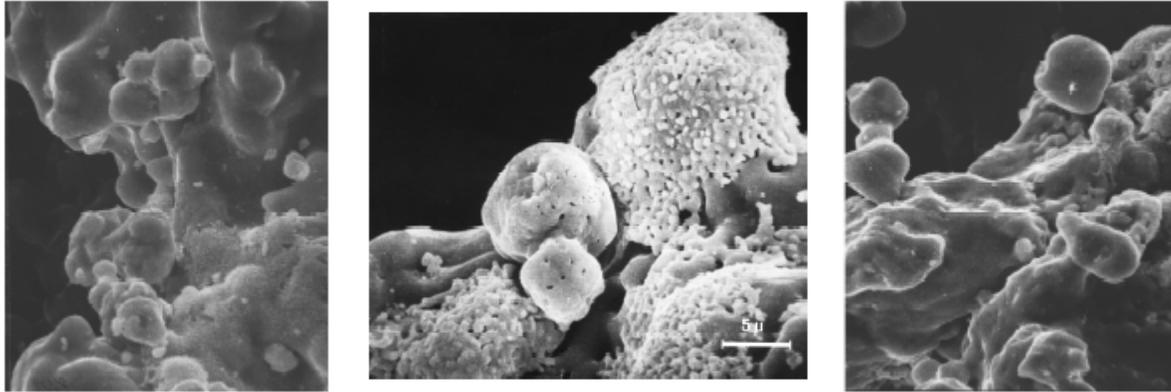


Figura 2.3. Partículas de polvo de hierro con aglomerados de finas partículas de cobre, níquel y Molibdeno; realizado por el proceso distaloy.

El proceso Starmix emplea ligantes orgánicos especiales para fijar el grafito, lubricantes y otros aditivos a las partículas de hierro durante el proceso de mezclado.

El proceso Starmix puede ser aplicado tanto a mezclas convencionales de polvo de hierro como a polvos Distaloy; en ambos casos se obtienen polvos listos para ser prensados a prueba de segregación.

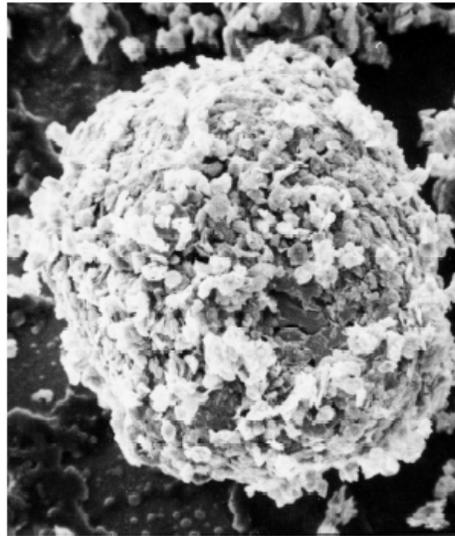


Figura 2.4. Finas partículas de grafito pegadas a la superficie de una partícula de polvo de hierro realizado por el proceso starmix.

CAPITULO 3 PULVIMETALURGIA

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS PULVIMETALURGICOS.

La producción de un componente mediante técnicas pulvimetalúrgicas normalmente abarca las siguientes etapas o fases:

- Producción o selección de polvo
- Preparación, incluyendo la mezcla y combinación
- Compresión y compactación
- Sinterización y tratamiento térmico
- Tratamiento de postsinterización, si es necesario

3.2. PREPARACIÓN DEL POLVO.

Una etapa importante en la producción de componentes de polvo metálico es la preparación del polvo por su compactación y sinterización. La preparación de un polvo consiste principalmente en mezclar o combinar los elementos aleantes para obtener una distribución uniforme de las partículas por tamaño, así como del polvo que constituye la base de la mezcla y además revestir las partículas con un lubricante. El proceso de mezcla debe llevarse a cabo cuidadosamente. Una mezcla excesiva puede ocasionar endurecimiento por deformación, desgaste de las partículas al chocar entre si, formación de capas y otros inconvenientes. Deben seguirse las recomendaciones del fabricante.

La lubricación puede ser interna o externa. En la lubricación interna se mezcla un lubricante (estearato de cinc o ácido esteárico, 0.25-1% por peso) con el polvo, el cual aumenta su compresibilidad y disminuye su resistencia inicial. Después de la compresión el lubricante es extraído por tratamiento térmico (en aire a 375-425 °C), antes de la sinterización en una atmósfera controlada. En la lubricación externa solo se lubrican las paredes de la matriz, evitando así el tratamiento térmico necesario para extraer el lubricante, pero este método no proporciona las propiedades de mejor compactación y fluencia.

Considerando los elementos aleantes, debe hacerse una distinción entre elementos aleantes metálicos y no metálicos, ya que tienen velocidades de difusión bastante diferentes y, por tanto, requieren tiempos de sinterización distintos para obtener una estructura homogénea.

En general, el polvo de hierro debe contener cantidades muy pequeñas de carbono y otros elementos aleantes no metálicos, ya que estos incrementan la dureza y disminuyen la compresibilidad. La compresibilidad se mide como la densidad obtenida con una presión de compactación de 400 N/mm². El método preferido es mezclar el polvo con grafito (1% de grafito da como resultado un acero con 0.8% de C después de la sinterización) de tal manera que se conserve una buena compresibilidad.

La aleación hecha mezclando el polvo con las cantidades correctas de elementos metálicos requieren un tiempo muy largo de sinterización para lograr una estructura homogénea. Para reducir el tiempo requerido de sinterización se prefieren los polvos prealeados, ya que la reducción de compresibilidad no es muy grave. Si se usan polvos obtenidos por reducción, la aleación con elementos metálicos normalmente es parcial, lo cual requiere una etapa especial de aleación. El polvo puro se mezcla con los elementos aleantes y se somete a tratamiento térmico, de tal manera que tenga lugar una difusión incompleta dentro del polvo básico. Durante la sinterización final después de la compactación se completa la difusión. Si se usan polvos obtenidos por volatilización se obtiene una aleación verdadera o normal, ya que el polvo aleado se produce directamente a partir del estado líquido. Tales polvos se llaman polvos prealeados.

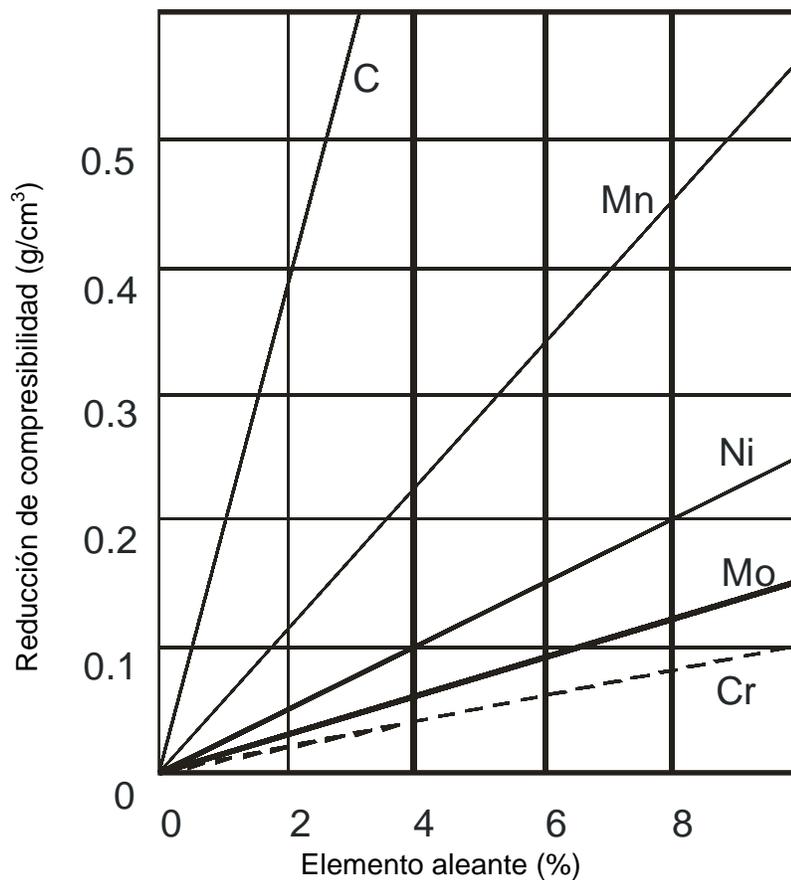


Figura 3.1. Influencia de los elementos aleantes en la compresibilidad de los polvos de acero.

En la década pasada tuvo lugar un rápido incremento en el consumo de polvos parcialmente aleados (obtenidos por reducción) y de polvos prealeados (obtenidos por volatilización). Usando estos polvos se pueden obtener excelentes propiedades mecánicas para los componentes, como resistencias a la tracción en el intervalo de 400 a 1000 N/mm², e incluso se pueden alcanzar valores de 1500 N/mm² con polvos especiales y más costosos. Los elementos aleantes son esencialmente Cu, Ni, Mo y

Mn. Los polvos de acero inoxidable se están empleando a un ritmo creciente. El desarrollo de polvos que permiten obtener componentes de alta resistencia incrementa considerablemente el mercado potencial de los productos pulvimetalúrgicos.

También existe una amplia gama de polvos de metales no ferrosos que incluye polvos de latón, de bronce, de aluminio, de níquel y de cinc.

3.3. COMPACTACION DE POLVOS.

La descripción siguiente es una descripción elemental, ya que la tecnología de la compresión o compactación es un tema extenso y complejo que requiere un alto grado de inventiva técnica.

La compactación es una etapa de la pulvimetalurgia que tiene por objeto dar forma y consistencia a la masa de polvo para su manipulación, con cuidado, desde su expulsión de la matriz hasta el paso por el horno de sinterización. En esencia consiste en aplicar una presión suficiente a la masa de polvo (previamente tratada según aconsejen la naturaleza de la misma y las propiedades a conseguir) colocada en la matriz que es el negativo de la forma acabada.

El comportamiento de una masa de polvo al aumentar la presión se traduce en un aumento de la densidad. En la figura 3.2 se representa la densidad frente a la presión para un tipo comercial de polvo de hierro reducido. En (a) la matriz está llena de polvo de densidad 2.4 g/cm^3 . En (b) ambos punzones se han desplazado una corta distancia en cada extremo, el polvo se ha compactado ligeramente (0.1 Tm/cm^2) y la densidad ha llegado a 2.9 g/cm^3 . Todavía no tienen lugar fenómenos de deformación de las partículas individuales y no aparecen fuerzas de adhesión entre ellas. Al aumentar la presión tiene lugar la deformación plástica, o la rotura, según el tipo de polvo. La adherencia suficiente para este tipo de polvo se consigue con una densidad de 3.2 g/cm^3 , que requiere una presión de compactación de 1.2 Tm/cm^2 , lo que se traduce en una densidad de 4.8 g/cm^3 , doble que la del polvo (c). En (d) se ha aplicado una presión de 3.3 Tm/cm^2 y se ha conseguido una densidad de 6.0 g/cm^3 , y en (e) la razón de compresión o relación entre la densidad en verde y la densidad del polvo es 3.

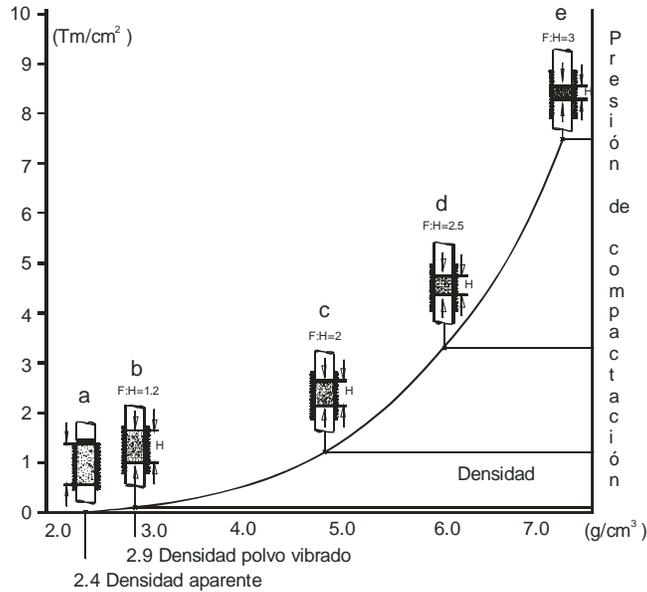


Figura 3.2. Curva de compresibilidad (densidad vs. presión) para el polvo de hierro reducido.

Cabe señalar que en la fabricación de bronce autolubricantes se llega a una razón de compresión inferior a 2.5. La mínima densidad a que se compactan las piezas de hierro para fines prácticos de aplicación es de 5.5 g/cm³.

El dato de la densidad en verde es de gran importancia para predecir las características mecánicas de la pieza acabada, ya que en la etapa de la sinterización dicha densidad apenas varía. Por este motivo suele ser objeto de control rutinario en las industrias de la especialidad.

3.3.1. Fases de la compactación

En la compactación se distinguen claramente tres fases: el llenado del molde, la compresión y la expulsión (figura 3.3)

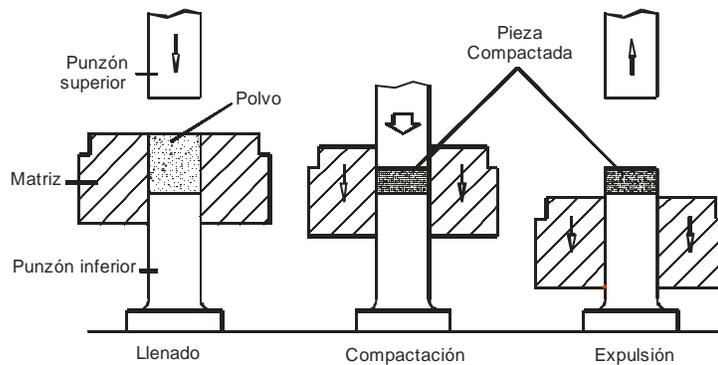


Figura 3.3. Etapas de la compactación: llenado de la matriz, compresión del polvo y expulsión de la pieza compactada.

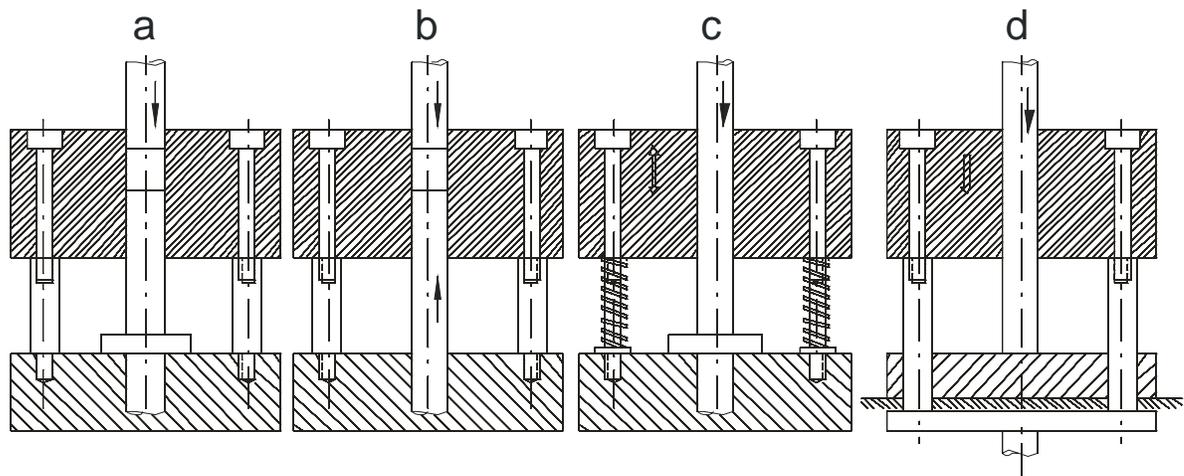
3.3.2. Fase de llenado.

En esta fase la cavidad de la matriz, que es el negativo de la pieza acabada, se llena de polvo, previamente mezclado. La cantidad de polvo se determina por volumen o por peso. En el primer caso se trata de llenar la cavidad hasta que rebose y se enrasa entonces a nivel con la cara inferior de la matriz. Esta operación suele efectuarse automáticamente por medio de una tolva de alimentación de forma cónica conectada a un tubo vertical terminado en una zapata giratoria; al principio de cada ciclo de compresión, el dispositivo de alimentación se coloca sobre la cavidad de la matriz para permitir la entrada del polvo a la misma, lo que se realiza moviendo hacia atrás y adelante la zapata de alimentación. La rotación de la zapata de alimentación detiene la salida del polvo y a su vez el borde inferior elimina el polvo en exceso enrasando la cavidad. Luego, el dispositivo se separa de la matriz para dejar actuar al punzón superior y al punzón inferior que comprimen la masa de polvos y dejan la pieza compactada encima de la mesa de la matriz. Después, el dispositivo de alimentación vuelve a la posición de llenado, expulsando la pieza compactada de la mesa de la matriz.

También se puede llenar la matriz con un peso fijo de polvo. En este caso se acopla al sistema de alimentación un dispositivo de pesada automática.

3.3.3. Fase de compresión.

En esta fase la presión se ejerce con prensas mecánicas o hidráulicas. Las segundas suelen ser de mayor potencia, aunque más lentas (dos piezas/minuto) que las primeras (30 piezas/minuto). La presión se transmite a la masa de polvos de cuatro maneras distintas (figura 3.4)



- Presión aplicada por un solo lado.
- Presión aplicada simultáneamente por los dos lados.
- Matriz flotante.
- Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior.

Figura 3.4. Distintos procedimientos de transmisión de la presión a la matriz.

3.3.3.1. Procedimientos de transmisión de la presión a la matriz

- a) Presión aplicada por un solo lado. La presión de compactación sólo se aplica a la masa de polvos por el punzón inferior. La distribución de la densidad en la pieza compactada no es homogénea, debido a que la masa de polvos no cumple las propiedades hidrodinámicas (principio de Pascal como se aprecia en la figura 3.5)

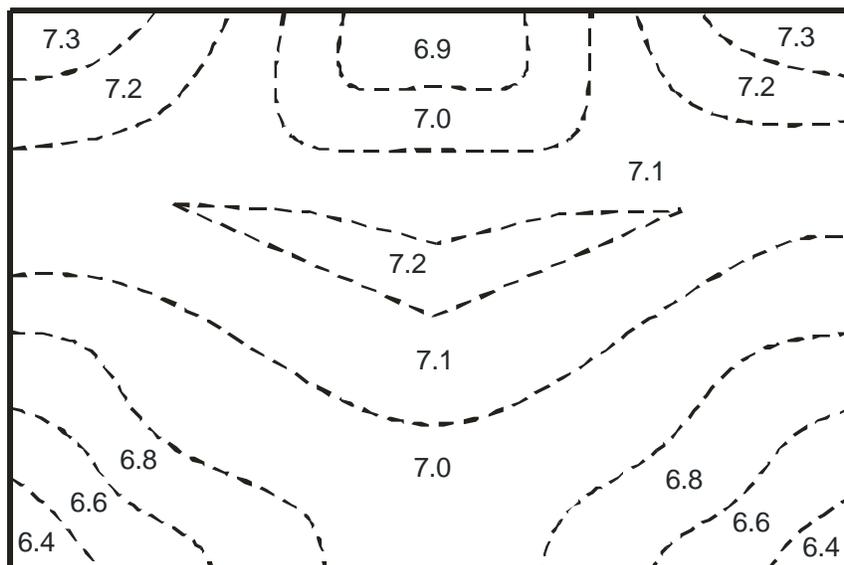


Figura 3.5. Distribución de la densidad en verde en una pieza compactada de polvo de níquel compactada aplicando 7.2 Tm/cm^2 por un solo lado de una matriz cilíndrica de 2 cm de diámetro y 1.7 cm de largo.

- b) Presión aplicada simultáneamente por los dos extremos. La matriz está equipada con dos punzones móviles, uno inferior y otro superior. Se consigue una densidad más homogénea que en el caso anterior. Este es el método ideal, pero en la práctica es el más difícil de conseguir.
- c) Matriz flotante. En este caso la matriz está unida a la base por un muelle. La presión se aplica por el punzón superior de manera que la fuerza de fricción de la masa de polvo con las paredes de la matriz obligan al desplazamiento de ésta hacia abajo. El efecto resultante es parecido al del caso anterior, en el que dos punzones actuaban simultáneamente por los dos extremos.
- d) Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior. La presión se aplica simultáneamente, en el mismo sentido, pero con distinta velocidad, al punzón y a la matriz, de manera que una vez finalizada la carrera deja al descubierto la pieza compactada.

3.3.4. Fase de expulsión.

La expulsión de la pieza compactada, sea presionando con el punzón inferior o por el desplazamiento de la matriz, es la última fase de la compactación.

3.3.5. Fundamentos.

El componente se especifica por su densidad, resistencia, tolerancias y otras propiedades esperadas y el polvo por su curva de compresibilidad, esto es, su densidad en función de la presión de compactación. La densidad aparente o de llenado es de 2.4 g/cm^3 y para una relación de compactación de 2 (la cual da por resultado la mitad de la altura original), la densidad será de 4.8 g/cm^3 . La relación de compactación debe estar en el intervalo de 2.5 a 2.8, que corresponde a densidades en el intervalo de 6 a 7 g/cm^3

Aproximadamente el 90% de los componentes de polvo de uso industrial tienen densidades en el intervalo de 5.7 a 6.8 g/cm^3 , pero en los últimos años ha aumentado la aplicación de componentes que tienen densidades en el intervalo de 7.0 a 7.2 g/cm^3 los cuales tienen excelentes propiedades mecánicas. Esto ha resultado económico debido al desarrollo de mejores materiales para matrices, que tienen alta resistencia al desgaste y de polvos con alta compresibilidad.

El llenado de la cavidad de la matriz generalmente se efectúa mediante dosificación por volumen, donde el polvo fluye al interior de la cavidad y el excedente se elimina raspándolo, con lo que se logran tolerancias de $\pm 1\%$. Si se requiere mayor precisión debe usarse la dosificación por peso, pero esta es más tediosa.

Cuando el polvo ha sido compactado debe ser extraído de la matriz. La fase de expulsión debe realizarse cuidadosamente, ya que puede surgir una fractura en los puntos o secciones débiles cuando se libera la energía elástica o cuando hay fuerzas que actúan sobre una pequeña fracción de la superficie del polvo. Para obtener una producción óptima, se debe analizar cuidadosamente el diseño del componente tanto la fase de compactación como en la de expulsión antes de decidir la geometría final.

3.3.6. Principios.

El componente deseado debe tener, en general, una distribución uniforme de densidad por todas partes. Cuando se compacta polvo en una cavidad con un punzón móvil, las propiedades del polvo causan una distribución irregular de densidad debido a la fricción entre los granos individuales y entre las partículas y las paredes de la matriz. Esto significa que la densidad disminuye al aumentar la distancia del punzón. Debido a esto sólo pueden producirse satisfactoriamente componentes delgados y casi planos con la compactación simple. Comprimiendo por ambos lados (compresión por doble acción) puede obtenerse una distribución más uniforme de densidad. Para obtener una buena distribución de densidad, la relación altura/anchura debe mantenerse por debajo de $2-2 \frac{1}{2}$, siempre que sea posible. Para compactar componentes con diferentes niveles de altura, es necesario seccionar el punzón inferior para obtener la misma relación de compresión (o sea, la misma densidad) en todo el componente.

Cualquier prensa mecánica (de excéntrica, de palanca, de leva, de rótula, etc.) o hidráulica puede usarse con matrices flotantes y de retiro siempre y cuando haya suficiente espacio para las herramientas.

Las posibilidades geométricas en la compactación de polvos dependen ante todo del principio de compactación de polvos y de la inventiva del ingeniero.

3.3.7. Dimensionamiento y acuñación.

Si las tolerancias dimensionales y/o las propiedades mecánicas que se obtienen después de la sinterización (o tratamiento térmico) de las piezas compactadas no son satisfactorias, se puede llevar a cabo una operación de dimensionamiento o acuñación.

La operación de dimensionamiento, que se efectúa a presiones moderadas de compactación, sirve para mejorar la precisión dimensional del producto. En un lote pequeño de componentes se puede usar la matriz primaria de compresión o compactación para efectuar el dimensionamiento de la pieza. Los lotes grandes de piezas normalmente se dimensionan en una matriz especial usando una prensa dimensionadora poco costosa.

La operación de acuñación tiene dos objetivos: mejorar las propiedades mecánicas del producto y satisfacer las tolerancias dimensionales. Las propiedades mecánicas solamente pueden mejorarse aumentando la densidad de la pieza, lo que significa altas presiones de compactación (más altas que o iguales a las presiones primarias de compactación). Por tanto, la acuñación requiere en general una matriz especial, con frecuencia de una mejor calidad que la de la matriz primaria, debido a las mayores presiones y a las condiciones adversas del desgaste.

Cuando se emplea la acuñación, el proceso de sinterización efectuado entre la compactación primaria y la operación de acuñación a menudo es incompleta y constituye una presinterización por un corto tiempo y a una temperatura considerablemente menor que la temperatura normal de sinterización, pero suficiente para recocer la pieza compactada. Después de la acuñación la pieza se sinteriza completamente, produciendo un componente con excelentes propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales. Si los requerimientos del producto son excepcionalmente altos, puede proceder una operación de dimensionamiento después de la acuñación.

3.3.8. Métodos de compactación.

Los métodos de compactación son los siguientes: la compactación cíclica, la compactación por vibración, la compactación explosiva, la compactación en caliente, el spark sintering y el método de la presión isostática.

3.3.8.1. Compactación cíclica

La fabricación directa de chapas, redondos y alambres a partir de polvos por compactación cíclica tiene aplicación para los metales que se obtienen corrientemente en forma de polvo: níquel y titanio. Así se evita la fusión y el moldeo de los mismos.

3.3.8.2. Compactación por vibración

La introducción de la vibración en la etapa de la compactación de los polvos metálicos reduce considerablemente la presión necesaria para obtener piezas de una determinada densidad. Se emplea en este caso tanto la baja frecuencia y alta amplitud, como la baja amplitud y alta frecuencia.

La ventaja inherente a la reducción de presión es el incremento de la vida de las matrices ya que se reducen las sobreexpansiones de las mismas, se eliminan las tensiones internas y se reduce el riesgo de rotura de piezas en el desmoldeo o durante la sinterización. Mediante la compactación por vibración se pueden conseguir piezas de diseño más complicado que las obtenidas por el método convencional y de mayor tamaño, aunque la velocidad de obtención es algo menor.

3.3.8.3. Compactación explosiva

La presión en este método se produce por explosión y se transmite a la masa de polvos por medio de un líquido, generalmente el agua. La compactación explosiva es una técnica adecuada para obtener chapas metálicas, que necesitan altas presiones y gran velocidad, y esto se logra con el empleo de explosivos.

3.3.8.4. Compactación en caliente

La compactación a temperatura ambiente, que es el método convencional, limita la densificación de los polvos debido a la acritud que el trabajo en frío introduce en los mismos. Este inconveniente se elimina compactando en una matriz que se calienta a temperaturas cercanas a la de recristalización de los polvos metálicos. Por otra parte, en caliente se pueden densificar polvos que a temperatura ambiente no tienen o tienen poca plasticidad. Este método ha sido empleado para compactar piezas de diamante y algunos carburos cementados.

Las principales desventajas de la compactación en caliente son: 1) La facilidad de oxidación del polvo, lo que se previene, en parte, empleando una atmósfera controlada hasta que la pieza esté a temperatura ambiente; 2) El control dimensional queda seriamente dificultado, 3) La velocidad de compactación es muy lenta.

También se emplea la compactación por laminación en caliente del polvo y la presión isostática en caliente.

3.3.8.5. Spark sintering

Este método de compactación –económicamente competitivo- combina la presión con aplicación de corriente continua y alterna.

Normalmente se emplea 25 por ciento de corriente alterna y 75 por ciento de corriente continua. La finalidad de la aplicación de electricidad es doble. Por una parte produce un calentamiento por efecto Joule en los contactos interparticulares y por otra parte elimina las cargas eléctricas de la superficie de los polvos.

3.3.8.6. Presión isostática

La presión isostática que permite compactar uniformemente y en todas direcciones materiales pulverulentos (cerámicos, metálicos y sintéticos). Así se puede obtener una pieza compactada en verde de mayor densidad y más homogénea que con las otras técnicas gracias a la eliminación de fricciones entre el polvo y las paredes de la matriz. Este método se llama también de la presión hidrostática porque emplea generalmente agua como fluido. El procedimiento es como sigue:

El polvo a prensar se coloca en un molde de plástico de material sintético, que se introduce en el interior de la cámara de presión. El molde y la cámara se cierran herméticamente, comprimiendo el polvo, y se aumenta progresivamente la presión hidráulica hasta un valor prefijado. Las ventajas del desmoldeo son obvias.

La principal desventaja es la tolerancia dimensional, ya que las paredes plásticas no calibran bien. Este inconveniente se reduce, en parte, adicionando un tubo metálico poroso como soporte exterior.

3.4. SINTERIZACIÓN.

El término de "sinterización" cubre tanto el proceso mediante el cual aumenta la resistencia de una pieza de polvo recién comprimida y disminuye su porosidad, como las operaciones prácticas necesarias para lograr estos cambios. Los factores más importantes en la sinterización son: la temperatura, el tiempo y la atmósfera. Las propiedades obtenidas después de la sinterización están influidas por el material del polvo, el tamaño y forma de las partículas, sus características superficiales y la presión de compactación aplicada.

Si la sinterización tiene lugar a temperaturas inferiores a los puntos de fusión de los constituyentes, el resultado será una sinterización en estado sólido. Si la sinterización se lleva a cabo a temperaturas entre los puntos de fusión de dos de los constituyentes, se tendrá una sinterización con una fase líquida. La sinterización en estado sólido se usa para todos los componentes estructurales; la sinterización con una fase líquida se usa para productos especiales tales como carburos y cerámicas.

En la sinterización en estado sólido, las partículas de la pieza compactada forman un todo coherente. Se pueden identificar las dos fases sobresalientes en el proceso de sinterización.

- *En la primera fase*, las áreas (o puntos) de contacto entre las partículas crecen y forman cuellos redondos, pero la porosidad sigue presente en forma de canales de interconexión.
- *En la segunda fase*, los cuellos crecen y la red de canales se convierten gradualmente a poros aislados. Con el tiempo, los poros tienden a hacerse esféricos, los pequeños se desvanecen y los grandes aumentan de tamaño; de este modo el tamaño medio de los poros aumenta, pero la porosidad total sólo disminuye lentamente.

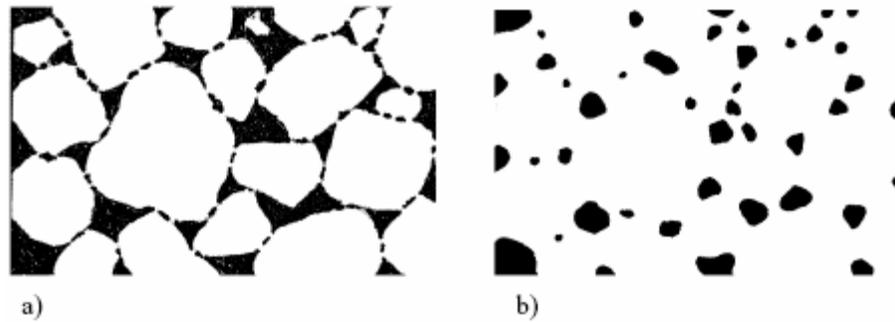


Figura 3.6. Primera (a) y segunda (b) fase en la sinterización.

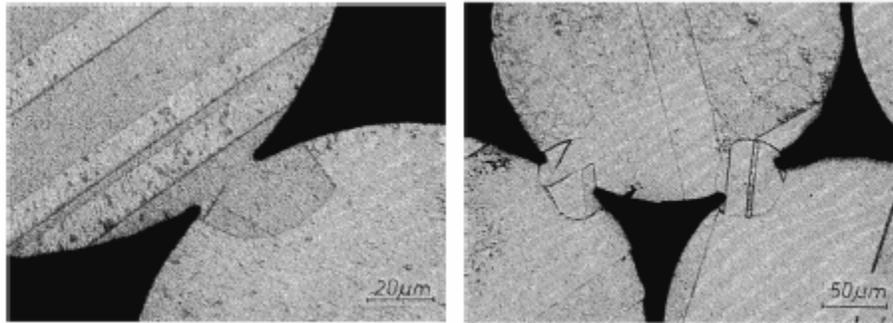


Figura 3.7. Formación de cuellos entre esferas de cobre durante la sinterización.

En la práctica, sólo la primera fase se completa totalmente y dependiendo de la condiciones la segunda fase se completa parcialmente, dando por resultado un producto con una combinación de canales de interconexión y poros aislados.

El proceso de sinterización generalmente consiste en una transportación de masa siendo la fuerza motriz una minimización de la energía libre de superficie. Teóricamente, la fuerza motriz no desaparece antes de que el área superficial alcance un mínimo (igual al área superficial externa de la pieza compactada), pero el tiempo para proceder desde el final de la primera fase hasta esta situación ideal es tan grande que nunca ocurre en la práctica.

La transportación de masa se lleva a cabo por deformación plástica, evaporación/condensación, difusión superficial y difusión volumétrica. De estas, las difusiones superficial y volumétrica son las más importantes.

La temperatura y el tiempo de sinterización tienen una gran influencia en las propiedades finales del producto. La densidad del componente es casi independiente de la temperatura y del tiempo. La contracción del componente se compensa con una pérdida de peso debida a la reducción de los óxidos de la superficie, a la evaporación de los lubricantes y a otras causas. En los polvos de hierro, la resistencia a la tracción generalmente aumenta en forma considerable cuando la temperatura ha pasado de 650 °C. Este aumento de resistencia disminuye cuando la

temperatura ha excedido unos 900 °C. Los polvos de hierro normalmente se sinterizan en el intervalo de 900 a 1150 °C. El tiempo de sinterización tiene una considerable influencia en la resistencia final a la tracción. Cuando se sinteriza el polvo de hierro a 1150 °C, aproximadamente el 85% de la máxima resistencia obtenible (correspondiente a un tiempo de sinterización de 2 h) se consigue después de 15 min. En la práctica, con frecuencia se usan tiempos de sinterización en el intervalo de 0.5 a 1.5 h. La ductilidad del componente final varía con la temperatura y el tiempo en forma similar a la variación en la resistencia a la tracción.

Durante la acuñación se requieren fuerzas mínimas cuando la sinterización no ha avanzado mucho, en otras palabras cuando la resistencia mecánica no ha aumentado demasiado. Con los polvos de hierro la presinterización se lleva a cabo en el intervalo de 650 a 850 °C, cuando las partículas han quedado totalmente recocidas sin incrementos significativos de resistencia, siendo necesarias presiones más altas de acuñación.

La sinterización se realiza en una atmósfera protectora para prevenir la oxidación durante el calentamiento y reducir los óxidos existentes, para eliminar los gases resultantes del calentamiento de lubricantes y otros materiales y para controlar la carburación y descarburación de las piezas compactadas de hierro o ricos en hierro. Las atmósferas más usadas (el tipo depende del material y del objetivo) son de hidrógeno, de amoniaco disociado, de amoniaco quemado, de gases endotérmicos y exotérmicos y vacío.

La sinterización se lleva a cabo en varios tipos de hornos, los cuales pueden ser del tipo continuo o intermitente.

En años recientes se ha desarrollado un nuevo proceso combinando la compactación y la sinterización: el proceso de sinterización por chispas. En él, una chispa eléctrica de alta energía descargada por una batería de capacitores elimina en uno o dos segundos los óxidos y otros contaminantes de las partículas, las cuales se someten entonces a una presión de compactación. La corriente se mantiene unos 10 seg., durante los cuales el polvo es comprimido un poco más entre los electrodos para obtener la densidad deseada. Este proceso se ha aplicado a muchos materiales diferentes, pero todavía no se usa ampliamente en la industria.

Cuando uno de los constituyentes principales es líquido durante la sinterización, el proceso es totalmente diferente. La sinterización con una fase líquida implica contracciones muy grandes de volumen, entre 40 y 60%, que provocan una precisión dimensional menor que la producida por la sinterización en estado sólido. La producción de carburos sinterizados (WC, TiC, etc., con cobalto como aglutinante) es un ejemplo importante.

3.4.1. Elementos de la Sinterización.

El proceso de sinterizado está regulado por los siguientes elementos:

- Temperatura y tiempo
- Estructura geométrica de las partículas de polvo
- Composición de la mezcla de polvos
- Densidad de la pieza compactada
- Composición de la atmósfera protectora en el horno de sinterización

El significado práctico de estos parámetros puede ser descrito brevemente como sigue:

3.4.1.1. Temperatura y tiempo.

A mayor temperatura de sinterización menor es el tiempo requerido para conseguir el grado de unión deseado entre las partículas de polvo en la pieza compactada (especificado por ejemplo en términos de resistencia mecánica).

Esto supone un dilema: desde el punto de vista de la eficiencia de la producción serían preferibles tiempos de sinterización más cortos, pero las correspondientes elevadas temperaturas de sinterización son menos económicas debido a los altos costos de mantenimiento del horno de sinterizado. En la pulvimetalurgia del hierro, las condiciones normales de sinterización son: 15-60 minutos a 1120-1150°C.

3.4.1.2. Estructura geométrica de las partículas de polvo.

Para condiciones de sinterización dadas, los polvos constituidos por finas partículas de alta porosidad interna (gran superficie específica) sinterizan más rápido que los polvos constituidos por partículas gruesas. De nuevo nos surge un dilema: los polvos finos son generalmente más difíciles de compactar que los polvos gruesos y las piezas compactadas fabricadas con polvos finos se contraen más durante la sinterización que las fabricadas con polvos gruesos. Las partículas de polvo de hierro comerciales (tipo esponja o compacto) para elementos estructurales son usualmente £ 150 mm.

3.4.1.3. Composición de la mezcla de polvos.

Los componentes de la mezcla de polvos son seleccionados procurando conseguir las propiedades físicas deseadas y controlando los cambios dimensionales durante el sinterizado

Cuando se sinterizan mezclas de polvos de dos o más metales (por ejemplo hierro, níquel y molibdeno), tiene lugar una aleación entre los componentes simultáneamente al proceso de unión. Para temperaturas comunes de sinterización (1120/1150°C) los procesos de aleación son lentos (excepto entre Fe y C), y no se consigue una homogeneización completa de los aleantes metálicos.

Si la mezcla de polvos contiene un componente que forma fase líquida a la temperatura de sinterización (por ejemplo mezcla de polvos de Au y Fe), también existe unión entre partículas y los procesos de aleación se aceleran.

3.4.1.4. Densidad de la pieza compactada.

A mayor densidad de un polvo compactado, mayor es el área total de contacto entre las partículas de polvo y más eficientes son los procesos de unión y aleación durante el sinterizado. Además, estos procesos mejoran por los defectos en la red cristalina de las partículas, causados por deformación plástica durante la compactación.

3.4.1.5. Composición de la atmósfera protectora en el horno de sinterización.

La atmósfera protectora tiene que llevar a cabo varias funciones durante la sinterización, las cuales en algunos aspectos son contradictorias. Por un lado la atmósfera protege los materiales sinterizados frente a la oxidación y reduce los posibles óxidos residuales presentes; por otro lado evita la descarburización del material que contiene carbono y viceversa, para evitar la carburización del material libre en carbono.

Esto ilustra el problema de elegir la atmósfera correcta para cada tipo de productos sinterizados. En pulvimetalurgia de hierro son usuales las siguientes atmósferas de sinterización:

- Tipo reductor descarburizador: hidrógeno(H_2), amoníaco disociado (75% H_2 , 25% N_2),
- Tipo reductor carburizador: endogas (32% H_2 , 23% CO , 0-0.2% CO_2 , 0-0.5% CH_4 , N_2),
- Tipo neutro: nitrógeno criogénico (N_2), si se desea con pequeñas adiciones de H_2 (para proteger la pieza de óxidos residuales) o de metano o propano (para restablecer las pérdidas de carbono).

La elección adecuada y el control cuidadoso de la atmósfera de sinterización es importante pero difícil debido a las circunstancias que serán tratadas con mayor detalle en el capítulo 4.

3.5. TRATAMIENTOS POSTSINTERIZACIÓN (OPERACIONES DE ACABADO)

Dependiendo de las propiedades deseadas para el componente, puede ser necesario tratar un producto después de la sinterización para obtener esas propiedades. Estas operaciones de acabado pueden desarrollarse especialmente para piezas compactadas particulares o pueden consistir en procesos convencionales.

3.5.1. Impregnación.

Una amplia variedad de cojinetes autolubricados están hechos de piezas compactadas porosas impregnadas con algún tipo de lubricante, casi siempre aceite. La pieza compactada, que se produce con una porosidad de 25 a 35%, se sumerge

en aceite caliente a presión o se trata al vacío, de tal manera que la red de poros se llene de aceite. El lubricante es liberado durante el servicio a un ritmo que depende de la carga y de la temperatura. Los materiales generalmente tienen una base de hierro o bronce.

La impregnación de piezas compactadas con plásticos, por ejemplo, se puede llevar a cabo para conseguir componentes a presión o herméticos, cerrando los poros antes de aplicar o de producir otras propiedades deseadas.

3.5.2. Infiltración.

En este proceso, los poros de la pieza compactada se cierran llenándolos con un metal fundido cuyo punto de fusión sea más bajo que el del constituyente principal de la pieza compactada. La infiltración se puede llevar a cabo ya sea en un proceso especial de presinterización o durante la sinterización normal. El material de infiltración puede aplicarse encima o debajo de la pieza compactada como un sólido que se funde a la temperatura real de sinterización, o puede aplicarse como líquido. El metal fundido se introduce en la pieza compactada por acción capilar.

La resistencia de un componente puede ser incrementada por infiltración entre 70 Y 100%. Un ejemplo típico es una pieza compactada de hierro infiltrado con cobre.

3.5.3. Tratamiento térmico.

Las piezas compactadas de polvo pueden ser tratados térmicamente por métodos convencionales. A mayor densidad de la pieza compactada mejores resultados. Los procesos de endurecimiento son aplicables a las piezas compactadas de hierro y acero: transformaciones de fase, carburación con gas, nitruración y carbonitruración.

3.5.4. Recubrimientos y tratamientos superficiales.

Los componentes con altas densidades pueden ser enchapados por procedimientos normales, pero para aquellos que tienen densidades menores puede ser necesaria la impregnación con cera o plástico, por ejemplo. También puede usarse la electrodeposición en tambor giratorio, la forja manual, etc. Los recubrimientos con fosfato, la oxidación por vapor y el cromado, así como los métodos convencionales de recubrimiento metálico, pueden ser usados para mejorar las propiedades anticorrosivas de las piezas compactadas.

3.5.4.1. Tratamiento al vapor

En este tratamiento las piezas se sitúan en una cámara cerrada donde se exponen a vapor sobrecalentado (H_2O) a una temperatura cercana a 550 °C. Bajo estas condiciones se produce la siguiente reacción de oxidación en la superficie de las piezas:



El Fe_3O_4 (magnetita) forma una capa negra pardusca fuertemente adherente y altamente resistente al desgaste, sobre la superficie de las piezas y dentro de sus poros superficiales conectados. El recubrimiento ajustado de magnetita así obtenido,

no solo es extremadamente duro sino también altamente resistente a la corrosión. El espesor del recubrimiento crece con la raíz cuadrada del tiempo del tratamiento.

El hidrógeno resultante en la reacción está constantemente atenuando el vapor (H_2O). Si la concentración de H_2 en el vapor cercano a la superficie crece demasiado, la reacción (3-1) se produce de nuevo y la capa de óxido se vuelve a reducir. Para prevenir esto, son importantes tres medidas:

1. Mantener una turbulencia suficientemente alta en el vapor.
2. Situar las piezas en la cámara de tal manera que se eviten las “esquinas muertas”.
3. Introducir cantidades controladas de aire u oxígeno en la cámara del horno para mantener la concentración de H_2 en niveles bajos aceptables.

También es muy importante que ni la temperatura de vapor ni la temperatura de las piezas exceda los $550\text{ }^\circ\text{C}$, ya que por encima de esta temperatura, la reacción (3-1) es desbancada por esta otra reacción:



Que forma una capa de FeO wustita roja, escamosa y poco adherente sobre la superficie de las piezas. Esto da a la superficie una apariencia fea y no proporciona ninguna protección contra la corrosión. Evitar que la temperatura de la superficie de las piezas exceda los $550\text{ }^\circ\text{C}$ puede ser difícil en ciertos casos debido a que la reacción de oxidación (3-1) es exotérmica. La condición de oxidación puede cambiar como se indica mediante flechas en la Figura 3.8

Las condiciones variables descritas se pueden observar en el gráfico de la Figura 3.8

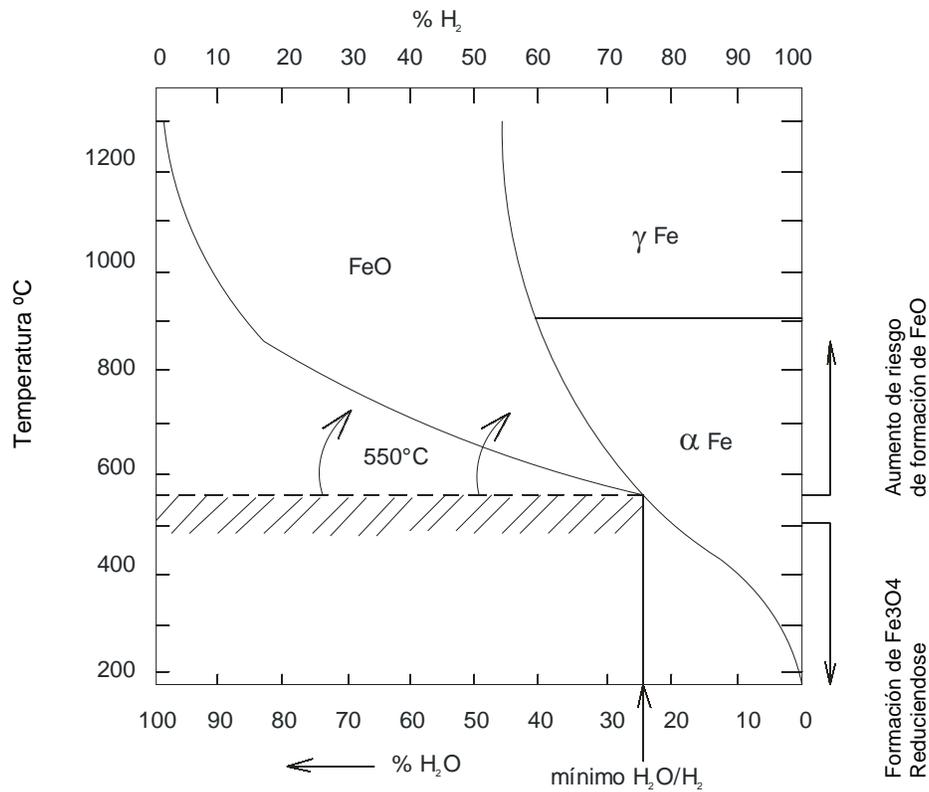


Figura 3.8. Condiciones aceptables y no aceptables para eltratamiento de vapor de componentes de hierro.

La influencia del tratamiento de vapor sobre las propiedades mecánicas de piezas sencillas de hierro sinterizadas puede observarse en los gráficos de la Fig. 3.9. Como se puede ver, la dureza de las piezas se incrementa sensiblemente - especialmente con piezas de baja densidad, la resistencia a tracción no se ve prácticamente afectada, y el alargamiento disminuye con piezas de densidades inferiores a g/cm^3 .

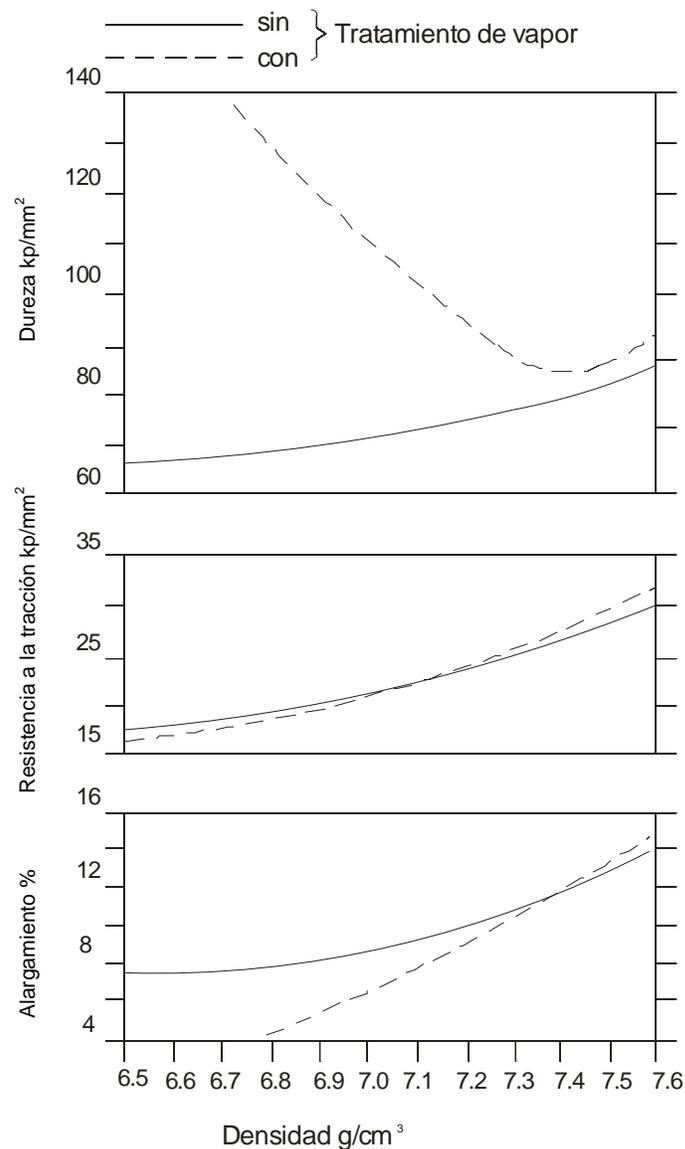


Figura 3.9. Influencia del tratamiento de vapor en las propiedades de componentes sinterizados de hierro puro.

3.5.5. Maquinado.

Algunas piezas compactadas pueden ser maquinados por procesos estandarizados, pero debe concederse atención especial a los materiales y a la geometría de la herramienta. Para evitar la corrosión, no deben usarse refrigerantes que contengan agua durante el maquinado.

Las piezas compactadas pueden soldarse entre sí para conseguir formas complejas usando los métodos usuales de soldadura.

CAPITULO 4 EQUIPO

4.1. PRENSAS DE PRODUCCIÓN.

Una de las causas que han hecho posible la producción y popularidad de muchos objetos de uso diario y de lujo que actualmente consideramos como de utilización normal en nuestra vida, es la aplicación creciente de las prensas a la producción en masa.

Uno de los ejemplos más notables que podemos poner en este sentido es el desarrollo de la industria de la fabricación de automóviles. Los primeros automóviles se fabricaron con relativamente poco equipo y maquinando cada una de las partes metálicas que actualmente se obtienen por el proceso que nos ocupa.

Existe una diferencia fundamental entre el empleo de las máquinas herramientas y las prensas. En las máquinas herramientas, el trabajo se efectúa con muy bajo costo en herramientas y quitando progresivamente material. Las prensas en cambio, requieren un juego de herramientas que pueden ser muy caros y solo son aplicables para cada caso en particular, por lo que su utilización en general solo se justifica para una gran producción. En el planeamiento de una producción elevada, la utilización de este proceso arroja una sensible reducción en el costo unitario del producto en cuestión.

Para la producción en masa, las prensas son empleadas cada día en mayor número, sustituyendo a otras máquinas. Existe además la razón adicional de que con una buena operación y calidad de las prensas, se pueden obtener productos de mucha homogeneidad, con diferencias de acabado entre unas y otras piezas de 0.050 mm y aun menos, lo cual es una buena tolerancia hasta para piezas maquinadas.

El secreto de la economía de operación en las prensas consiste fundamentalmente en el número de piezas que se produzcan. No es económico fabricar un costoso herramental para producir unas pocas piezas, pero cuando se produzcan cien mil ó un millón de piezas, bien puede justificarse la fabricación o compra del herramental a un costo muy elevado como se ha mencionado en el punto 1.5.7 del capítulo 1, es decir, que se amortizan los costos a través de un elevado número de unidades producidas.

En esta forma se puede ver que las prensas a pesar de alto costo pueden sustituir ventajosamente los sistemas anteriores de fundir las piezas y acabarlas maquinándolas. Claro que en cada caso hay que hacer un estudio económico siguiendo los lineamientos generales antes de tomar la decisión.

4.2. CLASIFICACION GENERAL DE LAS PRENSAS.

Fuente de energía

1. Manual
2. Potencia
 - a) Mecánica
 - b) Vapor, gas, neumática
 - c) Hidráulica

Ariete

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Vertical de simple efecto | 3. En cuatro correderas |
| 2. Vertical de doble efecto | 4. De configuración especial |

Diseño de bastidor

- | | |
|---------------|-----------------------|
| 1. De banco | 5. De costados rectos |
| 2. Inclinable | 6. Yunque |
| 3. De escote | 7. Columna |
| 4. De puente | |

Método de aplicación

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. Manivela | 6. Junta articulada |
| 2. Leva | 7. Hidráulica |
| 3. Excéntrica | 8. Palanca acodillada |
| 4. Tornillo de potencia | 9. Neumática |
| 5. Cremallera y piñón | |

Por la operación a realizar

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1. Cizallas de escuadrar | 8. Forzado |
| 2. Cizallas de círculos | 9. Acuñaado |
| 3. Dobladora | 10. De transferencia |
| 4. Punzonado | 11. Roedora |
| 5. Extruido | 12. Estirado |
| 6. Empalmado | 13. Revólver |
| 7. Enderezado | 14. Forja |

Como la mayoría de los productores y diseñadores de prensas las designan de acuerdo al diseño general del bastidor, lo tomaremos de base para explicar el modo de operación de estas.

4.3. TIPOS DE PRENSAS.

La clasificación más sencilla de la cual podríamos hacer uso es en relación con la fuente de energía, es decir si opera manualmente o con potencia.

Por otra parte no podríamos determinar el tipo de prensa en base a la operación que realiza cada una de ellas ya que poseen una versatilidad de la cual podríamos hacer uso, o sea que una prensa que realiza la operación de repujado podría igualmente realizar un doblado o un recortado, sin embargo en este proyecto solo hablaremos de dos tipos de prensas: hidráulicas y mecánicas.

4.3.1. Prensas hidráulicas.

Las prensas hidráulicas tienen carreras más prolongadas que las prensas mecánicas y desarrollan plena fuerza a lo largo de toda la carrera. Sin embargo, la capacidad de estas prensas es fácilmente ajustable, y sólo se pueden usar una fracción de la fuerza. También se puede ajustar la longitud de la carrera como sea necesaria. Las prensas se adaptan especialmente a operaciones de embutido profundo, debido a su movimiento lento y uniforme. También se usan para otras operaciones numerosas que requieren de grandes fuerzas, tales como el aglomerado de metales en polvo, extraído, laminado, moldeo de plástico y forjado. No se recomienda para el recortado fuerte y operaciones de punzonado, ya que el choque del rompimiento es perjudicial para la empresa.

El mantenimiento es mayor que para las prensas mecánicas, aun cuando la operación de la prensa es más lenta. Las prensas hidráulicas pequeñas se asemejan a las prensas de costados rectos. Para el trabajo de grandes áreas se usa la de construcción tipo poste o de cuatro columnas.

4.3.2. Prensas Mecánicas.

Las prensas mecánicas pueden ser operadas manualmente, en el caso más elemental, y con motor en la mayoría de los casos. El funcionamiento de las prensas operadas con motor está basado en el siguiente principio:

El motor hace girar un volante de la prensa que está unido al cigüeñal de la misma directamente o por medio de engranes o bandas, operándose con auxilio de un embrague de fricción; este embrague es accionado por medio de un pedal o una estación de botones. El embrague se desconecta automáticamente después de cada revolución, a no ser que el operador mantenga oprimido el pedal, en cuyo caso la prensa repite el trabajo. Después de que el embrague desconecta el volante, un freno detiene el movimiento del propio cigüeñal. Una biela transmite el movimiento del cigüeñal a la parte móvil de la prensa o ariete, deslizándose éste en unas guías.

Por lo que se refiere a la manera de actuar, las prensas se dividen en tres grupos principales:

1) De simple acción.

Se les nombra de simple acción porque solo cuentan con un ariete.

2) De doble acción.

Las prensas de doble acción tienen dos arietes, deslizándose uno exteriormente y otro en el interior. El ariete exterior es el que constituye generalmente el pisador (en el caso de prensas de embutido profundo) y es actuado por medio de brazos articulados o de levas excéntricas, de manera que al final de su carrera permanece estacionario y aplicando presión para sujetar la pieza, mientras el ariete interior o punzón sigue su movimiento hacia arriba simultáneamente. Las prensas de doble acción se emplean principalmente para trabajos de embutido profundo por ejemplo).

3) De triple acción.

Las prensas de triple acción son muy semejantes en principio a las anteriores, pero tienen un ariete adicional que trabaja de abajo hacia arriba, cuyo movimiento se sincroniza con el de los dos arietes anteriores.

4.4. MECANISMOS DE TRANSMISIÓN PARA PRENSAS.

La mayoría de los mecanismos de transmisión para prensas que se usan para comunicar potencia a la corredera son los siguientes.

La transmisión más común es la de manivela simple, la cual da a la guía un movimiento armónico simple. En una carrera de descenso la corredera se acelera, alcanzando su velocidad máxima a mitad de la carrera, entonces se desacelera. La mayoría de operaciones de prensas ocurren cerca de la mitad de la carrera, a la velocidad máxima de la corredera. La transmisión excéntrica da un movimiento como el de la manivela y se usa frecuentemente en donde se requiere una carrera más corta. Sus proponentes argumentan que tiene una mayor rigidez y una menor tendencia a la deflexión que una transmisión de manivela. Se usan levas en donde se desea algún movimiento especial, tal como una detención en la parte inferior de la carrera. Esta transmisión excéntrica, excepto que se usan rodillos seguidores para transmitir el movimiento a la corredera.

Las prensas de cremallera y engrane se usan solamente en donde se necesita una corredera muy larga. El movimiento de la corredera es mucho más lento que en las prensas de manivela, y se obtiene movimiento uniforme. Tales prensas tienen topes para controlar la longitud de la carrera y se pueden equipar con alguna característica de retorno rápido para elevar la corredera de regreso a la posición inicial. La prensa común de husillo es un ejemplo familiar.

La transmisión hidráulica se usa en muchas prensas para una gran variedad de trabajos. Se adapta especialmente a presiones grandes y bajas velocidades en las operaciones de formado, prensado y embutido.

En la transmisión de tornillo, la corredera se acelera por medio del disco de fricción que está acoplado al volante; y conforme el volante se mueve hacia abajo, se le aplica una mayor velocidad. El movimiento de la corredera es acelerado, desde el principio hasta el final de la carrera. Toda la energía almacenada es absorbida por la pieza al final de la carrera. La acción se asemeja a la de un martinete, pero es más lenta y hay menor impacto. A las prensas de este tipo se le conoce como prensas de percusión.

Se usan diversos mecanismos de eslabón en las transmisiones para prensas, debido ya sea al tipo de movimiento que tienen o las ventajas mecánicas que desarrollan. Es de uso muy común la junta articulada, debido a que tiene una gran ventaja mecánica cerca del final de la carrera cuando los dos eslabones se aproximan a una línea recta. Debido a la gran capacidad de carga de estos mecanismos, se usa para operaciones de acuñado y calibrado. Las transmisiones excéntricas o hidráulicas se pueden sustituir por la de manivela.

Los mecanismos de palanca acodillada se usan primordialmente para fijar al habilitado en la operación de embutido y se hacen una variedad de diseño. La corredera auxiliar es accionada por una manivela, pero se pueden usar excéntricas o levas. El objeto principal en este mecanismo es obtener un movimiento que tenga un periodo de detención adecuado de manera que se pueda sujetar efectivamente el habilitado.

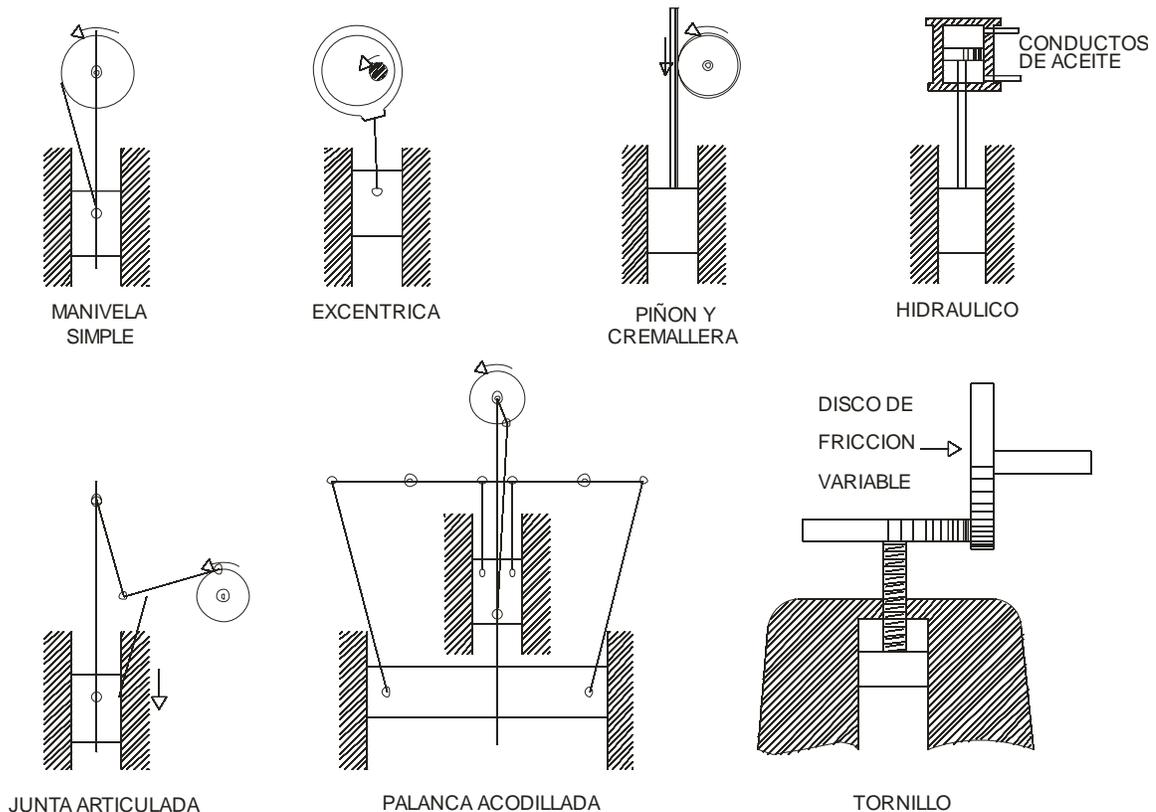


Figura 4.1. Mecanismos de transmisión para las prensas.

4.5. MECANISMOS DE ALIMENTACION PARA PRENSAS.

La seguridad es una consideración fundamental en las operaciones con prensa, y debe tomarse toda precaución para proteger al operador. Siempre que sea posible, se debería alimentar el material a la prensa por medios que eliminen cualquier posibilidad de que el operador tenga sus manos cerca de las matrices. En los trabajos de producción prolongada, tales características se pueden lograr económicamente de varias maneras.

Los dispositivos de alimentación aplicados a las prensas de tamaños medianas y pequeñas tiene la ventaja de alimentar rápido y de manera uniforme a la máquina en adición a las características de seguridad.

Uno de los tipos comunes de mecanismos de alimentación es el de avance con doble rodillo que emplea material enrollado y carretes para el desecho. La operación de los rodillos de avance está controlada por un excéntrico en el cigüeñal a través de

una articulación hacia una rueda de trinquete, la cual jala el material a lo largo de la matriz. Cada vez que el ariete se mueve hacia arriba, los rodillos giran y alimentan la cantidad adecuada de material para la siguiente carrera. Se puede variar la cantidad de material alimentado a través de los rodillos, proporcionando a la máquina de un excéntrico variable.

Otro tipo de dispositivo de avance es el alimentador con cuadrante indicador de estaciones. Este método está diseñado para recibir piezas simples que se han habilitado o formado previamente en alguna otra prensa. También aquí la indicación está controlada por un excéntrico en el cigüeñal a través de un mecanismo de eslabón adecuado hacia el cuadrante indicador. Cada vez que se efectúa una carrera, el cuadrante indica una estación. Toda alimentación por parte del operador, tiene lugar al frente de la máquina, lejos de las matrices. Las partes ligeras se pueden apilar en un depósito y colocarse en posición por un dispositivo de succión. Se levanta una pieza por encima de la pila por medio de dedos de succión y se coloca contra un tope calibrado en la matriz. El depósito de alimentación se puede usar también con un mecanismo de movimiento alternativo que alimente las piezas del fondo de la pila. La alimentación por gravedad se usa algunas veces en las prensas inclinadas, resbalando el habilitado en cajas por encima de la matriz.

4.6. HORNOS INDUSTRIALES.

Las operaciones con hornos industriales abarcan una amplia gama de temperaturas, las cuales dependen del material a calentar y también del objeto del proceso de calentamiento y de las operaciones subsiguientes. En cualquier proceso de calentamiento, la temperatura del horno supera siempre aquella a la que ha de calentarse la carga.

USOS COMUNES DE LOS HORNOS INDUSTRIALES

- Secado de pinturas
- Laqueado
- Estufado de machos de piezas moldeadas en hierro fundido
- Pavonado
- Estañado en baño caliente
- Revenido en aceite
- Revenido de aceros rápidos
- Recosido de aluminio
- Calentamiento del aluminio para laminación
- Nitruración del acero
- Calentamiento de bizcocho de porcelana
- Cocción de vidriado de la porcelana
- Recosido de alpaca
- Esmaltado, proceso en húmedo
- Normalizado de metales
- Recosido de metales laminados en frío
- Calentamiento para laminación de latones
- Recosido de laminas y alambres de níquel o monel
- Recosido de los aceros con elevado contenido de carburo
- Recosido de ciclo corto de fundición maleable
- Recosido en cajas de láminas finas de acero
- Recosido de piezas fundidas de acero al manganeso
- Calentamiento para estampación de lamina de acero
- Calentamiento para la laminación de aceros de herramientas
- Calentamiento para la laminación de acero para muelles
- Calentamiento en paquetes de lamina fina de acero
- Calorización (impregnación de una superficie metálica con aluminio en polvo)
- Esmaltado vítreo para lamina de acero
- Calentamiento del cobre para laminar
- Forja del titanio comercialmente puro
- Recosido de piezas moldeadas de acero
- Normalizado de tuberías de acero
- Cementación
- Temple isotérmico de alambre
- Recosido del latón
- Cianuración
- Vitrificado de la porcelana
- Aporcelanado para decoración
- Recosido del cobre
- Recosido del vidrio
- Normalizado de acero inoxidable
- Laminación del acero inoxidable
- Forja de las aleaciones de titanio
- Temple del acero rápido
- Forja libre o en estampa
- Fusión del vidrio
- Fusión del acero
- Fusión del acero
- Fundición de metales ferrosos
- Fundición de metales no ferrosos
- Fusión del acero al cromo
- Sinterizado
- Esmaltado vítreo

4.7. CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES.

La temperatura deseada en el horno se produce por la generación de calor. Los principales métodos son los siguientes:

1. Por combustión de combustible (sólido, líquido o gaseoso)
2. Por conversión de energía eléctrica en calor.

El tipo de horno de combustión se emplea mucho más que el horno eléctrico; sin embargo, para muchas aplicaciones se prefiere el horno eléctrico, por que ofrece ventajas que no pueden ser medidas por el coste del combustible.

Otra clasificación se basa en la manipulación de material en su paso a través del horno. Existen dos tipos principales:

1. El horno "dentro fuera" o intermitente.
2. El horno continuo.

4.7.1. Horno Intermitente (o dentro fuera).

En el horno dentro fuera, la temperatura es constante, prácticamente, en todo su interior. Se coloca la pieza en una posición determinada y permanece en ella hasta que se cumple el ciclo de calentamiento. A continuación es sacada, generalmente, por la misma puerta por donde entró.

4.7.2. Horno Continuo.

En los hornos continuos, el material cargado se desplaza mientras se está calentando, a lo largo de este se localizan zonas de calentamiento de acuerdo al proceso. El tipo de línea recta es muy común.

Existe una infinidad de diseños para ambos tipos de hornos, dependiendo del fabricante y las necesidades del proceso que se pretenda llevar a cabo.

En los hornos que se calientan por combustión existen muchas diferencias a causa de la naturaleza del combustible. Los hornos que queman carbón grueso sobre un hogar de parrilla poseen un altar o torna-llamas, sobre el que las llamas pasan al horno. Los hornos de este tipo han desaparecido prácticamente del mercado. Un pequeño número de hornos industriales queman carbón pulverizado.

El lugar donde se realiza la combustión y la forma de dirigir los productos de la combustión sirven de base adicional para su clasificación. Si las llamas se desarrollan en la propia cámara de calentamiento, se dice que el horno es de calefacción directa. Algunas veces también se denominan hornos de caja o tipo estufa.

Si la llama se produce por debajo del hogar, y luego pasa hacia arriba a la cámara de calefacción, se dice que el horno es de "calefacción por la parte inferior". Si la llama aparece en una cámara de combustión, colocada a un lado de la cámara de calefacción, se dice que el horno es "de calentamiento lateral". Si la llama se desarrolla en un espacio encima de la cámara de calefacción y se vierte a través de una bóveda agujereada, se dice que el horno es de "calentamiento por la parte superior".

4.7.3. Horno de Reverbero.

El término "horno de reverbero" comprende el tipo de horno en el que se desarrolla la llama a una cierta distancia por encima del hogar, siendo desviada sobre éste por una bóveda en arco o inclinada. El término horno de reverbero es comúnmente empleado en la industria de la fundición de metales.

Cuando se trata de temperaturas medias y bajas se prefiere al horno con recirculación o circulación forzada, si se desea alcanzar una buena uniformidad de temperaturas.

4.7.4. Hornos de Mufla.

En todos hornos descritos anteriormente, las piezas a calentar están en contacto con los productos de la combustión. Para ciertos procesos este contacto perjudica a

las piezas del material a calentar; en estos casos, las piezas o carga se encierran en una mufla que, generalmente, se calienta por medio de los productos de la combustión. Muchos hornos requieren una atmósfera especial para protección de las piezas, particularmente para evitar la oxidación o descarburación, o para otros fines, y se construyen con un envolvente exterior hermético al gas, que rodea al revestimiento refractario. El calor es suministrado por tubos radiantes que queman combustible o por elementos calefactores basándose en resistencias eléctricas.

El objetivo principal de una mufla es proteger la carga contra los efectos de los productos de combustión. Otro objetivo de la mufla es suavizar las desigualdades de temperatura que existen en el lado de combustión de la pared de la misma. Una mufla que solo sirve para igualar la temperatura es frecuentemente abierta.

Si la protección contra la temperatura elevada constituye un objetivo más importante que la protección contra la atmósfera del horno, el techo de la mufla puede ser omitido y el horno recibe el nombre de "horno de semimufla".

En cierto sentido, los hornos de cuba o crisol, son también hornos de semimufla, porque no existe techo en la mufla, que en este caso es el crisol. Sin embargo, se consideran como hornos de mufla completa, porque los productos de la combustión no pueden hacer contacto con el contenido del crisol o paila, que puede ser un baño metálico o de sales.

La mufla puede rodear la carga, en ocasiones, puede rodear los gases quemados y, cuando es así, suele ser la mufla un tubo radiante.

La capacidad de una mufla está limitada por la resistencia y durabilidad de las paredes de la misma. Las muflas se emplean raramente en el calentamiento de metales a temperaturas superiores de 982°C a causa de los costos de conservación. Para temperaturas más bajas, se emplean hornos calentados eléctricamente y hornos con tubos radiantes y circulación forzada.

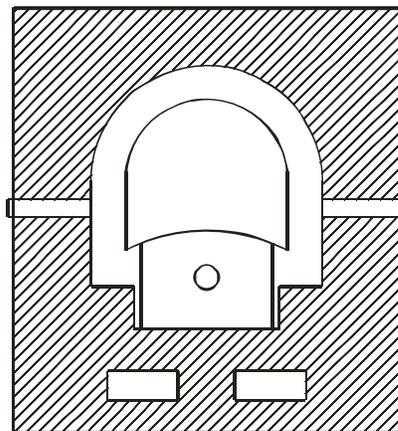
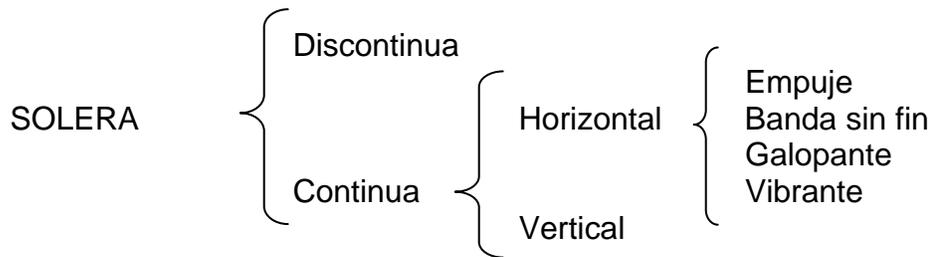
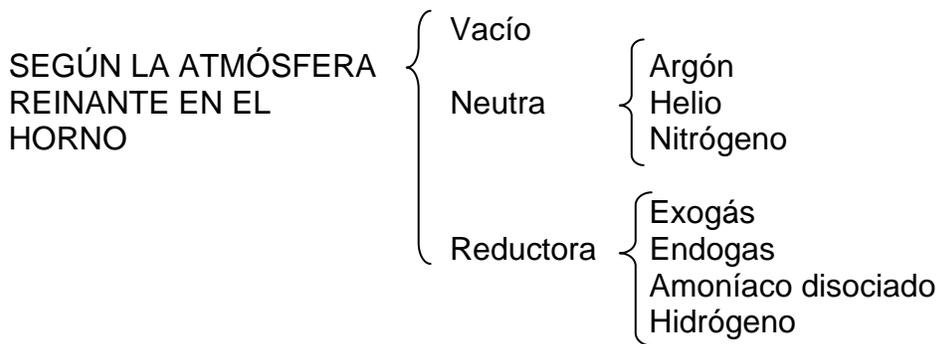
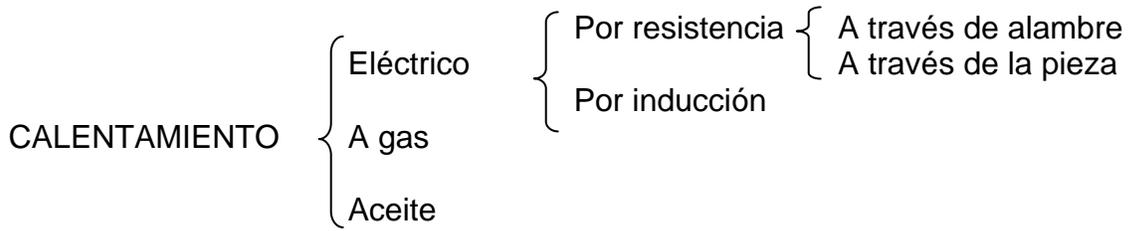


Figura 4.2 Horno de mufla.

4.8. HORNOS PARA SINTERIZADO.

En términos generales el horno es el elemento principal de la sinterización. Es un artefacto constituido por una caja susceptible de calentamiento y que permite el control y la regulación de tiempo, de la temperatura, de la atmósfera y de las velocidades de calentamiento y de enfriamiento.



4.8.1. Hornos según el tipo de calentamiento

En esta clase de hornos el sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir y ésta es función de la naturaleza de las piezas a sinterizar. En la siguiente tabla se indican las temperaturas y los tiempos de trabajo correspondientes a cada tipo de material.

MATERIAL	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO EN MINUTOS
Bronce	825	15
Cobre	850	25
Latón	850	25
Hierro-grafito	1050	25
Níquel	1100	35
Ferritas	1400	60
Material pesado	1500	60
Metal duro	1450	30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tántalo	2400	480

Tabla 4.1. Temperaturas y tiempos de trabajo correspondientes a cada tipo de material.

El calentamiento por gas tiene como ventaja la economía y como inconveniente la dificultad del control de la temperatura. La temperatura alcanzada por el horno suele llegar a 1100 °C y por ello apenas se emplea este sistema de calentamiento para sinterizar.

Los hornos tipo mufla tienen las resistencias enrolladas alrededor de la cavidad tubular que es la mufla; los hornos tipo caja tienen las resistencias instaladas a lo largo de las paredes interiores y por lo tanto en contacto con la atmósfera del horno.

El material de las resistencias suele ser nicrom (níquel 70%, cromo 30%), que alcanza temperaturas de 1100 °C, y aleación Cantal o carburo de silicio, que alcanza temperaturas algo superiores (1300 °C). Las resistencias de carburo de silicio tienen la ventaja de presentar una gran resistencia a los gases de la atmósfera y a la fluencia (creep), pero en contrapartida poseen el inconveniente, para los hornos discontinuos, de estar dotados de una gran velocidad de calentamiento. Para lograr temperaturas superiores se utilizan resistencias de molibdeno (1800°C), de wolframio (2500°C) y de grafito (2700°C). Para temperaturas aún mayores, se utilizan los hornos de inducción (3000°C). Finalmente, otro método de calentamiento consiste en hacer pasar directamente la corriente eléctrica a través del componente a sinterizar. Es así que se sinterizan las piezas de wolframio, de polvos de molibdeno y de polvos de tántalo.

El control de la temperatura de los hornos se realiza mediante termopares. Estos consisten en sendas varillas metálicas que tienen un extremo soldado y el otro unido a una unión fría conectada a un milivoltímetro.

4.8.2. Hornos según la atmósfera

En los tratamientos térmicos se entiende por atmósfera la masa gaseosa encerrada dentro del horno, que está en contacto con las piezas a tratar. Las

atmósferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor. El papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble. En efecto, por una parte evita que se produzcan reacciones perjudiciales, como la oxidación y la decarburización de las piezas que se están tratando. Por otra parte, permite realizar las reacciones previstas, a saber, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases adsorbidos.

4.9. ATMOSFERAS DE SINTERIZACION.

El propósito principal de la atmósfera de sinterización es proteger a las piezas compactadas de la oxidación durante la sinterización y reducir los óxidos superficiales residuales para mejorar el contacto metálico entre las partículas de polvo adyacentes. Otro de los propósitos de la atmósfera de sinterización es proteger las piezas que contienen carbono de la decarburización.

4.9.1. Tipos de atmósferas

Como se ha mencionado ya en el capítulo 3 apartado 3.4.1.5, existen principalmente tres tipos de atmósferas de sinterización que son comúnmente utilizadas en la pulvimetalurgia de hierro:

- a) *Reducido-descarbonizado* (por ejemplo hidrógeno, amoníaco disociado),
- b) *Reducido-cementado* (por ejemplo *endogas*)
- c) *Neutral* (por ejemplo nitrógeno).

De un rápido vistazo, la elección parece obvia:

Una atmósfera reductora para materiales libres de carbono y una atmósfera no decarburizante o neutra para materiales con contenido en carbono. Sin embargo, además de las consideraciones económicas hay algunos problemas técnicos y termodinámicos (se mencionaran al final de este capítulo) que complican la elección y el control de la atmósfera adecuada.

Las condiciones de las fábricas, el tipo de material a sinterizar y las consideraciones económicas regulan la selección de una atmósfera de sinterización adecuada. La elección correcta tiene gran importancia no sólo para conseguir una óptima calidad del producto sino también para economizarlo.

4.9.1.1. Hidrógeno y amoníaco disociado.

El hidrógeno puro producido eléctrica o criogénicamente, es la atmósfera menos problemática para la sinterización de piezas de polvo de hierro libres de carbono. Sin embargo, por lo general, no es económico excepto si se utiliza para productos caros como imanes alnico y piezas de acero inoxidable.

Un excelente sustituto del hidrógeno puro es el amoníaco disociado que consiste en un 75% de H₂ y un 25% de N₂, la fuerte acción reductora de esta mezcla de gases es favorable en la eliminación de óxidos residuales que están presentes en todos los polvos de hierro comerciales. Es fácil de controlar y aunque no es la atmósfera más económica elimina muchos problemas de producción y proporciona un producto sinterizado de alta calidad y uniformidad.

Debido a su fuerte acción decarburizante, ni el hidrógeno puro ni el amoníaco disociado pueden utilizarse en la sinterización de piezas de polvo de hierro que contengan carbono.

El hidrógeno y el amoníaco disociado forman mezclas explosivas con el aire. Así, la sinterización con estos gases sólo puede ser llevada a cabo si los hornos están equipados con una mufla estanca de gases.

4.9.1.2. Endogas.

Las atmósferas de sinterización relativamente baratas son producidas por un generador especial mediante la combustión incompleta de una mezcla de gas y aire, utilizando un catalizador.

Gases combustibles comunes son, por ejemplo el metano, el propano o el gas natural. El producto de combustión contiene H_2 , H_2O , CO , CO_2 , N_2 y CH_4 . La composición varía con la razón aire/fuel y puede ser reductora, carburizante, descarburizante, inerte o incluso oxidante.

El gas generado se denomina endogas cuando se produce endotérmicamente con bajos índices aire/gas y exogas cuando se produce exotérmicamente con altos índices aire/gas.

En la actualidad, el uso de exogas en la pulvimetalurgia del hierro es menos común, pero el endogas es ampliamente utilizado en la sinterización de piezas de hierro con carbono.

El endogas, cuando abandona el generador puede contener por encima de un 4% de vapor de agua (H_2O) el cual lo hace fuertemente descarburizante. Para hacerlo adecuado para la sinterización de piezas de polvo de hierro con carbono, tiene que ser secado (por ejemplo por medio de un refrigerante y un agente desecante) hasta al menos reducirlo por debajo de un 0.2% de H_2 (punto de rocío $-10^\circ C$). La fuerte influencia del punto de rocío en el carbono potencial del endogas se muestra en el diagrama de la Figura 4.3.

En el endogas tienen lugar interacciones muy complejas entre algunos de los componentes del gas. La temperatura varía a lo largo de todo el ciclo de sinterización, y la composición del gas varía debido a las reacciones con óxidos de hierro residuales, combinado con grafito o fugas de aire. Esto hace muy difícil calcular, en base a cualquier diagrama, el gas adecuado para un contenido de carbono dado en el producto final. Los diagramas son sin embargo importantes para comprender el comportamiento de la mezcla de varios gases.

El endogas es venenoso y forma mezclas explosivas con el aire. Además es dañino para los elementos calefactores del horno cuando entra en contacto con ellos. Puede causar desastrosas deposiciones de hollín cuando se producen fugas en el refractario del horno.

Así, la sinterización con el endogas sólo se puede realizar en hornos equipados con una mufla estanca de gases.

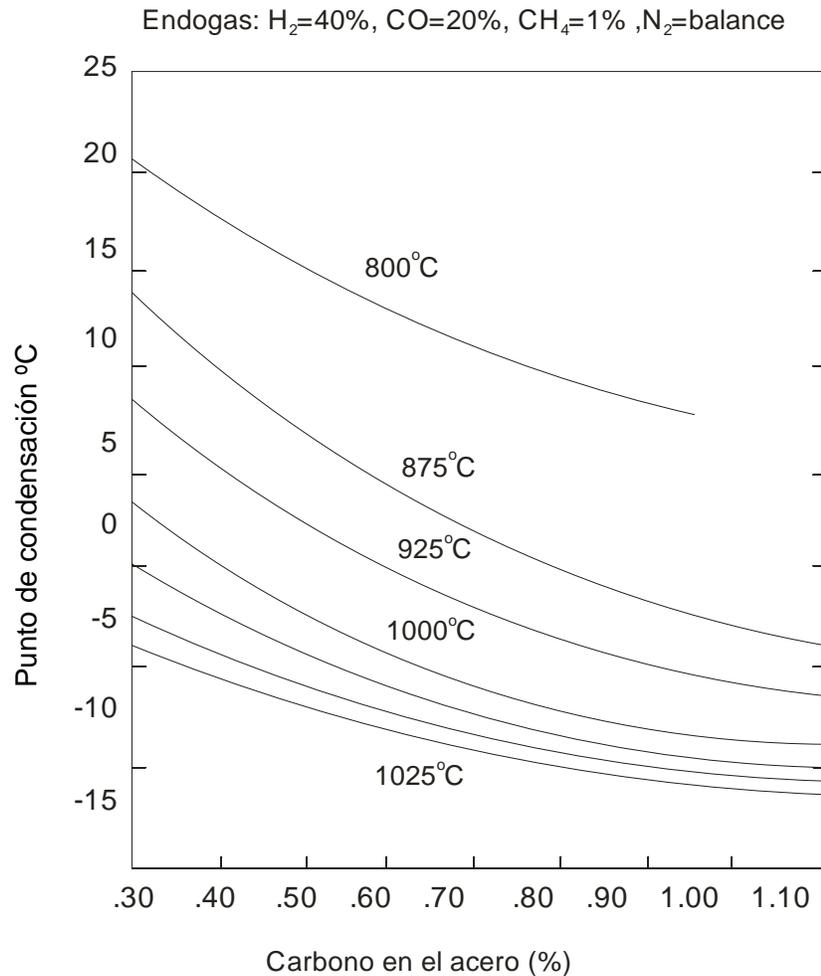


Figura 4.3. Equilibrio del endogas y el carbono en el acero a diferentes temperaturas (Punto de rocío sobre carbón potencial).

4.9.1.3. Nitrógeno.

Las piezas compactadas realizadas con mezclas de polvos de hierro con contenidos en grafito pueden ser sinterizadas en nitrógeno criogénico. El grafito presente en las piezas compactadas reaccionando con óxidos residuales en los polvos de hierro y con fugas o escapes de aire producen condiciones suficientes de reducción y carburización en el horno. Si es necesario, la acción reductora de esta atmósfera puede controlarse añadiendo cantidades muy pequeñas de hidrógeno húmedo o seco dentro de la zona caliente del horno.

Correspondientemente, se puede controlar la acción carburizadora añadiendo cantidades muy pequeñas de metano dentro de la zona de recarburización del horno. El nitrógeno, aunque es algo más caro, tiene varias ventajas sobre el endogas.

Ni es venenoso ni forma mezclas explosivas con el aire. No reacciona con los elementos calefactores ni con ningún otro elemento del horno. Así, la sinterización en nitrógeno puede ser realizada en hornos sin mufla estanca de gases.

4.9.2. Control de la atmósfera de sinterización.

Preferiblemente, se debe controlar la composición de la atmósfera de sinterización no sólo a temperatura ambiente sino también a las temperaturas existentes en varias zonas del horno. Puntos interesantes donde se pueden tomar muestras del gas son:

- Después del generador del gas (o tanque de almacenaje),
- Dentro de la zona de recarburización
- En el punto de máxima temperatura del horno
- En puntos de salida

Del párrafo anterior resulta evidente que las dos propiedades cruciales de la atmósfera de sinterización son su punto de rocío (P_{H_2O}/P_{H_2}), y su carbono potencial (P_{CO_2}/P_{CO} y P_{CH_4}/P_{H_2}).

4.9.3. Medición del Punto de rocío

Hay varios tipos de medidores del punto de rocío en el mercado: completamente automáticos o manuales, con o sin equipo auxiliar de grabación y regulación del punto de rocío de la atmósfera.

De entre las diferentes normas de medida del punto de rocío, se deben mencionar las tres siguientes:

- Método 1.

Si a un gas comprimido se le permite expandirse, su temperatura cae y en el punto de rocío del gas, el vapor de agua (si lo hay) precipita como una bruma.

- Método 2.

El instrumento está provisto de un espejo que puede ser enfriado a una temperatura conocida. Cuando al gas se le permite pasar por el espejo, una película de agua se condensa en el espejo en el punto de rocío.

- Método 3.

Diferentes sales tienen diferentes resistividades eléctricas a diferentes contenidos de humedad y temperatura. Si la temperatura se mantiene constante el medidor del punto de rocío puede basarse en la resistividad eléctrica de la sal.

Los dispositivos automáticos modernos para el control y grabación de las cantidades de dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano se basan en la absorción de radiación infrarroja del gas. La norma, es que cada uno de esos gases absorba diferentes longitudes de onda de la luz infrarroja y la absorción sea proporcional a la concentración del gas en la mezcla.

El contenido de oxígeno en la atmósfera de sinterización puede ser medida in situ por medio de una celda de ZrO_2 que opera bajo el principio de que la presión parcial de oxígeno en la atmósfera es comparada con la de un gas de ensayo bien definido. El gas que va a ser analizado está en contacto con un lado de la célula, mientras que el gas de ensayo está en el otro lado. La diferencia entre las presiones parciales crea un potencial eléctrico que es controlado y puede ser utilizado para cambiar medidas automáticamente y corregir la composición de la atmósfera.

En todos los casos, las muestras de gas, deberían ser recogidas en la corriente del flujo, nunca en esquinas muertas. Para proteger el instrumental de polvo y hollín del gas es a menudo recomendable utilizar un filtro a través del cual se pasa la muestra de gas.

El filtro puede por ejemplo, estar hecho de fibra de vidrio. Las muestras de gas deben ser suficientemente grandes y el flujo de gas a través de los tubos debe mantenerse durante un tiempo tan largo como para vaciar los restos de gases de anteriores ensayos.

4.9.4. Problemas técnicos

Surgen en relación al control adecuado de las velocidades de flujo y las direcciones del flujo de la atmósfera en los hornos de sinterización continuos. Un horno continuo de diseño moderno para la sinterización de elementos estructurales de hierro consta normalmente de cuatro zonas utilizadas con distintos propósitos:

1. La llamada zona de combustión, donde los lubricantes (contenidos en las piezas compactadas) son quemados entre 250 y 700°C
2. La zona caliente, donde las piezas de polvo de hierro son sinterizadas a 1120-1150°C
3. La llamada zona de recuperación de carbono, donde las piezas decarburizadas superficialmente pueden recarburizarse a 800-900°C, y
4. La zona de enfriamiento, donde las piezas sinterizadas son enfriadas aproximadamente a 250-150 °C antes de ser expuestas al aire. (Ver figura 4.4.) Idealmente cada una de esas zonas requeriría combinación específica de la velocidad de flujo, dirección de flujo y composición de su atmósfera. Sin embargo, no se consiguen las condiciones ideales.

Para encontrar un compromiso factible y mejorar el diseño adecuado del horno, está el campo de las producciones de hornos de sinterización industrial, pero por lo largo que seria el tema de diseño de hornos para sinterizado no abarcaremos más en este tema.

En cambio siempre es bueno recurrir a la capacidad y a la experiencia tecnológica de los fabricantes de hornos.

4.9.5. Problemas termodinámicos

Surgen debido a que la composición de la atmósfera de sinterización cambia su naturaleza con la temperatura. Por ejemplo, la naturaleza del endogas cambia con el aumento de temperatura desde la carburización hasta la descarburización, y la naturaleza del hidrógeno (con restos de vapor de agua) cambia al caer la

temperatura desde la reducción a la oxidación. Además, la atmósfera cambia su composición al reaccionar con el material sinterizado. La reducción de óxidos residuales enriquece la atmósfera con vapor de agua; y la decarburización de material sinterizado enriquece la atmósfera con monóxido de carbono.

Los problemas termodinámicos no serán motivo de análisis en el presente trabajo, ya que requeriría estudio a detalle de los mismos.

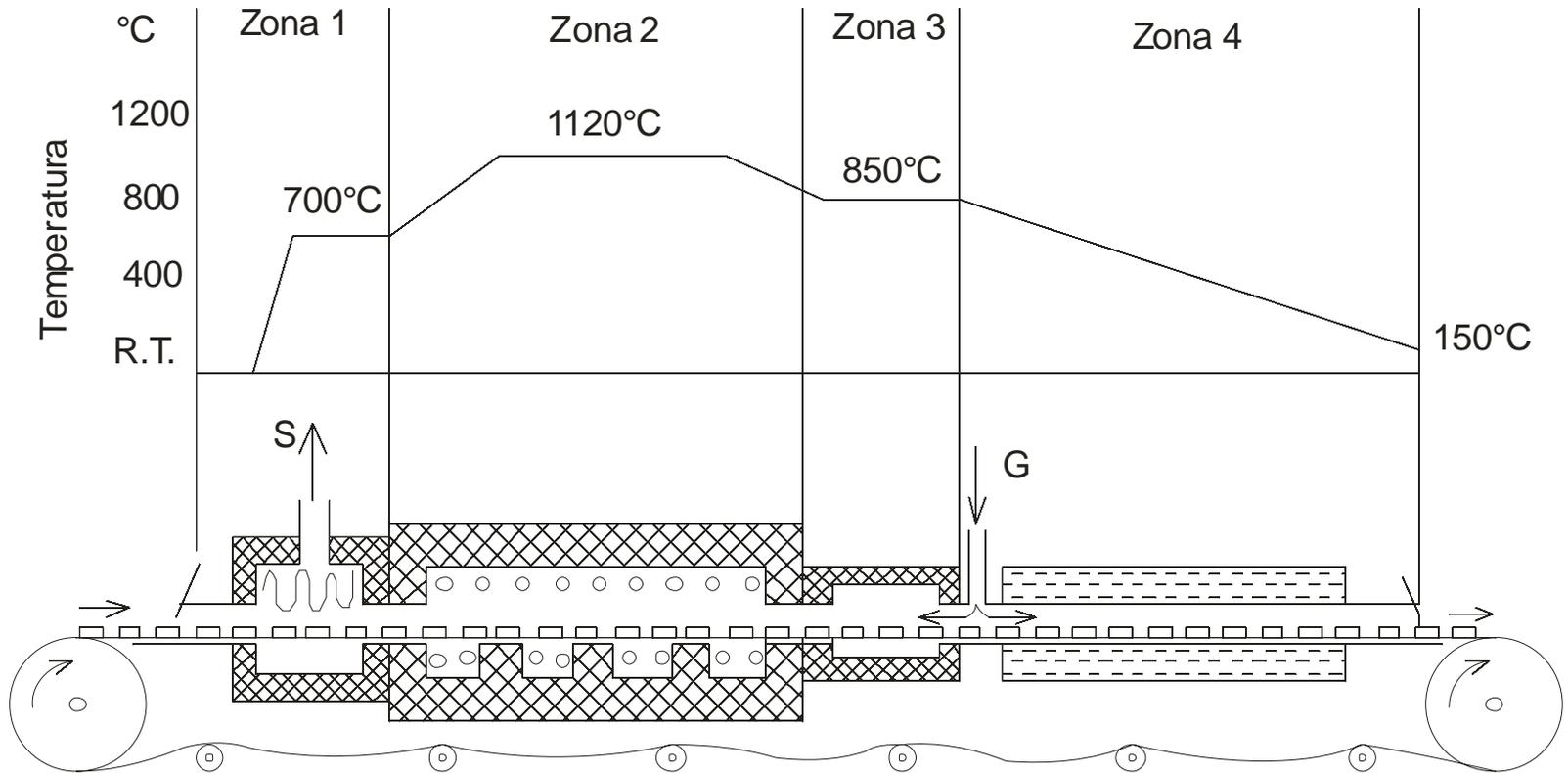


Figura 4.4. Esquema general del horno de sinterizado continuo.

Zona 1=Quemado de lubricante, 2=Sinterización, 3=Re-carburización, 4=Enfriamiento

G=Entrada de gas, S= Salida de humos y gases

CAPITULO 5

DISEÑO DE HERRAMIENTA Y VARIABLES DEL PROCESO PARA EL PISTON PROPUESTO

5.1. ANTECEDENTES.

Como ya se expuso en el capítulo uno existen fases de diseño, las cuales deberán tomarse en cuenta para desarrollar el presente proyecto, sin embargo en el proceso de diseño todo está permitido, incluso si fuera necesario volver a la definición del problema.

No siempre es posible diseñar en forma lineal, pueden ser fases de diseño hacia adelante o hacia atrás hasta obtener la mejor solución en cada una de estas, logrando a su vez la obtención de un mejor resultado final.

5.2. RECONOCIMIENTO DE LA NECESIDAD.

La globalización ha forzado a que los costos tengan que disminuir, ya que el mercado en el ámbito mundial exige que las industrias logren la competitividad en precio y calidad, de lo contrario seguramente estas irán al fracaso. Por lo tanto una de las principales necesidades de los fabricantes de compresores es bajar los costos en la producción de estos, por lo cual se han visto en la necesidad de utilizar procesos de manufactura más eficientes y al mismo tiempo han tenido que buscar alternativas de nuevos productos a precios más bajos, que al utilizarlos en sus producciones en serie significan un ahorro considerable.

Se debe lograr eliminar por completo los procesos que se realizan en forma artesanal en la producción de compresores, ya que estos no aportan valor al producto por el contrario elevan el costo de fabricación.

Es por esta razón que nuestro propósito es disminuir el costo de los compresores, reemplazando la utilización de pistones de fundición por pistones sinterizados; disminuyendo con esto los tiempos de maquinado. Y así lograr satisfacer la necesidad del fabricante de bajar sus costos de producción para poder seguir compitiendo en el mercado mundial.

5.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

El problema dentro de nuestra tesis en términos generales, es diseñar el herramental así como determinar las variables necesarias para la fabricación de pistones por medio del proceso pulvimetalúrgico y que al realizar un comparativo los pistones sinterizados sean más económicos que los de fundición ambos en su fase de producto terminado.

5.4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.

Toda la información necesaria para el desarrollo del diseño así como de las variables del proceso ya se han expuesto en los capítulos anteriores, y se harán referencias cuando se considere necesario.

5.5. CONCEPTUALIZACIÓN.

Esta fase de diseño será estructurada de la siguiente manera:

- Factibilidad de la fabricación del pistón por medio del proceso pulvimetalúrgico.
- Determinación de la materia prima a utilizar.

5.5.1. Factibilidad de la fabricación del pistón por medio del proceso pulvimetalúrgico.

Como resultado de la revisión de los planos del pistón de fundición en bruto y maquinado se observa lo siguiente.

Las tolerancias que especifican en el plano del pistón de fundición en bruto son:

- Diámetro exterior: ± 0.042 in (± 1.066 mm.)
- Altura total: ± 0.010 in (± 0.254 mm.)
- Planicidad: ± 0.010 in max. (± 0.254 mm. max)

Y las tolerancias del plano del pistón de fundición maquinado son:

- Diámetro exterior: ± 0.0005 in (± 0.0125 mm.)
- Altura total: ± 0.005 in (± 0.127 mm.)
- Planicidad: ± 0.004 in max. (± 0.101 mm. max)

Para piezas sinterizadas se aplica la tabla 1.1 del capítulo 1.

Por lo tanto podemos cumplir con las tolerancias que son requeridas en el plano del pistón de fundición en bruto, por el contrario no es posible cumplir el diámetro exterior en el plano del pistón de fundición maquinado, lo cual involucraría un rectificado cilíndrico final para llegar a la medida requerida.

Por otro lado analizando la geometría del pistón nos damos cuenta que es una pieza simétrica que cumple con los estándares de diseño permitidos en pulvimetalurgia. Sin embargo son necesarios incluirle algunos detalles como radios y chaflanes necesarios para la correcta expulsión de la pieza tras el prensado así como para evitar daños en el herramental y deterioros en las piezas prensadas al momento de ser maniobradas. Ver punto 1.2 del capítulo 1.

A los pistones se les deberá dar un tratamiento de vapor debido al trabajo a que están sometidos (compresión), ya que en las piezas obtenidas por sinterización son porosas por naturaleza (ver punto 3.5.4.1 capítulo 3).

5.5.2. Determinación de la materia prima a utilizar.

La selección del polvo en nuestro caso lo haremos tomando como base las propiedades, composición química y rango de densidad.

5.5.2.1. Propiedades.

Los productores y distribuidores de polvos metálicos han desarrollado manuales técnicos de consulta para la selección de polvo. Los productores de estos polvos, como Höganäs, nos ofrecen 4 grupos de polvos, los cuales son agrupados basándose en cuatro propiedades denominadas específicas.

- Velocidad de derrame (o fluencia): Esta propiedad así como la densidad aparente son factores importantes durante el llenado de la cavidad de la matriz.
- Compresibilidad del polvo: Esta propiedad afecta a la densidad que se puede obtener y por lo tanto a las propiedades tras el sinterizado.
- Valor de la expansión: Este valor es importante para calcular las dimensiones de la herramienta de prensado en relación con las medidas finales de la pieza.
- Resistencia en verde: Es necesaria una resistencia en verde suficiente para prevenir grietas durante la expulsión de la pieza después de la compactación axial como para permitir el transporte de la pieza compactada desde la prensa hasta el horno de sinterizado.

Las propiedades arriba mencionadas están relacionadas con la forma de partícula y la distribución granulométrica de cada tipo de polvo, esta combinación nos facilita el trabajo de selección de polvo, ya que de otro modo tendríamos que estar eligiendo el tipo de polvo de acuerdo a los valores de sus propiedades que son necesarias para nuestro proyecto (punto 2.2 del capítulo 2) Lo que nos llevaría a tener que realizar una gran cantidad de pruebas para obtener resultados que nos permitieran una correcta elección.

La división de polvos que Höganäs establece es:

- Calidades de hierro distaloy
- Calidades de aceros inoxidables
- Calidades de hierro puro
- Calidades de otras aleaciones

Sin embargo ya que los pistones no requieren ningún tratamiento especial y las necesidades del cliente sobre las propiedades de la pieza se pueden cumplir con calidades de hierro puro nos limitaremos a utilizar este polvo para el desarrollo de nuestro proyecto.

5.5.2.2. Composición química.

La composición química es de suma importancia por la aplicación de las partes a fabricar (pistones) y utilizando el estándar 35 de la Federación de Industrias de Polvos Metálicos (Metal Powder Industries Federation), que dice lo siguiente:

Dentro de la gama de polvos de hierro carbón se encuentran 3 tipos que podemos distinguirlos fácilmente en la tabla 5.1.

COMPOSICIÓN QUIMICA				
DESIGNACIÓN DE MATERIAL (MPIF)		Fe	C	Elemento
F-000		97.7	0.0	Mínimo
		100.0	0.3	Máximo
F-005		97.4	0.3	Mínimo
		99.7	0.6	Máximo
F-008		97.1	0.6	Mínimo
		99.4	0.9	Máximo

Tabla 5.1. Composición química de polvos hierro-carbón.

Es importante hacer notar que los polvos anteriores deben ser complementados con un máximo de 2.0% permisible de otros elementos que quedan adheridos en el material base (hierro).

- POLVO F-000.

El polvo con bajo contenido de carbón es muy poco utilizada en aplicaciones estructurales por sus bajas propiedades mecánicas, por el contrario se recomienda para partes autolubricadas como cojinetes.

- POLVO F-005.

Este tipo de polvo es utilizado primordialmente en partes de moderada resistencia y dureza combinado con maquinabilidad (barrenado, taladrado, torneado, fresado, etc.).

- POLVO F-008.

Es un polvo con alto contenido de carbón es difícilmente utilizado para fabricar piezas que requieran ser maquinadas en comparación con el polvo F-005, sin embargo su utilización al igual que el polvo F-005 se amplía a partes que pueden ser sometidas a tratamiento térmico para obtener mejores propiedades mecánicas como resistencia el desgaste y dureza.

De acuerdo a estas recomendaciones el polvo que vamos a utilizar en la fabricación de los pistones es el F-005 como primera instancia, ya que las piezas deben maquinarse para llegar a las dimensiones finales (de acabado) y el polvo F-005 es ideal para piezas que requieren maquinados (ver plano de PISTON MAQUINADO).

La tabla 5.2 nos muestra las variaciones que puede tener este tipo de polvo respecto a su densidad.

Respecto a esta misma tabla cabe hacer mención que la federación de industrias de polvos metálicos ha adoptado el concepto de valor mínimo de resistencia para materiales de polvo metálico usados en todas las aplicaciones. Estos valores de resistencia deben ser usados en el diseño de piezas en pulvimetalurgia. Debe hacerse notar que el proceso de metalurgia de polvos ofrece valores mínimos de resistencia en un amplio rango de materiales.

Como una ayuda de selección de materiales, adicionalmente a los valores de resistencia, se enlistan valores típicos para otras propiedades. Esto hace posible para los usuarios una mejor selección y especifica el material exacto en polvos metálicos y sus propiedades mas adecuadas para una aplicación específica. Los datos que se proporcionan definen valores para los materiales enlistados y muestra las propiedades mecánicas típicas alcanzadas bajo procedimientos de manufactura común. El alcanzar las características físicas y mecánicas adecuadamente pueden ser cambiados usando procesos complementarios mas allá de los designados en el estándar 35 de la MPIF.

Para la selección optima de un material tanto en propiedades como en costo es esencial que la aplicación de la pieza sea discutida para la correcta fabricación.

Para la fabricación de estos pistones utilizaremos un rango medio de densidad como referencia es decir 6.6 g/cm^3 , con la cual realizaremos las pruebas con los especimenes para verificar su comportamiento y cambios durante todos los procesos a los que serán sometidos las piezas.

Iron and Carbon Steel

P/M Material Properties

MINIMUM VALUES (A)			TYPICAL VALUES (B)											
Material Designation Code	Minimum Strength (A) (E)		TENSILE PROPERTIES			ELASTIC CONSTANTS		Unnotched Charpy Impact Energy	Transverse Rupture Strength	Compressive Yield Strength (0.1%)	HARDNESS		Fatigue Limit 90% Survival	Density
	Yield	Ultimate	Ultimate Strength	Yield Strength (0.2%)	Elongation (in 1 in.)	Young's Modulus	Poisson's Ratio				Macro (apparent)	Micro (converted)		
	10 ³ psi		10 ³ psi	10 ³ psi	%	10 ³ psi		Ft'lbf	10 ³ psi	10 ³ psi	Rockwell		10 ³ psi	g/cm ³
F0000 -10 -15 -20	10		18	13	1.5	15.0	0.25	3.0	36	16	40HRF		7	6.1
	15		25	18	2.5	17.5	0.25	6.0	50	18	60	N/A	10	6.7
	20		38	25	7.0	23.5	0.28	35.0	95	19	80		14	7.3
F0005 -15 -20 -25	15		24	18	<1.0	15.0	0.25	3.0	48	18	25HRB		9	6.1
	20		32	23	1.0	16.5	0.25	4.0	64	23	40	N/A	12	6.6
	25		38	28	1.5	19.5	0.27	5.0	76	28	55		15	6.9
F0005 -50 HT -60 HT -70 HT		50	60		<0.5	16.5	0.25	3.0	105	43	20HRC	58HRC	23	6.6
		60	70	(D)	<0.5	18.5	0.27	3.5	120	52	22	58	27	6.8
		70	80		<0.5	20.5	0.27	4.0	140	61	25	58	32	7.0
F0008 -20 -25 -30 -35	20		29	25	<0.5	12.5	0.25	2.5	51	28	35HRB		11	5.8
	25		35	30	<0.5	16.0	0.25	3.0	61	31	50	N/A	14	6.2
	30		42	35	<1.0	16.5	0.25	4.0	74	31	60		17	6.6
	35		57	40	1.0	20.5	0.27	5.0	100	36	70		25	7.0
F0008 -55HT -65 HT -75 HT -85 HT		55	65		<0.5	16.5	0.25	3.0	100	70	22HRC	60HRC	26	6.3
		65	75	(D)	<0.5	16.5	0.25	4.0	115	80	28	60	30	6.6
		75	85		<0.5	19.5	0.27	4.5	130	90	32	60	34	6.9
		85	95		<0.5	21.5	0.27	5.0	145	100	36	60	38	7.1

2003 Edition

Approved: 1984. Revised: 1987, 1990, 1994, 1997, 2000, 2003.

Tabla 5.2. Estándar 35 hierro y carbón

5.5.2.3. Tipos de hierro.

Como se vio en el capítulo 2 existen dos tipos importantes de producción de polvos de hierro.

- Polvo de hierro esponja (Reducción de minerales).
- Polvo de hierro atomizado (Volatilización).

El polvo tipo esponja tiene una gran resistencia en verde, esto combinado con una buena compresibilidad ha hecho que se utilice en piezas que requieren densidades medias y bajas.

En cambio el polvo atomizado se utiliza preferentemente para componentes sinterizados de densidad media y alta, mediante prensado y sinterizado único se pueden producir piezas con densidad del orden de 7.1 g/cm^3 en fabricación masiva, debido a la forma irregular de la partícula, la resistencia en verde es alta lo que permite compactar piezas con geometría complicada.

Las propiedades mecánicas de los dos tipos de polvo las podemos distinguir en las tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3. Propiedades de sinterizado respecto a la densidad de sinterizado para polvo tipo esponja (NC100.24 + C) de Hogänäs.

Tabla 5.4. Propiedades de sinterizado respecto a la densidad de sinterizado para polvo tipo atomizado (ASC100.29 + C) de Hogänäs.

Revisando las tablas 5.3 y 5.4 nos damos cuenta que el hierro atomizado no es recomendado para trabajar en densidades de 6.6, por el contrario el hierro esponja si permite trabajar con este rango de densidad.

Aun cuando incrementáramos la densidad a nuestras piezas a 6.8 para poder realizar un comparativo en la dureza que podemos alcanzar los resultados serían, en hierro atomizado nos daría 85 HV10 (43 HRB) y en hierro esponja sería 110 HV10 (61 HRB). Respecto al cambio dimensional podemos observar que en hierro atomizado tenemos $-.05\%$ y en hierro esponja es de $.05\%$. Por lo tanto tenemos que el polvo que se acerca mas a las propiedades que buscamos es un F005-20 tipo esponja.

Un punto importante no tomado en cuenta en los párrafos anteriores respecto a la selección de polvo, es que desde el punto de vista practico es más aconsejable tratar de utilizar un polvo con el que ya se cuente o con el que ya se este familiarizado, es decir no utilizar un polvo completamente desconocido y que no se cuente con datos de comportamiento practico, sin embargo si no existe otra alternativa será necesario seleccionar uno nuevo que cumpla con las propiedades estipuladas.

5.6. EVALUACION.

En esta etapa demostraremos que el diseño cumple con las expectativas. Analizando tanto el diseño del herramental como los resultados dimensionales de las piezas fabricadas.

5.6.1. Diseño del herramental.

En esta parte del proyecto definiremos los principios básicos del proceso de diseño de herramientas para compactación, basándonos en el dibujo de la pieza a fabricar y tomando en cuenta las variables que se pueden presentar durante el proceso de fabricación

Consecuentemente, deben concretarse las dimensiones exactas y las tolerancias de todas las piezas.

Definiremos particularmente nuestro proceso de diseño en cuatro etapas:

- Dirección de compactado.
- Seccionamiento de la pieza.
- Determinación de las profundidades de llenado.
- Determinación del largo requerido para las partes del herramental.

5.6.1.1. Dirección de compactado.

Hay que decidir en que dirección de la pieza es preferible compactar para facilitar la expulsión de la pieza y el manejo de ella, para esto se debe determinar la cara superior e inferior, siempre buscando que la cara superior sea la más lisa para solo usar un solo punzón superior y los punzones inferiores necesarios.

En este caso la geometría de los pistones nos facilita encontrar la cara ideal para compactarlos, por su forma circular y simétrica.

5.6.1.2. Seccionamiento de la pieza.

Tras haber decidido la dirección de compactación de la pieza, se hace un croquis de la sección vertical de la pieza y todos los límites verticales de la sección.

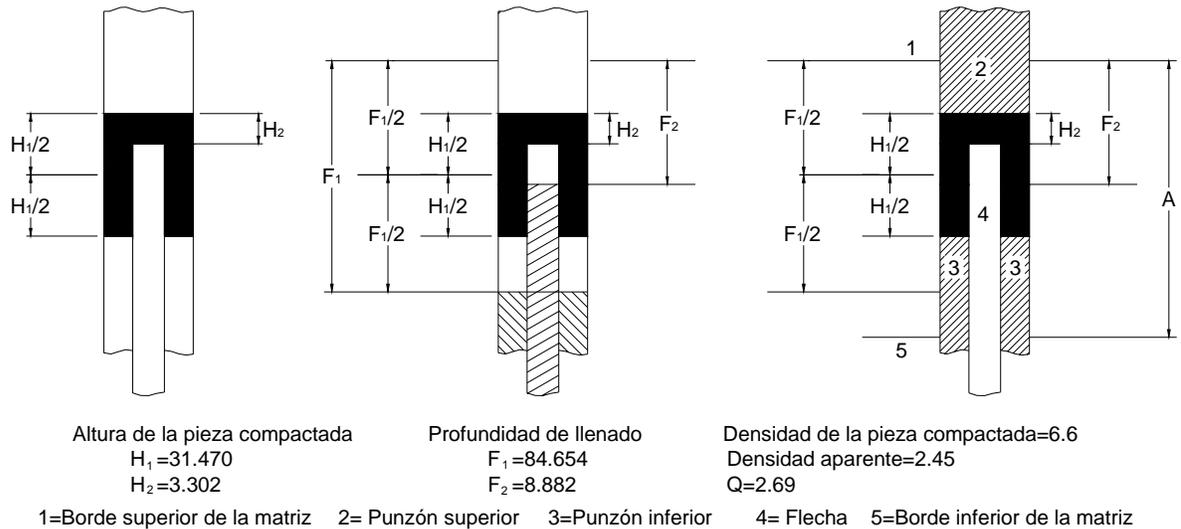


Figura 5.1. Seccionamiento del pistón.

5.6.1.3. Determinación de las profundidades de llenado.

Las profundidades de llenado requeridas para cada una de las partes de la pieza pueden ser calculadas mediante la relación "Q" entre la densidad de la pieza y la densidad de llenado (densidad aparente) del polvo.

$$Q = \rho_1 / \rho_2 \quad (5.1)$$

Donde:

- Q = Factor de llenado.
- ρ_1 = Densidad de la pieza.
- ρ_2 = Densidad de llenado (densidad aparente).

Los polvos comerciales tienen densidades entre 2.4 y 3.0 g/cm³. En nuestro caso de acuerdo al tipo de polvo seleccionado en la tabla 5.1 vemos que es un polvo de 3 a 0.6 % de C.

De acuerdo al manual de Höganäs este polvo tiene una densidad de llenado de 2.45 g/cm^3 y necesitamos una densidad final de la pieza de 6.6 g/cm^3 , entonces sustituimos en (5.1):

$$Q = 6.6 / 2.45 = 2.69.$$

Para conseguir las profundidades de llenado requeridas, las alturas H_1 y H_2 de las dos diferentes alturas de la pieza deben multiplicarse por este factor Q.

$$F = H * Q \quad (5.2)$$

Donde:

- F = Profundidad de llenado de la sección de la pieza
- H = Altura de la sección de la pieza
- Q = Factor de llenado

Los valores de las alturas que necesitamos son $H_1=31.47 \text{ mm}$ y la $H_2=3.302 \text{ mm}$. Entonces sustituyendo en la formula 5.2 las respectivas profundidades de llenado son:

$$F_1 = 31.47 * 2.69 = 84.654 \text{ mm.}$$

$$F_2 = 3.302 * 2.69 = 8.882 \text{ mm.}$$

Hemos decidido que el punzón se compactará simétricamente de arriba y abajo esto significa que durante la densificación el punzón inferior y el superior deberán recorrer distancias iguales dentro de la matriz.

Como consecuencia de esto al final del proceso de densificación el centro de compactación se encuentra a medio camino entre el borde superior de la matriz y la posición de llenado del punzón inferior.

De este modo marcaremos la posición de la parte superior de la matriz a una distancia $F_1/2=84.654/2 = 42.327 \text{ mm}$ al centro del compactado de la pieza, que debe ser igual a la distancia de este mismo centro a la posición de llenado del punzón.

5.6.1.4. Determinación del largo requerido para las partes del herramental.

Admitiendo que para el punzón inferior se requiere una guía mínima en la matriz de 25 mm , la matriz debe tener al menos 25 mm más de profundidad que la mayor profundidad de llenado. Así marcamos el borde inferior de la matriz a una distancia

$$A = F_1 + 25 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Donde:

- A = Largo mínimo de la matriz
- F_1 = Máxima profundidad de llenado

Por lo tanto.

$$A = 84.654 + 25 = 109.654 \text{ mm}$$

Esto es por debajo del borde superior. También debe considerarse la longitud del punzón inferior, el cual debe ser suficientemente largo para expulsar totalmente el pistón compactado de la matriz, es decir, tiene que medir al menos 109.654 de largo.

El punzón superior tiene que ser suficientemente largo para penetrar en la matriz la profundidad necesaria y lograr la altura de compactación deseada, es decir que su longitud debe ser al menos

$$(F1 - H1) / 2$$

Entonces:

$$(84.654 - 31.47) / 2 = 26.592 \text{ mm.}$$

Para estas longitudes debe añadirse un margen de 5 a 10 mm para permitir la corrección del desgaste de los perfiles de los punzones además de la altura y forma necesaria para sujetarlos.

5.6.1.5. Dimensionamiento y tolerancias.

Cuando se indican con precisión las dimensiones finales y las tolerancias de las partes del herramental, no deben considerarse sólo las dimensiones finales y las tolerancias de las piezas, como se especifica en el diseño de la pieza del cliente sino que hay que tener en cuenta los cambios dimensionales que sufre la pieza en la expulsión de la matriz y en el sinterizado posterior.

Los cambios dimensionales de las medidas longitudinales de la pieza no constituyen un gran problema porque pueden ser fácilmente compensados mediante ligeros ajustes de los movimientos y de las posiciones de los punzones. Mucho más críticos son los cambios de las medidas transversales de la pieza, porque no pueden ser ajustadas sin desmontar la herramienta para rectificarla o rehacerla completamente, por tanto antes de marcar las dimensiones transversales y las tolerancias finales es muy importante establecer cuidadosamente los cambios dimensionales de los pistones bajo condiciones de compactación, sinterización y acabados superficiales necesarios.

Pueden ser una buena guía los datos de piezas producidas previamente cuando estas existan como una útil estrategia en el camino hacia el diseño.

Es muy arriesgado basarse únicamente en los datos obtenidos bajo condiciones de laboratorio, ya que como mencionamos en los capítulos anteriores los cambios dimensionales durante los procesos de compactado y horneado se pueden presentar durante la expulsión de la pieza y también son sensibles no sólo a las variaciones de temperatura y de tiempo de sinterización, sino también a las variaciones de composición de los polvos y a la densidad de la pieza. Por lo que es recomendable la

realización de especímenes bajo las condiciones reales de compactación-densificación, condiciones de sinterizado y posteriores

5.6.1.6. Realización y resultado de pruebas.

La determinación del cambio dimensional fue efectuado de acuerdo al estándar 44 de la MPIF comparable con las normas ASTM B 610 e ISO 4492.

Condiciones de la prueba

- Densidad de prensado: 6.5 - 6.7 g/cm³.
- Temperaturas de sinterizado: 1220 °C por 30 minutos en atmósfera de endogas. Estas condiciones de horneado son las mismas que se utilizaron para obtener los resultados de las tablas 5.3 y 5.4.
- El tratamiento de vapor será realizado en un horno de banda continua con 4 diferentes zonas de temperatura propuestas de la siguiente manera. Aun cuando en la teoría nos marca que no se debe sobrepasar la temperatura de 550 °C (3.5.4.1. capítulo 3), la experiencia de los ingenieros de proceso en este tipo de horno nos marca otra cosa por lo tanto las condiciones para esta prueba son 650 para la primer zona y 600 para las zonas 2, 3 y 4.

RESULTADOS DIMENSIONALES DE ESPECIMENES

Molde	
ancho	12.701
largo	31.748

Densidades Obtenidas				
1	2	3	4	5
6.57	6.59	6.58	6.62	6.59

Prensado		Sinterizado			Tratamiento de vapor		
Ancho mm	Largo Mm	Ancho mm	Largo mm	Dureza HRB	Ancho mm	Largo mm	dureza HRB
12.705	31.761	12.722	31.788	38	12.722	31.789	93
12.708	31.759	12.725	31.792	40	12.726	31.790	92
12.704	31.757	12.721	31.793	39	12.723	31.795	93
12.706	31.762	12.723	31.790	39	12.725	31.793	90
12.705	31.763	12.722	31.795	37	12.723	31.796	92

Para calcular el porcentaje del cambio dimensional se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Cambio dimensional (\%)} = ((LS - LD) / LD) * 100 \quad (5.4)$$

Donde:

- LD= Dimensión de la cavidad de la matriz
- LS= Dimensión del espécimen sinterizado

CAMBIOS DIMENSIONALES	
Pieza #	Cambio %
1	0.12
2	0.13
3	0.14
4	0.13
5	0.14

Como resultado tenemos que el promedio del cambio dimensional es de .13 %.

Estos cálculos fueron basados en el estándar 44 de la MPIF

5.6.1.7. Selección de materiales para el herramental.

Como lo mencionamos en el punto 1.3 del capítulo 1 la selección de los materiales utilizados en la fabricación de las herramientas de compactación son comúnmente sugeridos por los fabricantes, en nuestro proyecto usaremos los materiales más comúnmente utilizados.

Para la fabricación de los punzones utilizaremos material A2 (AISI); para la fabricación de la matriz usaremos un inserto de carburo encamisado en un acero tratado convencionalmente como el 1045 y para la flecha utilizaremos en material M2 (AISI).

Es también importante mencionar que la aportación del fabricante de herramientas de compactación en la selección de materiales para su fabricación suele ser tan valiosa que podría no solo aminorar el costo del herramental sino el tiempo de maquinado y las propiedades que se podrían alcanzar con estos como el propio tiempo de vida del herramental.

5.6.1.8. Cálculo del tonelaje de compactación.

Para poder calcular el tonelaje necesitamos el área transversal de compactación y el factor de compresibilidad del polvo a utilizar.

En nuestro caso el área transversal de compactación equivale al área del diámetro del pistón la cual es 9.670 cm^2 y el factor de compresibilidad de este polvo es de $30 \text{ TSI} = 4.65 \text{ Ton/cm}^2$.

$$\text{Tonelaje} = 4.65 \text{ ton/cm}^2 * 9.670 \text{ cm}^2 = 44.96 \text{ ton.}$$

Lo cual sería el valor de tonelaje teórico necesario para compactar las piezas. Por cuestiones prácticas es necesaria la utilización de una prensa que nos de por lo menos el 20% más del tonelaje necesario.

Por lo tanto utilizaremos una prensa mecánica Gasbarre de 60 toneladas de capacidad con accesorios neumáticos para los ajustes de movimiento necesarios del herramental.

5.6.1.9. Diseño de la matriz.

Como ya calculamos en los párrafos anteriores la altura mínima de la matriz (A) debe ser de 109.65 mm entonces le daremos un largo total de 114.3 mm (4.5 pulg.).

Basándonos en el porcentaje de crecimiento del polvo (.13%) de las pruebas realizadas, y teniendo en cuenta que debemos dejar un diámetro de cuando menos 0.050 mm para que puedan dar un rectificado cilíndrico.

Despejando de la formula 5.4 tenemos que:

$$LD=LS/1.0013$$

$$LD=35.090/1.0013=35.044 \text{ mm}$$

Por lo tanto buscando un diámetro nominal para los pistones de 35.090 mm. La matriz debe tener un diámetro de 35.044 mm

Las medidas exteriores de la matriz son necesarias para la correcta colocación del molde dentro del dispositivo de la prensa que se valla a utilizar así como para su sujeción.

5.6.1.10. Diseño del punzón inferior y flecha.

Tomando en cuenta que la matriz mide 114.30 mm y que el punzón inferior debe expulsar por completo la pieza prensada la medida de este debe ser de por lo menos de 114.30, pero como se le debe dar un incremento para poder dar un rectificado futuro en caso necesario así como un tiempo de vida y tener el suficiente espacio para su sujeción le vamos a incrementar 25 mm. Entonces quedaría de un largo de 139.70 mm

El diámetro exterior no debe ser menor de 0.005 mm que el diámetro de la matriz, es decir debe quedar con el mejor ajuste posible. Por lo tanto el diámetro exterior del punzón no debe ser menor a 35.039 mm.

Como una ayuda extra en el desempeño del pistón se solicito adelgazar las paredes de la pieza entre el diámetro exterior e interior y hacer mas robustas las paredes entre los planos interiores y el diámetro exterior, por tal motivo se acordó que la medida nominal final del diámetro interior del pistón fuera 29.337 mm y la distancia entre los planos de 17.399 mm,

Por lo tanto de acuerdo a la formula 5.4 el diámetro de la flecha debe ser de 29.298 mm y la distancia de las paredes de la flecha debe ser de 17.376 mm.

Análogamente El diámetro interior del punzón no debe ser mayor en 0.005mm que el diámetro de la flecha. Entonces teniendo las medidas de la flecha el diámetro interior del punzón inferior debe ser de 29.342 mm y la distancia entre las paredes de 17.381 mm.

Con la finalidad de aclarar las medidas de los chaflanes mostrados tanto en el plano del pistón de fundición en bruto como en el plano del pistón de fundición maquinado se le deben realizar a estos los cambios necesarios para que puedan cumplir con la funcionalidad del pistón, además de no causar daño en la herramienta. Ver 1.2.3.1 capítulo 1. Además sobre la cara del punzón inferior es necesario realizar formar un barreno guía para hacer sobre este un maquinado posterior

La flecha debe tener una longitud mínima de cuando menos 75 mm más larga que el punzón inferior ya que esta debe de ir por el interior del punzón y a través de la base del mismo punzón y debe de ayudarnos en la posición de expulsión cuando el punzón inferior saque la pieza del interior de la matriz. Ya que el punzón tiene una altura de 139.70 mm entonces la flecha tendrá una longitud de 214.70 mm

5.6.1.11. Diseño del punzón superior.

Como el punzón superior debe ser suficientemente largo para penetrar en la matriz así como lograr la altura de compactación deseada tenemos una altura de 26.592 mm, incrementamos 25 mm para cubrir una futura corrección del desgaste por lo que tenemos una medida de 51.592 mm. Como el punzón superior solo recorre una distancia media dentro de la matriz podemos darle una forma más robusta para evitar posible rotura. Llevaremos el largo total del punzón hasta 101.6 mm para poder sujetarlo correctamente.

5.6.2. Resultados.

Los resultados dimensionales obtenidos durante los procesos se muestran en las siguientes tablas.

RESULTADOS DIMENSIONALES DE PISTONES SINTERIZADOS PROCESO DE Prensado

ITEM	CARACTERISTICA	ESPECIFICACION		NUMERO DE PIEZA				
		MIN	MAX	1	2	3	4	5
1	Altura (mm)	31.345	31.595	31.550	31.490	31.520	31.500	31.480
2	Espesor de base (mm)	3.048	3.556	3.300	3.270	3.340	3.410	3.360
3	Paralelismo (mm)	0.075	max	0.020	0.023	0.018	0.021	0.019
4	Planidez (mm)	0.050	max	0.018	0.014	0.012	0.018	0.013
5	Cilindricidad (mm)	0.050	max	0.001	0.007	0.005	0.004	0.005
6	Ø de caja (mm)	29.287	29.387	29.325	29.321	29.330	29.318	29.329
7	Ø exterior (mm)	35.040	35.140	35.064	35.065	35.062	35.066	35.066
8	Radio de caja (mm)	1.600	max	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
9	Ancho de caja (mm)	17.324	17.474	17.401	17.407	17.406	17.400	17.403
10	Distancia entre centros (mm)	12.853	12.953	12.911	12.904	12.906	12.910	12.904
11	Perpendicularidad (mm)	0.050	max	0.020	0.018	0.015	0.020	0.018
12	Plano chaflan (mm)	0.100	0.350	0.160	0.170	0.150	0.160	0.160
13	Altura chaflan (mm)	0.100	0.350	0.120	0.130	0.115	0.130	0.140
14	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.370	0.380	0.380	0.390	0.380
15	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
16	Altura chaflan (mm)	0.383	0.633	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
17	Altura chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
18	Plano chaflan (mm)	0.129	0.379	0.185	0.180	0.185	0.190	0.180
19	Radio de barreno (mm)	0.637	0.887	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750
20	Ø Barreno (mm)	2.390	2.540	2.503	2.505	2.504	2.506	2.502
21	Profundidad de barreno (mm)	2.923	3.173	3.058	3.052	3.054	3.050	3.056
Nota 2	Densidad (g/cm ³)	6.5	6.7	6.51	6.53	6.55	6.52	6.54
	Peso (g)	108.5	109.5	109.08	109.04	109.19	109.25	109.37

RESULTADOS DIMENSIONALES DE PISTONES SINTERIZADOS PROCESO DE SINTERIZADO

ITEM	CARACTERISTICA	ESPECIFICACION		NUMERO DE PIEZA				
		MIN	MAX	1	2	3	4	5
1	Altura (mm)	31.345	31.595	31.470	31.440	31.490	31.440	31.500
2	Espesor de base (mm)	3.048	3.556	3.270	3.150	3.300	3.230	3.200
3	Paralelismo (mm)	0.075	max	0.022	0.021	0.027	0.032	0.028
4	Planidez (mm)	0.050	max	0.024	0.019	0.028	0.021	0.032
5	Cilindricidad (mm)	0.050	max	0.012	0.004	0.011	0.008	0.006
6	Ø de caja (mm)	29.287	29.387	29.351	29.360	29.348	29.356	29.354
7	Ø exterior (mm)	35.040	35.140	35.111	35.121	35.105	35.118	35.113
8	Radio de caja (mm)	1.600	max	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
9	Ancho de caja (mm)	17.324	17.474	17.454	17.443	17.450	17.447	17.454
10	Distancia entre centros (mm)	12.853	12.953	12.923	12.928	12.920	12.921	12.928
11	Perpendicularidad (mm)	0.050	max	0.022	0.018	0.013	0.015	0.020
12	Plano chaflan (mm)	0.100	0.350	0.160	0.165	0.150	0.160	0.160
13	Altura chaflan (mm)	0.100	0.350	0.120	0.130	0.100	0.130	0.140
14	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.380	0.380	0.380	0.380	0.370
15	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
16	Altura chaflan (mm)	0.383	0.633	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
17	Altura chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
18	Plano chaflan (mm)	0.129	0.379	0.160	0.170	0.170	0.160	0.170
19	Radio de barreno (mm)	0.637	0.887	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750
20	Ø Barreno (mm)	2.390	2.540	2.513	2.496	2.498	2.506	2.490
21	Profundidad de barreno (mm)	2.923	3.173	3.054	3.052	3.048	3.054	3.051
Nota 2	Densidad (g/cm ³)	6.5	6.7	6.59	6.58	6.55	6.56	6.54
	Dureza (DRb)	30	50	37	38	43	41	44

RESULTADOS DIMENSIONALES DE PISTONES SINTERIZADOS PROCESO DE TRATAMIENTO DE VAPOR

ITEM	CARACTERISTICA	ESPECIFICACION		NUMERO DE PIEZA				
		MIN	MAX	1	2	3	4	5
1	Altura (mm)	31.345	31.595	31.440	31.510	31.450	31.410	31.460
2	Espesor de base (mm)	3.048	3.556	3.150	3.230	3.180	3.210	3.100
3	Paralelismo (mm)	0.075	max	0.032	0.025	0.019	0.023	0.026
4	Planidez (mm)	0.050	max	0.026	0.026	0.032	0.021	0.022
5	Cilindricidad (mm)	0.050	max	0.019	0.016	0.015	0.013	0.020
6	Ø de caja (mm)	29.287	29.387	29.358	29.363	29.365	29.348	29.356
7	Ø exterior (mm)	35.040	35.140	35.105	35.097	35.096	35.112	35.118
8	Radio de caja (mm)	1.600	max	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
9	Ancho de caja (mm)	17.324	17.474	17.423	17.438	17.436	17.435	17.433
10	Distancia entre centros (mm)	12.853	12.953	12.935	12.943	12.932	12.933	12.939
11	Perpendicularidad (mm)	0.050	max	0.025	0.028	0.033	0.018	0.013
12	Plano chaflan (mm)	0.100	0.350	0.165	0.170	0.170	0.169	0.150
13	Altura chaflan (mm)	0.100	0.350	0.130	0.120	0.125	0.120	0.130
14	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.380	0.380	0.380	0.390	0.380
15	Plano chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
16	Altura chaflan (mm)	0.383	0.633	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
17	Altura chaflan (mm)	0.256	0.506	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
18	Plano chaflan (mm)	0.129	0.379	0.170	0.180	0.190	0.180	0.180
19	Radio de barreno (mm)	0.637	0.887	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750
20	Ø Barreno (mm)	2.390	2.540	2.497	2.500	2.496	2.498	2.501
21	Profundidad de barreno (mm)	2.923	3.173	3.052	3.050	3.054	3.053	3.056
Nota 2	Densidad (g/cm ³)	6.5	6.7	6.62	6.63	6.59	6.55	6.61
Nota 4	Dureza (DRb)	88	98	89	92	93	92	90

CONCLUSIONES

La pulvimetalúrgia produce un gran número de piezas sinterizadas para la industria automotriz, siendo este su gran mercado, ya que el 75% de piezas producidas por el proceso de sinterización es para esta área.

La diversidad en las formas y tamaños de piezas que se pueden producir por medio de pulvimetalúrgia da oportunidad a que en la mayoría de las industrias pueda pensarse en desarrollar nuevas piezas, ya que por medio de otros procesos pueden ser imposibles de fabricar.

También cuenta con limitantes, ya que no es recomendable para fabricar un número pequeño de producción, sin embargo esta regla no siempre se cumple ya que si las propiedades de las piezas producidas por el proceso de pulvimetalúrgia son mejores que por uno convencional será mejor la utilización de piezas sinterizadas para un mejor funcionamiento. Por otro lado existen piezas que solo se pueden obtener por medio de pulvimetalúrgia debido a su tamaño o forma por lo que no importando su costo deben ser adquiridas.

Otra de las ventajas que ofrece la pulvimetalúrgia es la utilización de diferentes elementos en una mezcla de polvo, que pueden favorecer para maquinados y tratamientos posteriores, beneficiando con esto las propiedades finales de la pieza.

Después del desarrollo de este proyecto, nos hemos dado cuenta que otro tipo de industrias tales como la línea blanca puede hacer uso de la pulvimetalúrgia en algunas de sus piezas, obteniendo algún tipo de beneficios en tiempo, calidad y/o costo.

Actualmente este tipo de beneficios son necesarios no solo para algunas industrias como la automotriz y la línea blanca, sino para todas en general, ya que la competencia mundial ha ido creciendo rápidamente, por lo cual las industrias dependen del precio, calidad y tiempo de entrega que ofrecen con respecto a otras para su crecimiento o su completa desaparición del mercado.

La presente tesis demuestra uno de los beneficios reales que puede obtenerse en la sustitución de un pistón para un compresor para refrigeración obtenido por fundición y otro obtenido por sinterizado, basándose en que el volumen de producción anual es de un millón de compresores.

Los beneficios se ven reflejados en tiempo y costo, ya que se le reducen en gran medida los tiempos de maquinado.

En la siguiente tabla se desglosan los beneficios económicos que obtuvo el productor de compresores para refrigeración.

PISTONES DE FUNDICION VS PISTONES SINTERIZADOS

	COSTO DE COMPRA (DOLARES)	COSTO POR MAQUINADO (DOLARES)	COSTO TOTAL POR PIEZA (DOLARES)	COSTO POR PRODUCCION ANUAL (1 000 000 piezas)
FUNDICION	\$0.25	\$0.35	\$0.60	\$600,000.00
SINTERIZADO	\$0.35	\$0.15	\$0.50	\$500,000.00

	(DOLARES)
DIFERENCIA DE COSTO:	\$100,000.00

COSTOS DE MAQUINADO (DOLARES)

	RECTIFICADO CILINDRICO	RECTIFICADO DE TAPA	MAQUINADO DE BARRENO PARA SEGURO	MAQUINADO DE BARRENO PARA FLECHA DE BIELA
FUNDICION	\$0.15	\$0.10	\$0.05	\$0.05
SINTERIZADO	\$0.05	----	\$0.05	\$0.05

LA DIFERENCIA EN EL MAQUINADO RADICA PRINCIPALMENTE EN EL RECTIFICADO CILINDRICO, YA QUE A LOS PISTONES DE FUNDICION SE LES REALIZA TRES RECTIFICADOS PARA CUMPLIR CON LAS ESPECIFICACIONES Y A LOS PISTONES SINTERIZADOS SOLO UNA, ADEMAS QUE A LOS PISTONES SINTERIZADOS NO ES NECESARIO RECTIFICARLES LA TAPA DEL PISTON Y A LOS PISTONES DE FUNDICION SI ES NECESARIO.

BIBLIOGRAFIA

- Ingeniería de manufactura
U. Scharer, J. A. Rico, J. Cruz, L. Solares, R. Moreno
Editorial CECSA
- Introducción a la Pulvimetalurgia
P. Molera
E.B.
- Diseño en Ingeniería Mecánica
Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke
ED. Mc Graw Hill
- Tecnología Mecánica e Instalaciones
Odón de Buen L.
ED. Alfaomega
- Manual de Unidades Condensadoras
Electrolux
- Estándar 35 de Materiales para Partes Estructurales de Polvo Metálico
Metal Powder Industries Federation (MPIF)
2003 Edition
- Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products
Metal Powder Industries Federation (MPIF)
1998 Edition
- Engineering desing
Dieter
- Treatise on power metallurgy.
C. G. Goetsel

- Ceramica de los metales
F. sraupy
- Metals handbook
9 ed. vol.7
- Power metallurgy principles and applications.
F.V. Lenel
- www.mpif.org
- www.hoganas.com
- www.carpenterfortuna.com.mx/n_index03.htm