



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Elaboración de una práctica de metalurgia de los polvos en el departamento de materiales y procesos de fabricación.

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para
optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:

Ing. Luis Sidorovas

Autor:

Pedro F. Rojas U.

Naguanagua, Junio de 2011

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
CAPÍTULO 1 El Problema	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación	4
1.4. Alcance	4
1.5. Limitaciones	5
1.6. Antecedentes	5
CAPÍTULO 2 Marco Teórico	9
2.1. Procesos de conformación	9
2.2. Metalurgia de los polvos	10
2.2.1. Conformación mediante pulvimetalurgia	10
2.2.2. Etapas del proceso	10
2.2.3. Características	15
2.3. Los polvos	16
2.3.1. Selección de los polvos	16

2.3.2. Variables a considerar	17
2.3.2.1. Pureza	17
2.3.2.2. Composición química	17
2.3.2.3. Tamaño y forma de la partícula	17
2.3.2.4. Distribución por tamaño de las partículas	19
2.3.2.5. Densidad	19
2.3.2.6. Relación de compresión	19
2.3.2.7. Empaquetamiento y factor de flujo	20
2.3.2.8. Capacidad de sinterización	21
2.3.3. Mezcla de los polvos	21
2.3.3.1. Lubricantes	21
2.3.3.2. Aglutinantes	22
2.3.3.3. Aditivos	23
2.3.3.4. Mezcladores	23
2.3.3.5. Importancia del mezclado	25
CAPÍTULO 3 Metodología	27
3.1. Nivel de la investigación	27
3.2. Diseño de la investigación	27
3.3. Adquisición del material de estudio	28
3.4. Identificación del material (polvo) a utilizar durante la práctica	28
3.5. Determinación de las variables de estudio	28
3.6. Determinación de la pieza a fabricar	29
3.7. Diseño de la matriz de compactación	29
3.8. Construcción de la matriz de compactación	29
3.9. Conformación de la pieza metálica	30
3.10. Selección de maquinaria y equipos	30
3.11. Elaboración de la pieza mediante pulvimetalurgia	30
3.12. Estudio de la pieza mediante microscopía	31
3.13. Ensayo de microdureza Vickers	31

3.14. Elaboración de la guía de actividades	31
3.15. Montaje del rodillo	31
3.16. Elaboración de la animación del proceso	32
CAPÍTULO 4 Resultados	33
4.1. Determinación de las variables de estudio	33
4.2. Diseño y construcción de la matriz de compactación	34
4.3. Selección de maquinaria y equipos	37
4.4. Elaboración de pieza mediante pulvimetalurgia	39
4.5. Estudio de la pieza mediante microscopía óptica	42
4.6. Ensayo de microdureza Vickers	45
4.7. Elaboración de la guía de actividades	45
4.8. Montaje del rodillo	52
4.9. Elaboración de la animación del proceso	53
CAPÍTULO 5 Análisis de Resultados	55
5.1. Selección de las variables de estudio	55
5.2. Funcionamiento de la matriz de compactación	56
5.3. Selección de equipos	56
5.4. Estudio de la pieza de pulvimetalurgia	56
5.5. Estudio de la pieza mediante microscopía óptica y ensayo de microdureza Vickers	57
5.6. Elaboración de la guía de actividades	58
5.7. Montaje del rodillo	59
5.8. Elaboración de la animación de proceso	59
CAPÍTULO 6 Conclusiones y Recomendaciones	61
6.1. Conclusiones	61
6.2. Recomendaciones	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

Índice de Figuras

Figuras	Pág
2.1. Representación de un proceso de conformación mediante metalurgia de los polvos	11
2.2. Esquema de compactación.	13
2.3. Comportamiento de microestructura durante el sinterizado.	15
2.4. Embudo de Arnold.	19
2.5. Embudos de Hall.	20
2.6. Diversas formas que presentan los recipientes para mezclar polvos.	24
2.7. Varios sistemas de mezclado.	24
2.8. Densidades aparentes dependiendo del tiempo de mezclado para acero inoxidable con diferente concentración de aglutinante.	25

Índice de Tablas

Tablas	Pág
Tabla 2.1. Variaciones en las condiciones de trabajo mediante diversos tipos de compactación	12
Tabla 2.2. Características de los lubricantes	22

CAPÍTULO 1

El Problema

1.1. Situación Problemática.

Actualmente y a nivel mundial la mayor parte de los procesos industriales se ven en la necesidad de elevar lo más posible los niveles de producción de sus productos, primeramente para satisfacer el mercado globalizado y en constante expansión en el cual se desenvuelve y segundo, pero no menos importante para que sea posible costear el mantenimiento de las máquinas, los salarios de los trabajadores, entre otros; es decir para que el proceso sea rentable.

En la industria metalúrgica y más específicamente, en el área de los procesos de conformación de metales, existen gran cantidad de alternativas para obtener una pieza dada, cada una con ventajas y desventajas, las cuales permiten seleccionar la mejor opción dependiendo del producto deseado. Entre los más comunes se encuentra el proceso de fundición, en el cual se calienta un metal por encima de su punto de fusión y luego se vierte en una matriz con la forma de la pieza deseada, el proceso de forja en el cual se golpea el metal hasta obtener la forma dada, el proceso de metalurgia de los polvos, en el cual se coloca el metal pulverizado en una matriz, se le aplica presión y posteriormente un sinterizado para obtener el producto deseado.

La metalurgia de los polvos o pulvimetalurgia, es un proceso de conformado de metales que permite la fabricación de piezas con características únicas y difíciles de obtener mediante otros procesos, como son el control minucioso de la permeabilidad de la pieza, velocidades de producción relativamente altas, no produce material residual y se puede obtener un buen control dimensional; sin embargo, los procesos de conformación por pulvimetalurgia presentan el inconveniente que su elaboración puede resultar costosa, debido a los equipos necesarios para los mismos, así como también restricciones en cuanto al tamaño de las piezas que se pueden producir.

Actualmente la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo cuenta con un laboratorio de Procesos de Fabricación, en el cual se realizan prácticas didácticas que permiten estudiar el comportamiento de los materiales, así como también los diferentes procesos de conformación que se presentan en la industria actual, sin embargo, no se dispone de una práctica de este proceso de fabricación (pulvimetalurgia), lo cual indica que no se presentan estos contenidos en la programación de las practicas ni en las materias relacionadas. El motivo de este trabajo, es precisamente la elaboración de una práctica de pulvimetalurgia, como propuesta para la cátedra de Procesos de Fabricación, la cual permita el estudio de las diferentes variables que conlleva un proceso de conformado por pulvimetalurgia como son el grado de compactación de la pieza, la temperatura de sinterizado, permeabilidad de la pieza resultante y otros.

Con este trabajo se desea: elaborar un material didáctico que sirva de base teórica para el laboratorio de Procesos de Fabricación y una práctica que contenga una cantidad suficiente de actividades para que el estudiante sea capaz de estudiar, comprender y determinar las variables que definen un proceso de conformación mediante pulvimetalurgia.

1.2. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General

Elaborar una práctica de Conformado de Metales mediante un proceso de metalurgia de los polvos en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar el material (polvo) a utilizar en el desarrollo de la práctica de pulvimetalurgia en el laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación.
- Determinar las variables a estudiar durante los procesos que involucran la conformación de una pieza mediante metalurgia de los polvos.
- Diseñar la matriz y punzón que permita la compactación de la pieza deseada mediante la prensa mecánica del laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación.
- Construir la matriz y punzón de compactación que pueda ser utilizada en la prensa mecánica del laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación.
- Realizar una pieza mediante un proceso de conformación de metalurgia de los polvos en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación.
- Elaborar la guía de actividades a seguir que permita el estudio y comprensión de los distintos fenómenos y variables que intervienen en un proceso de conformación por pulvimetalurgia.
- Representar la práctica de Conformado de Metales mediante metalurgia de los polvos en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación a través una animación del proceso.

1.3. Justificación.

La Conformación por Pulvimetalurgia presenta diversas ventajas ya que es un proceso que permite un gran control sobre las características de la pieza como son las dimensiones o la porosidad de la misma, adicionalmente la pieza obtenida rara vez requiere de procesos de mecanizado posteriores, así como también carece de tensiones residuales debido a que en su fabricación no intervienen procesos de deformación que los produzcan. También es un proceso con una gran velocidad de producción, lo que permite un volumen de piezas muy elevado en poco tiempo.

La razón para invertir y trabajar en esta investigación radica en el hecho de que la metalurgia de los polvos es un proceso que a pesar de que en Venezuela no resulte tan común como otros, a nivel mundial sí representa una alternativa que merece ser estudiada, ya que ofrece productos con características que no pueden ser obtenidas con facilidad mediante otros procesos, adicionalmente en la actualidad existe una gran cantidad de piezas que son elaboradas mediante dicho proceso, por ejemplo en la industria automotriz existen más de 100 piezas por vehículo que son producidas mediante la metalurgia de los polvos.

1.4. Alcance.

- El fin del presente trabajo consiste en diseñar y realizar una práctica de Pulvimetalurgia que pueda ser aplicada en el Laboratorio de Procesos de Fabricación I.
- Para la fase de experimentación requerida para la elaboración de la práctica se utilizará como materia prima el polvo metálico disponible, y como parte del proceso de fabricación se requerirá el uso de la prensa mecánica del laboratorio

de Materiales y Procesos de Fabricación, así como también uno de los hornos de dicho departamento.

- Se elaborará un material didáctico que servirá de guía para la realización de las actividades de la práctica.
- La elaboración y/o procesamiento de la materia prima a utilizar, modificaciones a los equipos y herramientas o piezas adicionales se llevará a cabo en el laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación.

1.5. Limitaciones.

- La elaboración de este trabajo se llevará a cabo en un período correspondiente a dos (2) semestres iniciando en el período 1-2010 y finalizando en el 2-2010.
- Se debe tomar en cuenta que los equipos ya mencionados podrían presentar fallas y desperfectos antes o durante la realización de la fase experimental.
- Otro aspecto de importancia es la obtención de la materia prima para la realización de las prácticas, la cual podría estar limitada dependiendo de la capacidad de la empresa proveedora (Gabriel C.A.) y/o de los recursos que la universidad destine para la obtención de la misma.

1.6. Antecedentes.

Aunque los procesos para el trabajo de metales en polvo han existido por mucho tiempo, sólo en años recientes se han hecho las investigaciones y se han creado los procesos necesarios para que esta rama de la metalurgia se desarrolle como industria.

En la investigación de N. Chawla et al (2001) se compararon los efectos de la fatiga axial en piezas de acero realizadas mediante pulvimetalurgia con aglomerantes y otras obtenidas mediante aleación por difusión. Determinaron que ambas piezas poseían comportamiento bajo efectos de fatiga y resistencia a la tracción muy similares, sin embargo el esfuerzo de fluencia resultó mayor en la pieza de aleación por difusión, adicionalmente a una ductilidad más baja en la misma. Posteriormente J.J. Williams et al (2007) ampliaron las investigaciones respecto a los efectos de esfuerzos residuales en piezas de acero sometidas a fatiga y fabricadas mediante pulvimetalurgia, en la cual mediante difracción con rayos X determinaron que tratamientos térmicos a 175°C no influían en los esfuerzos residuales presentes, pero procesos de pulido de la superficie de la pieza resultaban en una disminución del 20% de los esfuerzos a compresión. También determinaron que los esfuerzos residuales superficiales no tenían influencia en el comportamiento a fatiga de la pieza.

La composición de los polvos, así como también la geometría y características de los granos juega un papel primordial en la pieza a fabricar. La investigación de T. Fujita et al (1999) hace una comparación entre las piezas obtenidas por pulvimetalurgia utilizando la composición Ti-6Al-4V y las obtenidas mediante polvos de hidruros HDH, obteniendo mejores resultados estas últimas: más capacidad de sinterización, microestructura mas fina, mejores propiedades mecánicas y de trabajo a bajas temperaturas.

O. Andersson et al (2009) estudiaron la influencia de los parámetros de corte como son velocidad de giro y avance, presencia de lubricación y tipo de insertos en el maquinado de piezas producidas a partir de 4 tipos bases de polvos metálicos:

AHC100.29 (atomizado con agua, 100% Fe) Distaloy AE (aleado mediante difusión, Fe con 1.5%Cu, 4%Ni y 0.5%Mo) Astaloy® CrM (atomizado con agua Fe con 3%Cr y 0.5%Mo) y Astaloy® A (atomizado con agua Fe con 1.9%Ni y 0.55%Mo).

En los procesos de fabricación que involucran pulvimetalurgia constantemente se están conduciendo investigaciones para su optimización, este es el caso de O. Mårs et al (2009) quienes estudiaron el efecto de utilizar polvos de acero inoxidable ferrítico de bajo cromo (410LV) en lugar del 409L ó 434L, para la fabricación de las pestañas de los tubos de escape, ya que el proceso de sinterización del nuevo material permite obtener una densidad igual a la presente en las piezas fabricadas con los otros materiales, pero a temperaturas menores de 1180°C, lo que reduciría los costos de producción de dichas piezas.

Además de las investigaciones dedicadas al estudio de las propiedades de piezas producidas mediante pulvimetalurgia, también existen antecedentes en los cuales se aprovechan dichas propiedades para aplicaciones específicas, por ejemplo D. Torres et al (2006) desarrollaron un proceso de pulvimetalurgia en el cual el control minucioso de la porosidad en la pieza a producir permite la elaboración de esponjas metálicas de aluminio. La empresa Porous Materials, Inc. utiliza el proceso de pulvimetalurgia para elaborar filtros de aire y aceite, y también en la fabricación de calipers de los frenos de disco para automóviles ya que se obtiene un excelente control del tamaño y la distribución de las porosidades, así como también de la permeabilidad de líquidos y gases.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

A continuación se presenta la base teórica sobre la que se fundamenta este trabajo, los conceptos y nociones necesarias para comprender un proceso de fabricación mediante pulvimetalurgia.

2.1. Procesos de Conformado.

Dentro del campo de los procesos de conformado hay una gran variedad de materiales que pueden ser transformados a través de diferentes métodos para la obtención de piezas para la industria automotriz, de construcción, aeronáutica, etc.

Más específicamente dentro de la metalurgia, la fabricación de piezas en su mayoría se realiza ya sea a través de un proceso de fundición o de maquinado, en el primero se calienta el material por encima de su punto de fusión a fin de obtener una colada la cual es vertida en un molde con la forma de la pieza deseada y posteriormente enfriada, en el segundo a partir de un planchón o barra se somete al material a procesos de deformación o de arranque de viruta hasta obtener la pieza; sin embargo también existen otros procesos menos conocidos, pero que sin duda aportan suficientes ventajas para ser considerados al momento de fabricar una pieza (que requiera, por ejemplo un buen control dimensional, de porosidades y de densidad) como es el proceso de pulvimetalurgia.

2.2. Metalurgia de los Polvos.

2.2.1. Conformación mediante pulvimetalurgia.

La metalurgia de los polvos ó pulvimetalurgia se define como el proceso que se utiliza para fabricar componentes (metálicos, no metálicos o mezclas de los dos) a partir de los polvos de los materiales y hacer piezas mediante la aplicación de presión y después calor o ambos simultáneamente. (Askeland et al, 2004)

2.2.2. Etapas del proceso.

El proceso (figura 2.1.) se inicia con la obtención de los polvos generalmente de metales como: el hierro, cobre, estaño, aluminio, níquel, titanio o aleaciones como latón, bronce, acero, etc. Posteriormente se comprime el polvo mediante una prensa mecánica o hidráulica, en una matriz de compactación con la forma de la pieza a fabricar y se obtiene lo que se conoce como pieza en crudo o verde que visualmente se asemeja a la pieza terminada pero posee propiedades mecánicas mucho más pobres. Como etapa final se somete a la pieza en crudo a un tratamiento de sinterizado en un horno a una temperatura de alrededor de 0.75 la temperatura de fusión del material, también existen variaciones en las cuales los procesos de compactado y sinterizado se realizan simultáneamente dependiendo de las propiedades deseadas y el tipo de polvo utilizado. (Askeland et al, 2004)

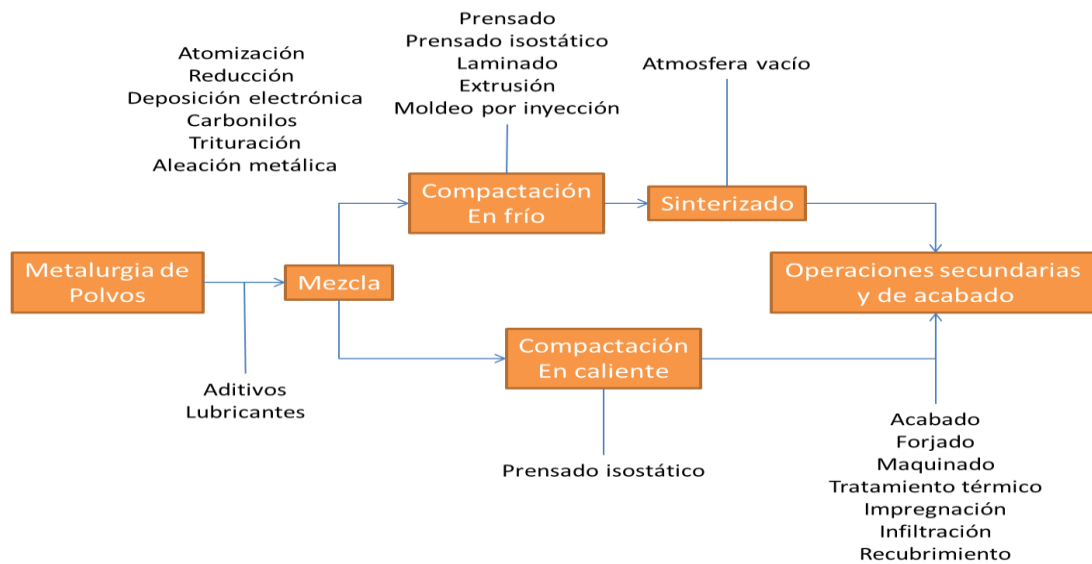


Figura 2.1. Representación de un proceso de conformación mediante metalurgia de los polvos. (Askeland et al, 2004)

Compactación:

La compactación consiste en la densificación de los polvos en una matriz mediante presión, dicha matriz determinará la forma de la pieza final. Existen varios tipos de compactación: uniaxial, biaxial e isostática, dependiendo de las direcciones en las cuales haya densificación debido al movimiento relativo entre partículas. En la tabla 2.1. se evidencia las variaciones en las condiciones de trabajo cuando se utiliza un proceso u otro no sólo tomando en cuenta la dirección de la densificación sino también si es proceso es de compresión caliente o fría. (Morral et al, 1985)

Tabla 2.1. Variaciones en las condiciones de trabajo mediante diversos tipos de compactación. (Randall, 1998)

Proceso	Isostática en Frío	Forja Frío	Comp. Matriz	Comp. Explosiva	Comp. Laminada	Comp. Caliente
Presión	Moderada 400Mpa	Muy alta >800Mpa	Alta 700Mpa	Muy alta >1Gpa	Bajo	Alta 700Mpa
Temperatura	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Muy alta	Ambiente	Tibio
Herramental	Suave	Duro	Duro	Suave	Duro	Duro
Rata de Deformación	Bajo	Alto	Alto	Muy alto	Bajo	Alto
Continuo	No	No	No	No	Sí	No
Dirección de Presión	3	1	1	1	1	1
Forma Completada	Moderada a alta	Moderada	Alta	Baja	Baja	Moderada
Polímero	No	No	Bajo 0,5%	No	Bajo 0,1%	Bajo 0,6%
Precisión	Bajo moderado	Moderado bajo	Alto extensivo	Bajo muy bajo	Alto moderado	Alto bajo

El propósito de la compactación es obtener forma, densidad y contacto entre partículas necesarios para que la pieza tenga suficiente resistencia para un proceso posterior. El polvo se introduce a la matriz a mediante un mecanismo de alimentación (figura 2.2.) y el punzón desciende al interior de la matriz, por lo general el proceso se realiza a temperatura ambiente con prensas hidráulicas o mecánicas, sin embargo también puede efectuarse a altas temperaturas (compresión en caliente).

Es importante señalar que los polvos metálicos bajo presión no se comportan como líquidos, por lo que la presión no se transmite de manera uniforme a través del molde; esto da lugar a que aún cuando se aplica presión por ambos lados de la pieza, el área central de la misma siempre tendrá una menor compactación que la zona exterior, generando inconsistencias en las propiedades de la pieza, por lo cual, relaciones entre longitud y ancho mayores a 3:1 no son recomendables. También deben omitirse de ser posible los cambios bruscos en las secciones de las piezas debido a que tienden a ser puntos de fractura en la pieza (Kalpakjian, 2008).

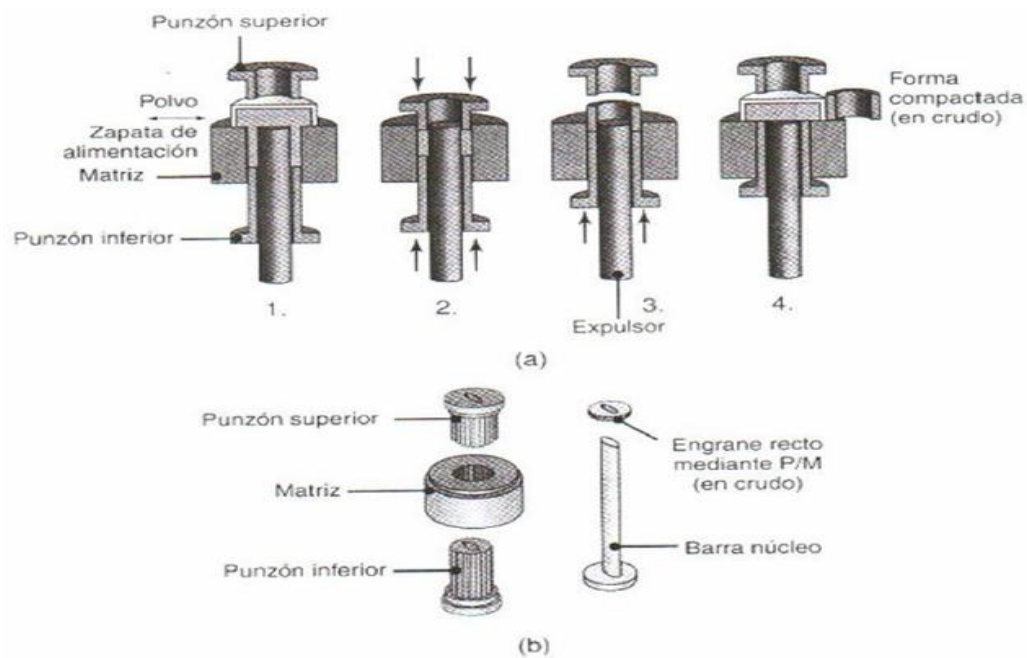


Figura 2.2. Esquema de compactación.(a) Compactación de polvos para formar un buje.(b) Juego típico de herramienta y matriz para compactar un engranaje recto.

(Kalpakjian, 2008)

A la pieza resultante de la compactación se le conoce como crudo o verde, debido a su baja resistencia, sin embargo debe ser lo suficientemente resistente para soportar la eyección del molde y su traslado hasta el sinterizado. Es posible elevar la resistencia de las piezas en verde optimizando la distribución de los polvos en la

matriz y aplicando las presiones adecuadas. Teóricamente es posible alcanzar mediante pulvimetalurgia el 100% de la resistencia y densidad de un metal sólido, sin embargo se requiere de procesos adicionales como recompresiones y presinterizados que pueden llegar a ser bastante costosos y en muchos casos innecesarios, por otro lado si se desea fabricar piezas con alta porosidad es necesario trabajar con presiones bajas (Kalpakjian, 2008).

Sinterizado:

La etapa de sinterización es muy importante para el proceso de conformación por metalurgia de los polvos, ya que mediante este proceso la pieza adquiere la resistencia y propiedades mecánicas para realizar la función para la cual se ha fabricado. Se define sinterizado como *“El tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la ‘fuerza’ y las resistencias de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas”*. (De Garmo et al, 2003).

Cuando se desea realizar algún tipo de mecanizado a una pieza en verde, se debe realizar una operación de **presinterizado**, en la cual las piezas compactadas se calientan brevemente a una temperatura considerablemente menor a la de sinterización, de forma que la pieza adquiera la resistencia suficiente para ser manipulada y maquinada, para posteriormente recibir el sinterizado definitivo, de esta forma el mecanizado posterior al sinterizado se reduce o elimina por un mecanizado más sencillo en una pieza con propiedades más pobres. (De Garmo et al, 2003)

El proceso de sinterizado consiste en una difusión atómica, donde las partes unidas por el proceso de compactación se fortalecen hasta formar una pieza uniforme. Las altas temperaturas (entre el 60 y 90 por ciento de la temperatura de fusión del mayor constituyente) pueden inducir procesos de recristalización y

crecimiento de granos, así como también disminución de las porosidades en el material. En la figura 2.3. se observa un esquema de la microestructura durante el sinterizado (a) y se observa como el compactado adquiere resistencia mientras disminuye el volumen, los poros y aumenta la densidad (b).

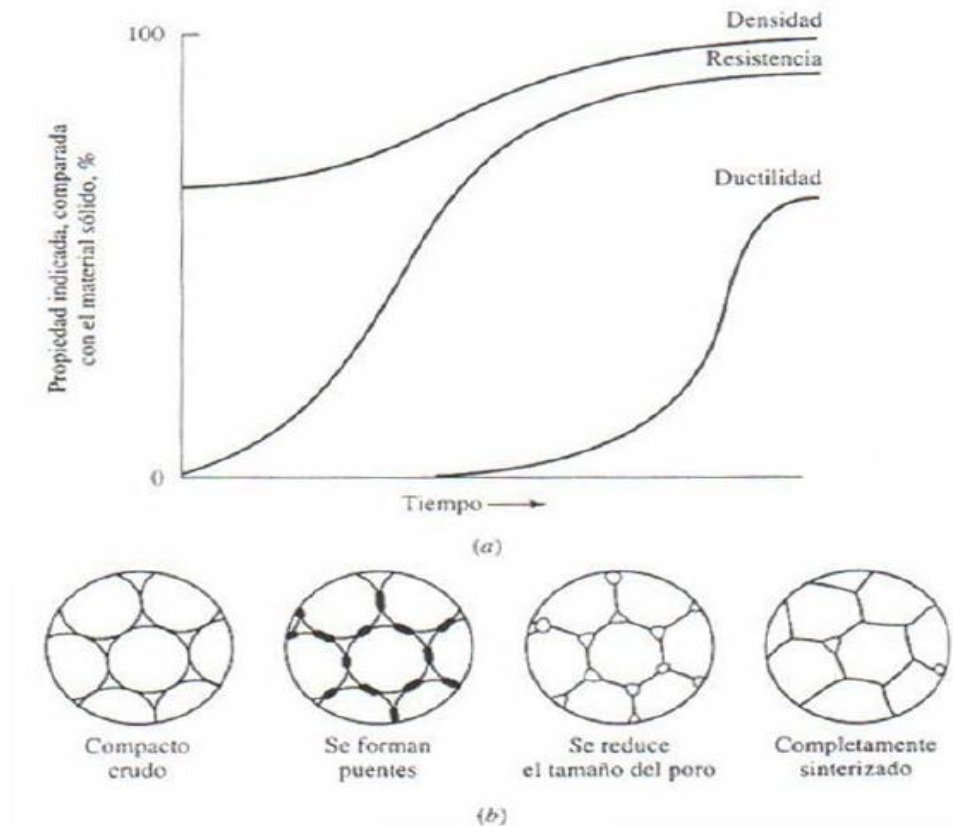


Figura 2.3. Comportamiento de la microestructura durante el sinterizado. (Shey, 2002)

2.2.3. Características.

El proceso de la pulvimetalurgia es ampliamente utilizado cuando se requiere de la fabricación de una gran cantidad de piezas pequeñas pero de gran precisión, también resulta útil cuando se desean obtener mezclas de materiales poco convencionales o también si se busca el control preciso del grado de porosidad o

permeabilidad de la pieza. Algunos ejemplos de productos que se elaboran mediante la pulvimetalurgia son: árboles de levas, herramientas de corte, gran variedad de filtros, guías de válvulas, entre otros.

Las propiedades mecánicas que se pueden obtener en piezas elaboradas mediante pulvimetalurgia son difíciles de obtener mediante otros métodos, especialmente cuando se refiere al control dimensional, la porosidad e incluso la capacidad de auto lubricación de la misma. Los polvos que se utilizan como materia prima en este proceso son considerablemente más costosos que el material en forma sólida, así como también lo es el proceso de fabricación, por lo que sólo se recomienda la utilización de la pulvimetalurgia para la fabricación de productos en grandes cantidades.

2.3 Los Polvos.

2.3.1. Selección de los polvos

La selección de los polvos a utilizar en un proceso de pulvimetalurgia es una etapa fundamental en la elaboración de la misma, ya que indirectamente se está definiendo los rangos de permeabilidad y propiedades mecánicas que se pueden obtener en la pieza terminada, así como también la capacidad de las prensas y hornos a utilizar en dicho proceso. Debido a que los metales son propensos a la oxidación es importante señalar que cuando se trabaja con polvos metálicos estos deben estar en recipientes herméticos, al vacío o con gas inerte, también se debe tener un control minucioso de la humedad. Para la selección de los polvos debe considerarse la pureza, composición química, tamaño de la partícula, distribución por tamaño de las partículas, densidad, relación de compresión, forma de la partícula, factor de flujo, empaquetamiento y capacidad de sinterización.

2.3.2. Variables a considerar

Pureza:

La presencia de impurezas o elementos no deseados dentro de la composición de los polvos puede producir alteraciones significativas en las propiedades mecánicas de la pieza terminada.

Composición Química:

Los procesos de pulvimetalurgia pueden llevarse a cabo utilizando polvos compuestos de uno o más materiales, la utilización de uno u otro dependerá de las características deseadas, por lo general la utilización de polvos compuestos por varios elementos permite obtener piezas con mejores propiedades mecánicas o temperaturas de sinterización más bajas que las que se obtienen utilizando polvos de un solo elemento, sin embargo, debe tenerse en consideración que de utilizarse elementos con diferencias de energía muy grandes pueden producirse reacciones químicas y explosiones en el material.

Tamaño y Forma de la Partícula:

El tamaño y forma de la partícula juega un papel fundamental en el proceso de conformación por pulvimetalurgia y tiene efectos en el moldeo, resistencia, densidad, porosidad, permeabilidad y estabilidad dimensional del producto; en general el tamaño de las partículas utilizadas en este proceso va desde 5 a 200 micrómetros. En general se considera que los polvos con partículas que presentan formas abruptas se mezclan de forma más homogénea, mientras que los polvos con partículas redondeadas presentan una mayor fluidez bajo presión en el molde.

Al momento de seleccionar el polvo para una pieza determinada, debe considerarse que la falta de homogeneidad en la forma de las partículas puede variar la proporción y distribución de las mismas en el producto final, produciendo zonas con distintas propiedades mecánicas dentro de una misma pieza. Cabe destacar que la forma de las partículas es un factor más relevante cuando se trabaja con polvos finos que el caso de los polvos gruesos.

Para controlar el tamaño de las partículas en los polvos gruesos se utilizan cribas, mientras que en los polvos más finos se utiliza el método de elutriación de aire, el cual consiste en un método de separación basado en la velocidad de sedimentación de las partículas en un fluido (DeGarmo et al, 2003).

Adicionalmente a las cribas también existen otros métodos para determinar el tamaño de las partículas:

Sedimentación: Comprende la rapidez con la que se sedimentan las partículas en un fluido.

Análisis Microscópico: Incluye microscopía electrónica, de transmisión o barrido.

Dispersión de la Luz: Se hace pasar un láser a través de una muestra constituida por partículas suspendidas en un medio líquido y posteriormente un detector digitaliza las señales y calcula la distribución del tamaño de las partículas.

Óptico: Mediante un rayo de luz y una fotocelda que lo detecta.

Partículas Suspendidas en un Líquido: Se detectan mediante sensores eléctricos. (Kalpakjian, 2008)

Distribución por Tamaño de las Partículas:

La distribución del tamaño de las partículas se especifica en términos de análisis de mayas e influye en la compactación del polvo y su comportamiento durante la sinterización y el moldeo. Su análisis se realiza sobre la base del polvo que pasa a través de las diferentes mayas. (DeGarmo et al, 2003)

Densidad:

Se define como masa por unidad de volumen. Es importante destacar lo que se conoce como densidad aparente la cual es la densidad del polvo cuando es compactado flojamente, se calcula generalmente en gramos por centímetro cubico de material. (Randall, 1988)

Relación de Compresión:

También conocido como compresibilidad, es la relación que existe entre el volumen del polvo antes y después de la compresión (ecuación 2.1). Es una relación que depende del tamaño de las partículas y generalmente se tienen relaciones de compresión cercana a 3:1 o incluso más altas en el caso de los polvos más finos. Es un factor de gran importancia para el diseño de las dimensiones de moldes destinados a un polvo en específico. Se obtiene mediante la división de la densidad del polvo comprimido entre la densidad aparente. Para la determinación de la densidad aparente se utiliza un embudo Arnold (figura 2.4.)

$$\text{Relación de Compresión} = \frac{\text{Densidad}_{\text{Polvo Comprimido}}}{\text{Densidad}_{\text{Aparente}}} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

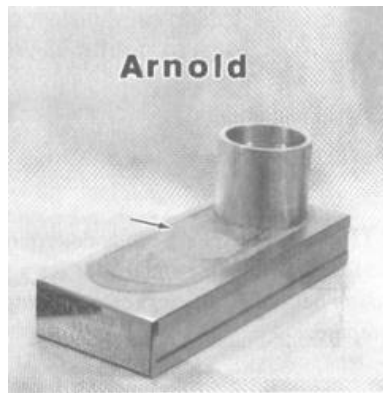


Figura 2.4. Embudo de Arnold. (Randall, 1998)

Empaquetamiento y Factor de Flujo:

El empaquetamiento y factor de flujo son variables de gran importancia tanto para el manejo como para la compactación de los polvos. A medida que existe un mayor empaquetamiento hay menos cavidades en los polvos, lo que se traduce como mayor densidad, menos porosidades y mejores propiedades mecánicas en la pieza terminada.

El flujo es la propiedad del polvo relacionada con la fricción existente entre las partículas del mismo, por tanto tiene una influencia directa en el reordenamiento y empaquetamiento de las éstas. Generalmente se desea tener un empaquetamiento denso y la menor fricción posible para obtener las mejores propiedades mecánicas.

El factor de flujo se define como la rapidez con la que el polvo metálico fluye mediante la acción de la gravedad a través de un contenedor con un agujero de forma y acabado estandarizado. Por lo general se utiliza un embudo de Hall (figura 2.4.), en el cual se mide el tiempo (en segundos) para que 50 gramos de polvo fluyan a través del orificio estándar en el fondo de un cono metálico que posee un ángulo interno de 60°. El factor de flujo depende del tamaño, la forma, distribución de tamaños y fricción entre las partículas. El embudo Arnold (Randall, 1998)

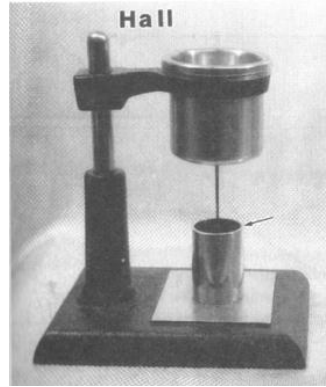


Figura 2.5. Embudo de Hall. (Randall, 1998)

Capacidad de Sinterización:

Se refiere a la capacidad de los polvos de no depender de un rango de valores de temperatura muy estrecho para lograr una sinterización aceptable, que permita una pieza con propiedades mecánicas satisfactorias. (De Garmo et al, 2003)

2.3.3 Mezcla de los polvos

La mezcla de polvos consiste en la homogenización de diferentes sustancias con diferentes propiedades, por ejemplo una buena mezcla de polvos con diferentes colores resulta en un nuevo color y una mezcla de metales con polímeros cambia las propiedades del producto final. En la etapa de mezcla de los polvos se lleva a cabo la adición de componentes como lubricantes, materiales de unión y agentes volátiles cuando desea aumentar la porosidad. Debido a la gran afinidad metal-oxígeno, cuando se trabaja con polvos metálicos es preciso tomar una serie de precauciones destinadas a evitar la oxidación, como son, por ejemplo, el embalaje debe ser en recipientes herméticos, cerrados al vacío o con gas inerte; el almacenamiento en locales con humedad controlada, etc.

Lubricantes

El elemento principal es el lubricante que tiene como finalidad aumentar la fluidez del sistema para obtener una densidad alta y homogénea, ya que reduce la

fricción entre las partículas y la matriz y entre ellas mismas, lo que favorece la eyección de la pieza del molde de compactación disminuyendo la posibilidad de grietas, entre los más comunes está el ácido esteárico o estereato de zinc en una proporción de 0,25 al 5 por ciento de peso. Existen 2 métodos principales para remover el lubricante, ya sea por disolución química o por evaporación al elevar la temperatura más allá de su punto de fusión. Generalmente en caso de utilizar la evaporación quedan residuos o “cenizas” (tabla 2.2), las cuales se buscan minimizar, ya que pasan a ser contaminantes del producto. (Randall, 1998)

Nombre Común	Oxido	Cenizas (%)	Temperatura de Ablandamiento (°C)	Temperatura de Fusión (°C)	Densidad (gr/cm ³)
Estereato de Calcio	CaO	9	115 -120	160	1,03
Acravax C Ethylenebisstearamide	-	2	120	144	1,05
Duramax B-1013 Polymethylmetacrylate	-	9	105	160	1,1
Glicotube PM 100	ZnO	1	120	137	1,06
Estereato de Litio	Li ₂ O	5	195	220	1,01
Parafina Wax	-	1	85	99	0,93
Acido Estérico	-	2	45	55	0,85
Teflón Polytetraflouroethylene	-	0	275	325	2,1
Estereato de Zinc	ZnO	14	110	120	1,09

Tabla 2.2. Características de los lubricantes (Randall, 1998)

Aglutinantes

Los aglutinantes cumplen la función de elevar la resistencia del crudo, de esta forma la pieza puede ser transportada hacia el proceso de sinterizado con menor riesgo de que ésta sufra daños en el camino, como ejemplo más común se tienen los moldes de arena.

Aditivos

Los aditivos son elementos que pueden agregarse a la mezcla de los polvos para facilitar el sinterizado, generalmente reduciendo la temperatura necesaria para éste.

Mezcladores

El mezclado generalmente se realiza en mezcladores con forma de doble cono o en V y su tiempo de mezclado depende los elementos, por ejemplo para los polvos de hierro y estereato de zinc se demora alrededor de 1 hora, mientras que para la mezcla de carburo de wolframio con cobalto, parafina y acetona puede tardar hasta 1 día, se considera que los mejores resultados se obtienen cuando el recipiente se encuentra lleno entre un 20 y 40 por ciento. Existen diversos tipos de mezcladores (figura 2.6) y diversos tipos de agitadores (figura 2.7) dependiendo de la mezcla de polvos con la que se trabaje, generalmente se diseñan con baffles internos para evitar la caída libre de los polvos que pueda producir la segregación de los mismos.

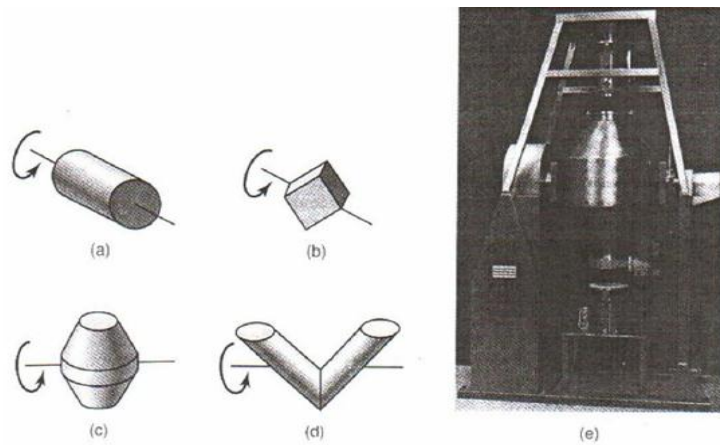


Figura 2.6. Diversas formas que presentan los recipientes para mezclar polvos. (a) hasta (d) son las formas más comunes, (e) es un mezclador adecuado para polvos metálicos (Kalpakjian, 2008)

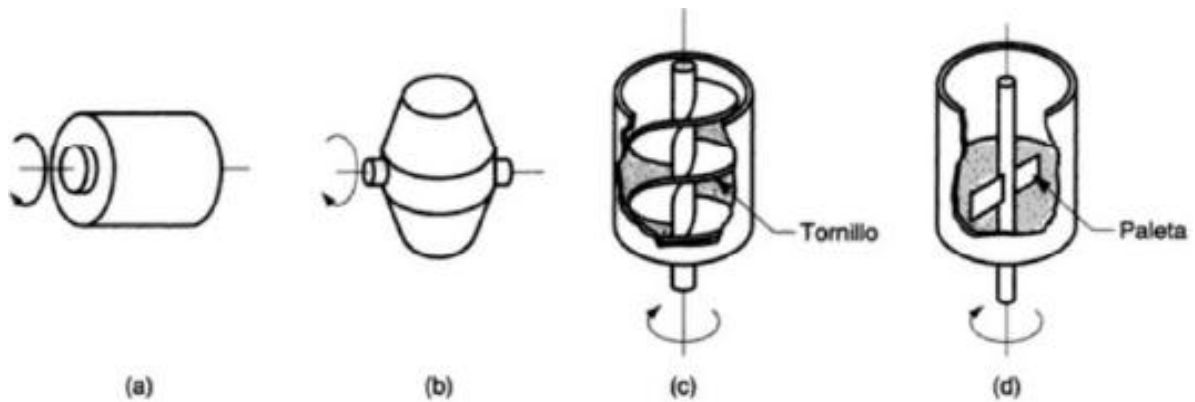


Figura 2.7. Varios sistemas de mezclado. (a) Tambor rotatorio; (b) Doble cono rotatorio; (c) Mezclador de tornillo; (d) Mezclador de Paletas. (Groover, 2010)

Importancia del mezclado

De someterse durante el mezclado a condiciones mecánicas muy severas pueden lograrse polvos de tal calidad que las piezas sinterizadas presentan propiedades equiparables a las de una pieza maciza, sin embargo de efectuarse un mezclado excesivo se puede alterar la forma de las partículas y hacer que se endurezcan por trabajo, dificultando posteriormente el compactado, de allí la importancia del tiempo de mezclado (figura 2.8.). Es importante destacar que aún cuando se utiliza un solo metal, los polvos pueden tener variaciones considerables en el tamaño y forma de cada grano, por lo que el proceso de mezclado sigue siendo importante para obtener la mayor homogeneidad posible. Después de salir de los mezcladores el polvo se introduce en un recipiente que reproduce la forma de la pieza a elaborar, donde se somete a vibración a fin de mejorar la distribución y maximizar el empaquetamiento, es después de esta etapa que se determina la densidad aparente del polvo. (Groover, 2010)

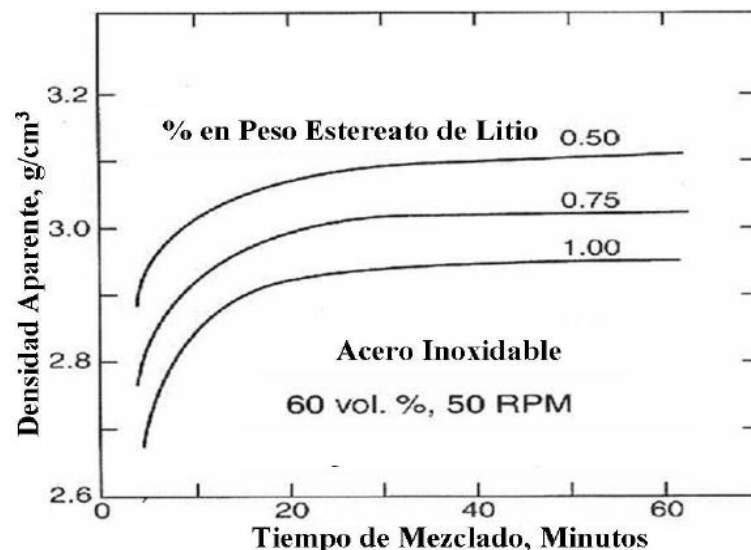


Figura 2.8. Densidades aparentes dependiendo del tiempo de mezclado para acero inoxidable con diferente concentración de aglutinante. (Randall, 1998)

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

A continuación se presenta la metodología utilizada para la elaboración de la práctica de pulvimetalurgia, incluyendo el diseño y fabricación de la pieza y demás componentes utilizados para la elaboración de este trabajo.

3.1. Nivel de la Investigación.

Para el desarrollo de la problemática planteada fue necesario establecer los niveles de estudio de la investigación, en este caso según Tamayo M. (2001) se trata de una investigación de tipo experimental ya que se deben reproducir condiciones en el laboratorio que se asemejen a las de la práctica planteada. Adicionalmente la investigación fue de tipo descriptiva ya que se identificaron propiedades de fenómenos o variables, utilizando como método de investigación la observación.

3.2. Diseño de la Investigación.

Se trató de una investigación de tipo experimental en la cual se recrearon los procesos de conformación por pulvimetalurgia, para posteriormente estudiar los efectos de diversas variables como temperatura y presión en el proceso productivo y por ende su efecto en las propiedades mecánicas del producto final.

3.3. Adquisición del material de estudio.

El material de estudio utilizado fue una mezcla de polvos suministrado por la empresa Gabriel C.A., consiste en una mezcla de polvos 95,5% hierro; 3,013% cobre; 1,02% Acrawax (lubricante/aglutinante) y 0,467% grafito. (Ver certificado de calidad en ANEXOS, Gabriel C.A. 2010)

3.4. Identificación del material (polvo) a utilizar durante la práctica.

Primeramente se definieron los polvos metálicos a utilizar, si se utilizaron o no elementos aglutinantes como parte de la mezcla a compactar, también fue necesario determinar su composición química, definir si se está trabajando con un polvo de un elemento puro o una mezcla de diversos elementos. Una vez identificado el material fue posible, basándose en trabajos previos estimar tanto las propiedades mecánicas que se obtendrán en la pieza final como las condiciones de presión, temperatura durante su conformación para lograr dichas propiedades.

3.5. Determinación de las variables de estudio.

Se estudiaron los efectos de la presión de compactación, temperatura de sinterizado, tamaño y forma del grano, composición de los polvos y utilización de una compactación en frío o en caliente en un proceso de conformado de pulvimetalurgia, y posteriormente se seleccionaron las variables que fueron más relevantes en la obtención de una pieza con propiedades mecánicas aceptables.

3.6. Determinación de la pieza a fabricar.

A fin de ajustarse a las limitaciones de tamaño que presentaron la prensa y el horno a utilizar, así como también las limitaciones de cantidad de materia prima y el hecho de que la elaboración de dicha pieza tiene fines netamente didácticos, se escogió la fabricación de una pieza pequeña y de poca complejidad (debido a que las piezas de geometrías complejas tienden a perder calidad cuando son realizadas mediante pulvimetalurgia), más específicamente una base para rodillos giratorios, la cual posee una cavidad en la parte inferior donde se puede acoplar un rodamiento, lo cual permite el giro de los rodillos.

3.7. Diseño de la matriz de compactación.

Se diseñó una matriz de 3 piezas: una base sobre la cual se alojará el polvo, una pieza superior y una pieza lateral para contener y sobre la cual deslizarán las otras dos. Para el diseño de la pieza exterior, se utilizaron las ecuaciones de diseño en recipientes a presión de sección cilíndrica según Megyesy (1992); cabe destacar que al aplicar estas ecuaciones se asume que el recipiente estará sometido a presiones de tipo hidrostática, sin embargo en el caso de los metales en polvo la presión generada longitudinalmente es notablemente menor que si se tratara de un fluido convencional (Kalpakjian, 2008), por tanto existe aún mayor seguridad en el desempeño de la matriz.

3.8. Construcción de la matriz de compactación.

Mediante recursos propios se fabricó la matriz para la etapa de compactación de acuerdo a los planos N° 1, 2 y 3 (Anexos).

3.9. Conformación de la pieza metálica.

Primeramente se realizó un proceso de compactación de los polvos metálicos, de acuerdo a los parámetros fijados anteriormente, mediante la matriz y punzón de compactación y utilizando la prensa mecánica seleccionada. Posteriormente se extrajo la pieza compactada (verde) y se colocó en el horno a fin de someterla a un proceso de sinterizado, también de acuerdo a los parámetros fijados anteriormente.

3.10. Selección de maquinaria y equipos.

Como última etapa de diseño se escogieron los equipos y maquinaria a ser utilizados en la fabricación de la matriz y el punzón, en función de los parámetros requeridos para la fabricación de la pieza.

3.11. Elaboración de pieza mediante pulvimetalurgia.

Primeramente se determinó el volumen de mezcla de polvos a utilizar; para las mezclas de polvo que son principalmente hierro se pueden esperar relaciones de compresión de aproximadamente 2,5:1 (Klar. et al 2007), por lo que es posible a partir del volumen deseado de la pieza estimar el volumen de mezcla de polvos necesario para su fabricación. Una vez conocido el volumen de polvo necesario para la pieza, así como también la presión de compactación y el tiempo y temperatura de sinterizado se procedió a las etapas de compactado y sinterizado obteniéndose de esta última la pieza deseada.

3.12. Estudio de la pieza mediante microscopía.

La preparación metalográfica de la pieza se inició mediante un proceso de desbaste utilizando lijas de 80, 120, 400 y 600 y rotando 90° la dirección de desbaste entre una y otra, posteriormente se procedió a un proceso de pulido grueso y posteriormente pulido fino utilizando alúmina durante 5 minutos en ambos casos; como etapa final se procedió al ataque químico utilizando nital al 2% aplicado mediante un algodón durante 25 segundos, finalmente y luego de dejar secar se observó la microestructura de la pieza en un microscopio óptico a aumentos de 100x, 200x, 400x y 1000x.

3.13. Ensayo de microdureza Vickers.

A fin tener una idea de las propiedades mecánicas de la pieza fabricada, se realizó un ensayo de microdureza Vickers a las diferentes fases que puedan presentarse en la microestructura.

3.14. Elaboración de la guía de actividades.

En base a la experiencia de la elaboración de la pieza se determinaron los aspectos relevantes y posibles observaciones y conclusiones que se puedan obtener de la realización de la pieza metálica bajo esas condiciones, luego se planteó una serie de actividades que permiten el correcto estudio y comprensión de las variables y fenómenos que intervienen en un proceso de conformación por pulvimetalurgia.

3.15. Montaje del rodillo.

A fin de demostrar que es posible obtener una pieza funcional mediante un proceso de pulvimetalurgia se construyó un rodillo, que utiliza como base del mismo la pieza fabricada para este trabajo.

3.16. Elaboración de la animación del proceso.

Teniendo en cuenta que este trabajo tiene un objetivo didáctico, se planteó también la elaboración de una animación, que pueda ser implementada como parte del material del aula virtual y que represente las diferentes etapas que componen un proceso de conformación mediante la metalurgia de los polvos. Para la creación de dicha animación primero se seleccionó como software a utilizar Adobe Flash Professional CS5.5, posteriormente se realizó la animación, dividiéndose en las 3 etapas principales del proceso: mezcla de los polvos, compactación y sinterización.

CAPÍTULO 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de los diseños, tanto de la pieza elaborada mediante pulvimetalurgia, como de la matriz y demás piezas utilizadas, así como también la práctica de laboratorio redactada en función de los resultados obtenidos durante el proceso de fabricación de la pieza y características de la animación del proceso.

4.1. Determinación de las variables de estudio.

Aun cuando existe gran cantidad de variables que influyen dentro de un proceso de pulvimetalurgia, para motivos de este trabajo sólo se controlaron:

- Presión de compactación (P_c) [toneladas]
- Relación de compresión (R_c)
- Temperatura de sinterizado (T_s) [°C]
- Tiempo de sinterizado (t_s) [horas]

4.2. Diseño y construcción de la matriz de compactación.

De acuerdo a lo establecido en el Marco Metodológico se procede al diseño de la matriz:

$$S_1 = \frac{PD}{4t} \quad (\text{Ecuación 4.1.})$$

$$S_2 = \frac{PD}{2t} \quad (\text{Ecuación 4.2.})$$

Donde:

S_1 : Esfuerzo longitudinal (*psi*)

S_2 : Esfuerzo circunferencial (*psi*)

P: Presión interna o externa (*psi*)

D: Diámetro medio de la pieza (*pulg*)

t: espesor de la pared de la pieza (*mm*)

Se observó a primera vista que el esfuerzo circunferencial siempre será mayor que el longitudinal, y por tanto el parámetro crítico de diseño. Al momento de la realización de estos cálculos no se conocía la composición de los polvos a utilizar para la elaboración de la práctica por lo que se tomó una presión interna $P = 100\text{ksi}$, el máximo utilizado hoy en día para la etapa de compactación (International Powder Metallurgy Directory, 2011), para asegurar el correcto funcionamiento de la matriz.

Una vez seleccionada la presión P se procedió a dar valores a D y t, y a través de la ecuación se obtuvieron valores de S_2 , estos valores se compararon con el valor de resistencia máxima a la tracción de diferentes aceros y el espesor de la pared de la matriz se aumentó hasta que el esfuerzo circunferencial requerido fuera menor a la resistencia máxima a la tracción de dicho material.

- La resistencia a la tracción del acero CM4140 (σ_{max}) oscila entre $860 \frac{N}{mm^2}$ y $970 \frac{N}{mm^2}$ (E. Avallone et al, 1999).

Para $t = 15mm = 2,56pulg$:

$$S_2 = \frac{100.000psi * 2,56pulg}{2 * 0,59pulg}$$

$$S_2 = 216.949,15psi = 1495,81 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_2 > \sigma_{max}$$

Para un espesor de pared $t = 15mm$ no se cumple con los requerimientos de diseño.

Para $t = 20mm = 2,76pulg$:

$$S_2 = \frac{100.000psi * 2,76pulg}{2 * 0,78pulg}$$

$$S_2 = 176.923,08psi = 1219,84 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_2 > \sigma_{max}$$

Para un espesor de pared $t = 20mm$ no se cumple con los requerimientos de diseño.

Para $t = 25mm = 2,95pulg$:

$$S_2 = \frac{100.000psi * 2,95pulg}{2 * 0,98pulg}$$

$$S_2 = 150.510,20psi = 1037,73 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_2 > \sigma_{max}$$

Para un espesor de pared $t = 25mm$ no se cumple con los requerimientos de diseño.

Para $t = 30mm = 3,15pulg$:

$$S_2 = \frac{100.000psi * 3,15pulg}{2 * 1,18pulg}$$

$$S_2 = 133.474,58psi = 920,27 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_2 < \sigma_{max}$$

Para un espesor de pared $t = 30mm$ sí se cumple con los requerimientos de diseño.

$$t = 30mm$$

Se seleccionó el acero CM4140 con un espesor de pared de $t = 30mm$ para la fabricación de la pieza exterior y superior de la matriz (Anexos, Planos N°1 y N°2). Las pieza inferior (Anexos, Plano N°3) por razones de costo y al no estar sometida a presiones que puedan poner en riesgo el funcionamiento del conjunto no obedecen a ningún factor de diseño, por lo que fue elaborada con un acero 1045. Seguidamente se llevó a cabo la construcción de una matriz de compactación de 3 piezas de acuerdo a lo establecido:



Figura 4.2.1. Pieza exterior de la matriz.



Figura 4.2.2. Pieza superior de la matriz.



Figura 4.2.3. Pieza inferior de la matriz.



Figura 4.2.4. Matriz ensamblada.

4.3. Selección de maquinaria y equipos.

De acuerdo a Thummler et al (1967), las piezas fabricadas mediante un proceso de pulvimetalurgia se compactan utilizando presiones de entre 10 y 50 toneladas, relaciones de compresión de entre 1,5 y 3, y se sinterizan a temperaturas de entre 60

y 70% de la temperatura de fusión del mayor constituyente. Se utilizó una presión de 50 toneladas para garantizar la integridad de la pieza.

$$P_c = 50 \text{ toneladas}$$

Sabiendo que la temperatura de fusión del hierro es de aproximadamente 1535°C (D. Askeland, 2004):

$$T_s = Temperatura_{Fusión Fe} * 0.65 = 1535^{\circ}C * 0.65$$

$$T_s = 997,75^{\circ}C \cong 1000^{\circ}C$$

Los equipos seleccionados para los procesos de compactado y sinterizado que cumplen con los requerimientos de temperatura (T_s) y presión (P_c) necesarios, se presentan a continuación:

- Horno Barnstead/Thermoline 48000. (25°C – 1100°C)

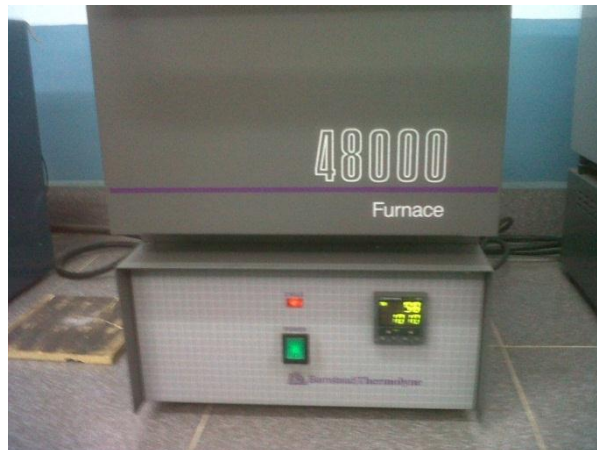


Figura 4.3.1. Horno Barnstead/Thermoline 48000.

- Prensa hidráulica Atouan. (0 Ton – 50 Ton)



Figura 4.3.2 Prensa hidráulica Atouan.

4.4. Elaboración de pieza mediante pulvimetalurgia.

Para simplificar los cálculos y dado que se está trabajando con valores aproximados de relación de compresión, se consideró la pieza como un cilindro macizo.

$$D_{pieza} = 50mm$$

$$h_{pieza} = 28mm$$

$$V_{pieza} = A_{base} * h_{pieza} = \pi * \left(\frac{D_{pieza}}{2}\right)^2 * h_{pieza} \quad \text{(Ecuación 4.3.)}$$

Donde:

D_{pieza} : Diámetro de la pieza (mm)

h_{pieza} : Altura de la pieza (mm)

A_{base} : Área de la base (mm²)

V_{pieza} : Volumen de la pieza (mm³)

V_{polvo} : Volumen de polvo a utilizar (mm³)

$$V_{pieza} = \pi * \left(\frac{50mm}{2}\right)^2 * 28mm = 54.997,87mm^3 \cong 55.000mm^3$$

Asumiendo $R_c = 2$:

$$V_{polvo} = 2 * V_{pieza} = 2 * 55.000mm^3 \quad (\text{Ecuación 4.4.})$$

$$\boxed{V_{polvo} = 110.000mm^3}$$

Una vez conocido el volumen de polvo de hierro necesario, se colocó el mismo dentro de la matriz y se procedió a la etapa de compactación:



Figura 4.4.1. Proceso de compactado.



Figura 4.4.2. Base de rodillo luego del proceso de compactado.

Una vez alcanzada la presión de compactación, se extrajo la pieza de la matriz (Anexos, Plano 4) y se colocó dentro del horno para tratamientos térmicos, a la temperatura de sinterizado, la cual para mezclas de hierro con otros metales varía entre 1,5 y 2 horas (F. Thummler et al, 1967). Para este trabajo se fijó un tiempo de sinterizado de 2 horas.



Figura 4.4.3. Proceso de sinterizado.



Figura 4.4.4. Base de rodillo luego del proceso de sinterizado.

Al salir del horno para tratamientos térmicos se obtiene la pieza terminada (Anexos, Plano N°4). Se elaboraron un total de 2 piezas utilizando el mismo procedimiento.

4.5. Estudio de la pieza mediante microscopía óptica.

Las imágenes obtenidas mediante la microscopía óptica de la pieza se presentan a continuación

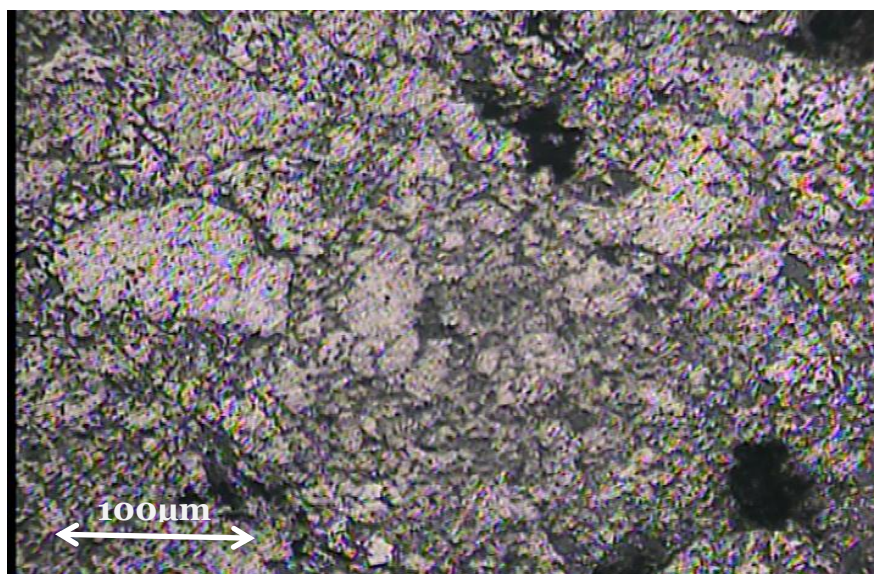


Figura 4.5.1. Microestructura de la pieza a 100x.

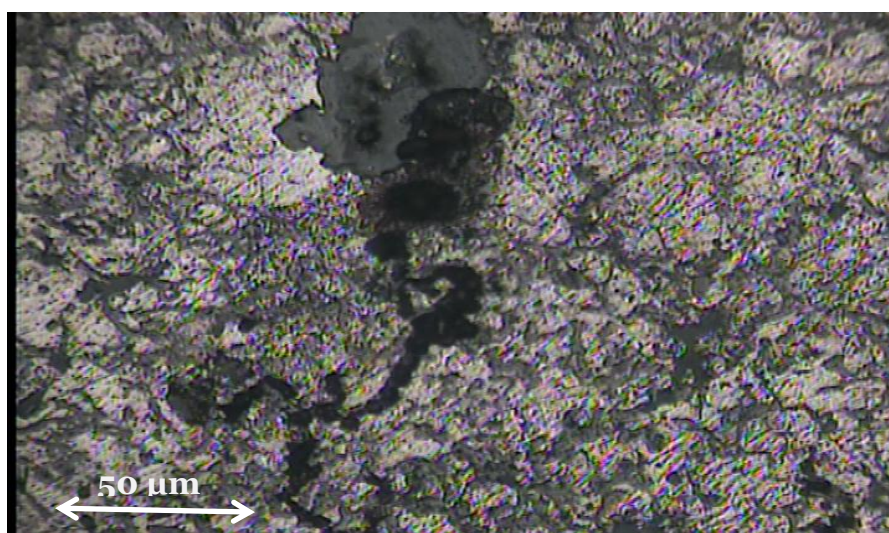


Figura 4.5.2. Microestructura de la pieza a 200x.

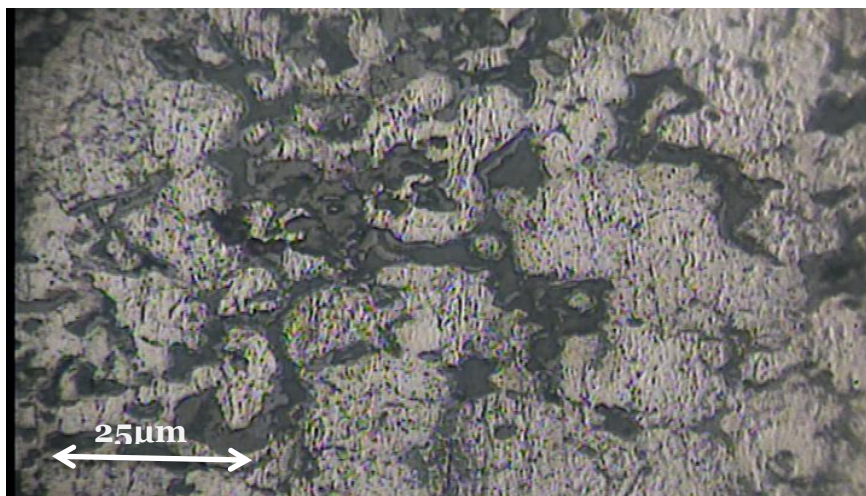


Figura 4.5.3. Microestructura de la pieza a 400x.

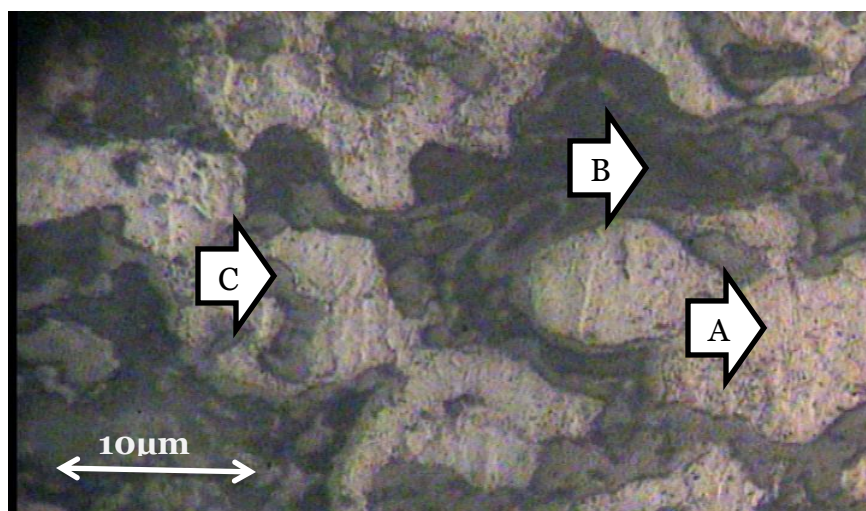


Figura 4.5.4. Microestructura de la pieza a 1000x.

Se puede observar la presencia de tres zonas diferenciadas en la microestructura que se denominaron A, B y C; en los análisis de resultados se exponen más a fondo las características de dichas zonas a fin de identificarlas.

4.6. Ensayo de microdureza Vickers.

Se llevó a cabo el ensayo de microdureza Vickers utilizando 100 gramos de carga. Se realizaron 5 mediciones en cada zona de la microestructura, cabe destacar que las microestructuras B y C resultaron ser muy pequeñas para ser medidas por separado mediante este ensayo por esta razón se consideró como una sola en las mediciones. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.1. Resultados del ensayo de microdureza Vickers.

Carga utilizada: 100gr	Zona A						Zona B/C					
D1	45,3	50	43,8	42	50	46,28	32,7	39,2	36,4	39,6	33,6	36,3
D2	45,3	50	43,8	42	50	46,28	32,7	39,2	36,4	39,6	33,6	36,3
HV	90	74	96	105	74	88	150	120	140	118	164	138
						Prom						Prom

FABRICACIÓN DE PIEZAS CON METALURGIA DE LOS POLVOS

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversos procesos de fabricación de piezas en la industria, cada uno con diferentes ventajas y limitaciones, en esta práctica se estudiará un proceso que aun cuando no es ampliamente utilizado en nuestro país, ofrece ventajas que le dan gran importancia a nivel global. Se llama metalurgia de los polvos o pulvimetalurgia, al proceso en el cual se obtienen piezas a partir de polvos (metálicos, no metálicos o una combinación de ambos) mediante la aplicación de presión y calor de forma simultánea ó sucesiva.

1.1 ETAPAS DEL PROCESO

El proceso de fabricación mediante pulvimetalurgia consta de varias etapas:

-Selección de los polvos

El proceso de selección de los polvos es el primer paso en un proceso de pulvimetalurgia, ya que dependiendo de la pieza que se requiera se podrá seleccionar un material o mezcla de materiales que mejor cumpla con los requerimientos, cabe destacar que en los procesos de pulvimetalurgia pueden existir mezclas de elementos metálicos con no metálicos, e incluso mezclas que no son posibles de obtener por otros métodos ya sea por las propiedades de los materiales involucrados o por el elevado costo de elaboración.

Otro factor de importancia al momento de hacer la selección del material es el tamaño y forma de las partículas, los cuales juegan un papel fundamental en el proceso así como también en el producto final, por ejemplo un polvo más fino dará lugar a una pieza con menos espacios vacíos en forma de porosidades, y por tanto una mayor densidad que el mismo material con un polvo más grueso; también se considera que los polvos con partículas redondeadas fluyen mejor por lo que son más recomendables para geometrías complicadas, sin embargo los polvos con partículas de formas abruptas originan piezas con mayor densidad

-Mezclado de los polvos

El mezclado de los polvos permite la homogeneización de los elementos involucrados en la mezcla y es de gran importancia para obtener una pieza con propiedades mecánicas constantes a lo largo de toda su geometría, se lleva a cabo en recipientes de diversas formas, también existen diversos sistemas de mezclados como tambor rotatorio, doble cono rotatorio, etc. Es durante esta etapa que se agregan a la mezcla elementos como el acrawax, el cual es lubricante para facilitar el llenado de la matriz de compactación y

aglutinante permitiendo que la pieza en verde (posterior al compactado) obtenga propiedades mecánicas suficientes para ser transportadas hasta el sinterizado sin sufrir daños. El tiempo de mezclado puede variar en gran medida dependiendo de los materiales, es de gran importancia, ya que de ser insuficiente no existe homogeneidad en los polvos, y por tanto tampoco en la pieza terminada; y en caso de ser excesivo se produce endurecimiento de las partículas lo que ocasiona una pieza con propiedades mecánicas pobres.

-Compactación

El proceso de compactación se lleva a cabo mediante una prensa hidráulica o mecánica, la cual ejerce presión sobre la matriz de compactación que tiene la forma de la pieza a fabricar y en la cual se han colocado previamente los polvos. Luego que los polvos se han compactado, se retiran de la matriz y se tiene lo que se conoce como pieza en “crudo” o “verde”, la cual a pesar de ser a primera impresión muy similar a la pieza deseada, posee propiedades mecánicas inferiores. La presión de compactación dependerá de los materiales involucrados en el proceso, el tamaño y forma de las partículas, la densidad deseada, la geometría de la pieza y la presencia o no de elementos lubricantes en la mezcla.

-Sinterizado de la pieza

El sinterizado se lleva a cabo para fortalecer las propiedades de la pieza obtenida en la compactación, se realiza en un horno a temperaturas menores que la de fusión, lo que permite que la microestructura de la pieza se fortalezca y adquiera finalmente las propiedades mecánicas deseadas, también es factor altamente dependiente de la composición y concentración de cada uno de los elementos dentro de la mezcla.

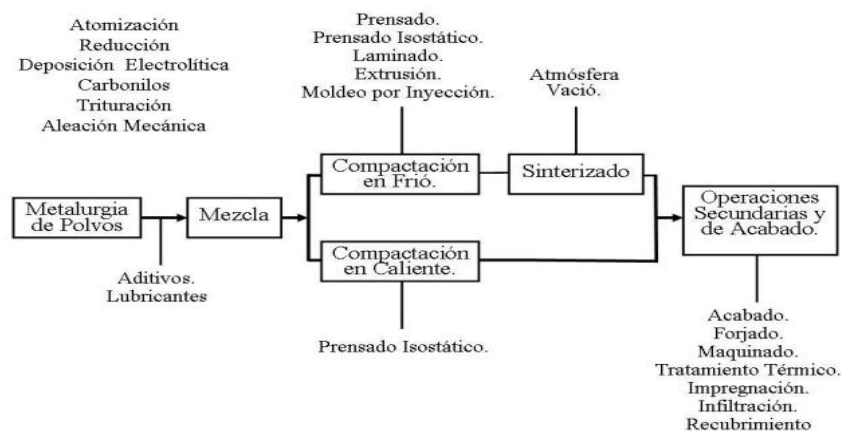


Figura 1.1. Representación de un proceso de conformación mediante metalurgia de los polvos.

1.2 VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO

-Relación de compresión:

El cociente de la densidad del polvo comprimido entre la densidad del polvo sin comprimir (aparente) da como resultado la relación de compresión. Este factor depende del tamaño y la forma de las partículas del polvo, obteniéndose relaciones de compresión más altas a medida que el tamaño de las partículas disminuye.

$$\text{Relación de Compresión} = \frac{\text{Densidad}_{\text{Polvo Comprimido}}}{\text{Densidad}_{\text{Aparente}}}$$

-Empaquetamiento y Factor de Flujo:

El empaquetamiento se refiere a la ausencia de cavidades en los polvos, es decir a un mayor empaquetamiento hay menos cavidades, lo que se traduce en una mayor densidad y mejores propiedades. El factor de flujo se define como la rapidez con la que el polvo metálico fluye por la acción de la gravedad a través de un agujero de acabado y dimensiones estandarizadas, viene dado por la fricción que existe entre las partículas del polvo y tiene una influencia directa sobre el empaquetamiento del mismo.

Idealmente se desea un empaquetamiento denso y un factor de flujo alto para obtener mejores propiedades.

-Temperatura de Sinterizado:

Generalmente la temperatura de sinterizado varía entre 60% y 90% de la temperatura de fusión del constituyente que se encuentre en mayor cantidad en el polvo y tiene influencia directa en las propiedades mecánicas finales de la pieza, ya que determina el grado de cohesión entre las moléculas de la pieza.

-Composición del Polvo:

Los elementos que conforman el polvo pueden ser muy variados, y esto tendrá influencia directa tanto en la presión de compactación requerida como en la temperatura y tiempo de sinterizado. Adicionalmente la forma y tamaño de las partículas también tienen efecto sobre las propiedades mecánicas y porosidades de la pieza.

2. OBJETIVOS

- Establecer la pulvimetalurgia como metodología experimental para la obtención de piezas metálicas.

- Identificar los elementos necesarios para elaborar una pieza mediante un proceso de pulvimetalurgia.
- Estudiar las características de los polvos.
- Obtener una pieza mediante un proceso de pulvimetalurgia.
- Estudiar la microestructura de la pieza.

3. ACTIVIDAD PRÁCTICA

3.1 Materiales

- Mezcla metálica en polvo:
95,5% Fe; 3,013% Cu; 1,02% lubricante/aglutinante (acrawax);
0,467% grafito
- Oxido de aluminio
- Nital (2%-5% ácido nítrico en alcohol metílico)
- Algodón
- Etanol
- Alúmina (Al_2O_3)

3.2 Equipos

- Prensa Hidráulica o mecánica
- Horno para tratamiento térmico
- Matriz de compactación (3 piezas)
- Balanza
- Pinzas
- Vaso de precipitados
- Vernier
- Microscopio óptico
- Lupa
- Banco de Pulido
- Microdurómetro Vickers

3.3 Procedimiento

Actividad 1: Determinar la densidad del polvo

- Utilizando la balanza y el vaso de precipitados determine la masa y volumen del polvo a utilizar para la fabricación de la pieza.
- Calcule la densidad aparente.

Actividad 2: Compactación

- Ensamble la matriz y coloque la cantidad seleccionada de polvos dentro.
- Coloque la matriz en la prensa y compacte hasta alcanzar una presión de 100 ksi.
- Retire la matriz de la prensa.

Actividad 3: Sinterizado

- Prepare la muestra para una microscopía óptica, utilizando el banco de pulido con el óxido de aluminio para el pulido y el nital como reactivo.
- Retire cuidadosamente la pieza en verde de la matriz y aplique un tratamiento de sinterizado en el horno por un período de 2 horas a 1000 °C.

Actividad 4: Evaluación de la pieza

- Verifique que la pieza cumpla con las dimensiones requeridas y no presente imperfecciones.
- Con el vernier determine el volumen de la pieza y calcule la relación de compresión obtenida.
- Determine la relación de compresión de los polvos.
- Determine la presencia de escoria.

Actividad 5: Microscopía óptica de la pieza

- Realice un desbaste a la pieza utilizando lijas 240, 380, 400 y 600.
- Proceda a hacer un pulido grueso y posteriormente uno fino utilizando alúmina.
- Utilizando nital al 2% realice un ataque a la pieza durante 25 segundos, luego aplique etanol y seque la pieza.
- Observe en el microscopio la microestructura de la pieza a un aumento de 100x, 200x, 400x y 1000x.
- Identifique las estructuras que conforman la pieza.

Actividad 6: Ensayo de microdureza Vickers

- Coloque la pieza en el microdurómetro Vickers.
- Identifique las fases presentes y calibre el equipo a una carga de 100gr.
- Realice el ensayo de dureza Vickers en cada fase utilizando una carga de 100gr. por un tiempo de 5 segundos. Tome 5 mediciones para considerar posibles variaciones debido a la compactación irregular.

4. REPORTE

El reporte debe contener:

- Hoja de datos obtenida en el laboratorio firmada por el profesor.
- Análisis de resultados.
- Conclusiones.
- Referencias bibliográficas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fujita T., Ogawa A., Ouchi C., Tajima H.. Microstructure and properties of titanium alloy produced in the newly developed blended elemental powder metallurgy process. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 213, Issues 1-2,(1996), pag.148-1
- Kalpakjian S., Schmid S., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.
- Schrader G., Singer M., *Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros*. México, 1988.
- Torres D., León C., *Fabricación de Esponjas Metálicas de Aluminio por Pulvimetalurgia*, México, 2006.
- Williams J.J., Deng X., Chawla N.. *Effect of residual surface stress on the fatigue behavior of a low-alloy powder metallurgy steel*. *International Journal of Fatigue*, Volume 29, Issues 9-11, September-November 2007, Pages 1978-1984

4.8. Montaje del rodillo.

Para la elaboración del rodillo se requirió de las siguientes partes:

- 2 bases de rodillos (una elaborada mediante pulvimetalurgia y la otra polipropileno)
- 1 varilla de acero plata de 4mm de diámetro
- 2 bocinas de bronce
- 1 tubo de PVC
- 2 rodamientos 6mm x 16mm x 5mm

El ensamblaje del sistema consistió en fijar las bases a la varilla mediante bocinas y rodamientos, las cuales a su vez mantienen en posición al tubo, permitiendo que este gire libremente y funcione como un rodillo (Anexos, Plano N°5).



Figura 4.8.1. Rodillo ensamblado.

4.9. Elaboración de la animación del proceso.

Se realizó una animación en Flash, la cual representa de forma didáctica las etapas de mezcla de los polvos, compactación y sinterizado, así como también explica la diferencia de propiedades mecánicas entre una pieza en verde y una pieza terminada.

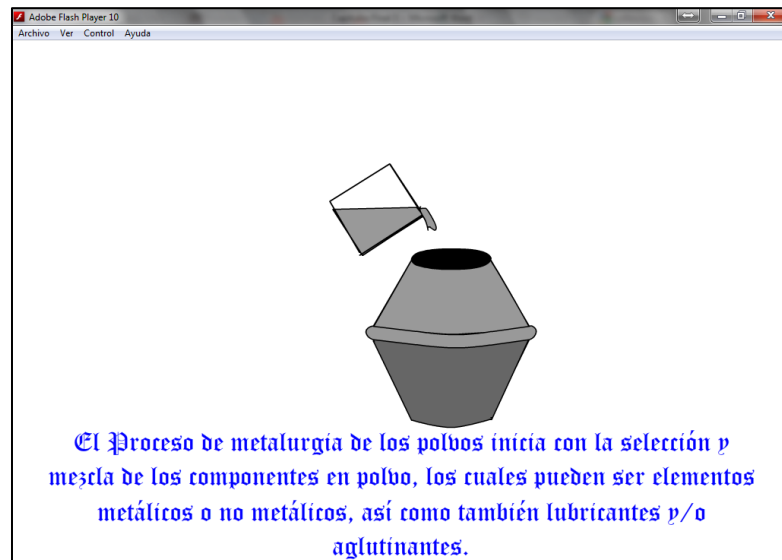


Figura 4.9.1. Animación: etapa de mezclado de los polvos.



Figura 4.9.2. Animación: etapa de compactación.



Figura 4.9.1. Animación: etapa de sinterizado.

CAPÍTULO 5

Análisis de Resultados

En este capítulo se estudiarán los aspectos relevantes no sólo del proceso de pulvimetalurgia, sino también de la matriz de compactación y de la pieza elaborada.

5.1. Selección de las variables de estudio

La razón de la selección de las variables de estudio se realizó considerando las variables primordiales para realizar y controlar un proceso de pulvimetalurgia:

En la etapa de compresión se puede controlar el tipo de compresión (uniaxial, biaxial o isostática) y la presión de compactación. El diseño de la matriz y el tipo de pieza limita el poder estudiar diferentes tipos de compresión por lo que sólo se tomó en cuenta la presión de compactación. Por otra parte la relación de compresión depende de la composición de los polvos así como también de la presión de compactación.

En la etapa de sinterizado es necesario establecer el tiempo y temperatura de sinterizado ya que son los parámetros principales por los que se rige el proceso, mientras que otros factores como la presencia de gases inertes es opcional.

5.2. Funcionamiento de la matriz de compactación.

La matriz diseñada se desempeñó correctamente durante la etapa de compactación; no hubo rupturas ni fallas en la misma, por lo que se comprueba que diseño fue adecuado, sin embargo por la naturaleza del material hubo formación de óxido entre las 3 partes de la matriz, lo que ocasionó que regularmente las piezas se atascan y fue necesario aplicarle regularmente un desbaste con lija fina para facilitar el montaje y desmontaje de la matriz.

5.3. Selección de equipos.

Aun cuando el horno y la prensa utilizada para fabricar la pieza fueron adecuados, estaban muy cercanos a los valores máximos de trabajo de temperatura y presión respectivamente, lo que pudo influyó en que la pieza no se compactó tanto como pudiera haberlo hecho en una prensa de mayor capacidad o la ausencia de cascarilla en la misma, de haberse utilizado un sinterizado con gas inerte.

5.4. Estudio de la pieza de pulvimetalurgia.

Fue posible observar que la pieza en verde al estar fuera de la matriz se oxidó rápidamente y sus bordes no quedaron completamente compactados, con tendencia a desmoronarse fácilmente, lo cual coincide con la bibliografía (Annual Book of ASTM Standards), ya que en dichas zonas no se genera presión y es por esta razón que no se recomienda aplicar procesos de pulvimetalurgia a piezas con geometrías complicadas.

Es importante destacar que al final del sinterizado la pieza estaba recubierta de escoria, debido a las altas temperaturas a la que fue sometida, sin embargo es posible utilizar la adición de gases inertes durante el sinterizado para reducir la presencia de

la misma si es necesario (Klar et al, 2007). Es relevante señalar que la escoria protegió en gran medida a la pieza impidiendo la mayor oxidación de la misma, en comparación con la pieza en verde.

Es importante señalar que la altura de la pieza final fue muy similar a la estimada cuando se realizaron los cálculos del volumen del polvo necesario en la etapa de compactación, esto significa que la relación de compresión asumida $R_c = 2$ fue muy cercana a la real (la cual fue ligeramente mayor a 2), es importante recalcar que la relación de compresión se ve afectada por la presión a la cual se encuentra sometido el polvo durante la compactación (Randall, 1988).

5.5. Estudio de la pieza mediante microscopía óptica y ensayo de microdureza Vickers.

Haciendo una comparación con las microestructuras mostradas en el libro anual de estándares de la ASTM, se observa que la microestructura de la pieza consiste principalmente en una matriz ferrítica (zona A) y poros donde se encontraba la mayoría del cobre previamente al sinterizado (zonas B/C). El promedio de microdureza Vickers para la zona A es de 88,02 HV muy cercano a lo que se considera la dureza para la ferrita (95 HV) mientras que en las zonas B/C (la mezcla de ferrita con cobre) es de 138,84 HV, es decir ligeramente más dura que la ferrita pura, sin embargo es importante señalar que las medidas para esta zona tuvieron una gran dispersión, esto debido a la falta de homogeneidad en la misma dando como resultado variaciones de dureza dentro de la misma zona; debido al reducido tamaño de estas estructuras no fue posible realizar un ensayo de microdureza independiente para cada una de ellas.

La ausencia casi total de estructuras perlíticas es indicativo que la temperatura de sinterizado no fue suficiente para que el carbono del grafito se combinara con el hierro, otra evidencia de baja temperatura de sinterizado es el bajo nivel de esferoidización de los poros, los cuales presentan una forma angular.

5.6. Elaboración de la guía de actividades.

La guía de actividades consiste en 2 partes principales:

Una parte teórica la cual cumple el rol de ser una introducción a la metalurgia de los polvos, donde se explican las etapas del proceso y variables que lo afectan.

Una parte práctica, la cual consta de una serie de actividades para ser realizadas en el laboratorio utilizando los conocimientos de la parte teórica y los materiales y equipos que se disponen.

Finalmente el estudiante deberá realizar un reporte donde se recopilen los resultados de las actividades realizadas y sus conclusiones sobre las mismas.

Cabe destacar que la práctica fue diseñada en función de los polvos utilizados durante este trabajo, en caso de utilizar otras composiciones se hace necesario ajustar los factores involucrados, (es decir, presión de compactación temperatura y tiempo de sinterizado, reactivo, tiempo de ataque, entre otros) debido a que no necesariamente se obtendrán los resultados deseados de no realizarse dichos ajustes, para esto es necesario referirse a la norma ASM a fin de conseguir los parámetros más adecuados para cada mezcla de polvo.

Como químico de ataque se utilizó nital al 2% por un tiempo de 10 a 15 segundos, debido a que se trata de una aleación de acero al carbono con pequeñas cantidades de otros constituyentes, este permite observar los límites de borde de

grano en la ferrita; la probeta es luego lavada en agua, enjuagada en alcohol y posteriormente secada mediante una corriente de aire fría, ya que de ser caliente y existir porosidades abiertas puede causar la evaporación de agua o alcohol atrapada en la lente del microscopio. Se recomienda que la aplicación del nital sea de 6 a 8 segundos y mediante inmersión, ya que la aplicación por otros medios puede dejar marcas en la microestructura.

5.7. Montaje del rodillo.

El montaje del rodillo se llevó a cabo utilizando materiales de fácil adquisición para poder demostrar la funcionalidad de la pieza elaborada como lo son tubos de PVC, varillas metálicas y piezas de polipropileno, los cuales posiblemente no sean los más adecuados para un rodillo funcional, sin embargo se debe considerar que este trabajo tiene un objetivo didáctico y el rodillo no será sometido a esfuerzos de trabajo. Debido a la poca cantidad de polvo metálico disponible para la elaboración de piezas, se decidió utilizar sólo una de las piezas realizadas mediante pulvimetalurgia para el ensamblaje del rodillo y utilizar la otra para realizar observaciones, análisis y ensayos.

5.8. Elaboración de la animación del proceso.

La animación ilustra de una forma sencilla las etapas de compactación y sinterizado, al mismo tiempo que resalta la importancia y necesidad de estas, así como las diferencias de la pieza final al modificar las variables de estudio.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones que puedan servir de guía para futuros proyectos.

6.1. Conclusiones.

- Fue posible controlar un proceso de pulvimetalurgia mediante la determinación de los parámetros básicos como son presión de compactación, relación de compresión, temperatura de sinterizado y tiempo de sinterizado.
- Se realizó el diseño y construcción de una matriz de compactación que permite la aplicación de presión a los polvos durante la etapa de compactado, así como también define la geometría y volumen de la pieza deseada.
- Basado en la observación de la pieza posterior al compactado y su facilidad para desmoronarse, se concluye que las piezas en verde tienen propiedades mecánicas muy pobres, por lo que deben ser sinterizadas a la brevedad posible para evitar daños en la misma.

- Fue posible llevar a cabo un proceso de pulvimetalurgia exitoso utilizando una prensa, la matriz de compactación diseñada, un horno para tratamientos térmicos y los polvos suministrados.
- Al diseñar una matriz para procesos de pulvimetalurgia mediante ecuaciones de diseño para recipientes a presión hidrostáticos se incurre en un sobre diseño, ya que el comportamiento de los polvos a presión es mucho más manejable que el de fluidos convencionales.
- Se redactó una guía de actividades que permite resumir los aspectos básicos de un proceso de pulvimetalurgia y lo plantea de una forma sencilla que permite al estudiante después de una breve lectura, la realización de una pieza utilizando dicho proceso.

6.2. Recomendaciones.

- Realizar ensayos de dureza e impacto a piezas elaboradas mediante pulvimetalurgia antes y después del sinterizado a fin de cuantificar la ganancia de propiedades mecánicas que ofrece el sinterizado.
- Realizar piezas iguales utilizando diferentes polvos con diferentes mezclas, aglutinantes tamaños y formas de grano, a fin de determinar la relación entre estos elementos y la calidad de la pieza final.
- Conducir un ensayo de la microestructura de la pieza antes y después del sinterizado y hacer comparaciones.
- Variar la presión de compactación a fin de obtener piezas con densidades variables y posteriormente estudiar su estructura y características.
- Variar la velocidad de enfriamiento en el horno posterior al sinterizado y estudiar el impacto en las propiedades.

- Poner en funcionamiento el rodillo con la pieza elaborada mediante pulvimetalurgia y estudiar posibles fallas a fin de comparar resultados con piezas elaboradas a partir de un material macizo.
- Implementar la práctica de laboratorio como parte del pensum de estudio de Materiales y Procesos de Fabricación.
- Realizar microscopías a las zonas internas de la pieza, para observar el impacto que tiene la falta de homogeneidad de presión durante la compactación en la estructura de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson O., Larsson M.. *Means to improve machinability of sintered steels* Höganäs AB, S-26383 Höganäs, Sweden, 2009.
- Askeland D., Phule P., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. International Thomson Editores, S.A. México, 2004
- Avallone E., Baumeister T., *Manual del Ingeniero Mecánico*. Mc Graw Hill. 1999.
- Chawla N., Murphy T. F., Narasimhan K. S., Koopman M., Chawla K. K.. *Axial fatigue behavior of binder-treated versus diffusion alloyed powder metallurgy steels* Materials Science and Engineering A, Volume 308, Issues 1-2, (2001), Pages180-188.
- De Garmo E.P. et al, *Materiales y Procesos de Fabricación*. Editorial Reverse S.A. Novena Edición. ISBN 84-291-4822-1. 2003, España.
- Doyle L., Keyser C., Leach J., Scharader G., Singer M., *Materiales y procesos de Manufactura para Ingenieros*. Tercera Edición. Prentice Hall Hispanoamerica. México, 1988.
- Fujita T., Ogawa A., Ouchi C., Tajima H.. *Microstructure and properties of titanium alloy produced in the newly developed blended elemental powder*

metallurgy process. Materials Science and Engineering: A, Volume 213, Issues 1-2,(1996),Pages148-153

- Groover P., *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Cuarta Edición, México, 2010.
- Kalpakjian S., Schmid S., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta Edición. Pearson Educación, México, 2008.
- Klar E., Samal P., *Powder metallurgy stainless steels: processing, microstructures, and properties*. ASM International. 2007.
- Mårs O., Millot S., Samal P.. *Reduced sintering temperature creates new opportunities for PM Stainless Steel Exhaust components*. Höganäs, Sweden, 2009.
- Megyesy E., *Pressure Vessel Handbook*. Tulsa 1992.
- Morral F. R., Jimeno E., Molera P. *Metalurgia General*. Editorial Reverté, España 1985.
- Schrader G., Singer M., *Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros*. México, 1988.
- Thummler F. and Thomma, W. *"The Sintering Process," Metallurgical Reviews No. 115*. 1967.
- Torres D., León C., *Fabricación de Esponjas Metálicas de Aluminio por Pulvimetalurgia*, México, 2006.
- Williams J.J., Deng X., Chawla N.. *Effect of residual surface stress on the fatigue behavior of a low-alloy powder metallurgy steel*. International Journal of Fatigue, Volume 29, Issues 9-11, September-November 2007, Pages 1978-1984
- ASTM B 328, Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.05, ASTM, Philadelphia, 1984, p 162-163.

- *Copper Development Association* http://www.copper.org/resources/properties/129_6/consolidation.html
- *Ferrum Aceros C.A. - Catálogo 2005* <http://www.ferrum-ca.com>
- *International Powder Metallurgy Directory* <http://www.ipmd.net/articles/whatisPM>
- *Permeable Sintered Metal Materials--Determination of Density, Open Porosity and Oil Content*, ISO 2738, International Organization for Standardization, available from American National Standards Institute, New York.
- *Processing of Powder Metals* http://www.sze.hu/~czinege/NNS/E3_Powder%20metallurgy.pdf

ANEXOS
