

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



"Efecto de las moliendas en la densidad y dureza de SS 17-4, en un proceso de inyección de metal."

Realizado por:

Valentín Félix Vega

Director de Tesis:

Dr. Alvaro González Ángeles

Mexicali, Baja California

4 de Marzo de 2019

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ABSTRACT.....	viii
Hipótesis:	ix
Objetivos:	x
Justificación:	xi
Planteamiento:	xi
Metodología:	xii
Capítulo 1. Generalidades & Procesos de Produccion de Polvos Metalicos.....	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Historia del Proceso MIM.	2
1.4 Ventajas claves del proceso MIM	10
1.5 Sectores en los que compite proceso MIM	11
1.6 Producción de polvos metálicos.....	12
1.6.1 Maquinado	27
1.6.2 Molienda	27
1.6.3 Atomizacion de Gas.....	27
1.6.4 Atomizacion de liquidos y agua	27
1.6.5 Atomizacion centrifuga	27
1.6.6 Atomizacion de plasma	27
1.7 Tamaño y forma de la particula.....	12
1.8 Contenido de carbono.....	12
1.9 Importancia en la selección del aglutinante	12
1.10 Efecto del oxigeno.....	12
1.6 Características de la materia prima	12
Capítulo 2. Procesos que conforman la Tecnología MIM.	22
2.1 Mezcla y Peletizado.	22
2.2 Moldeo por inyección de metal.	24
2.2.1 Propiedades Reológicas	27
2.3 Construcción de moldes.....	35

2.3.1 Cavidad.....	36
2.3.2 Línea de partición.	37
2.3.3 Sistema de alimentación.	38
2.3.4 Expulsores	41
2.4 Desligado (Debinded):	42
2.4.1 Eliminación del ligante	49
2.4.2 Degradación térmica.....	49
2.4.3 “Wick debinding” o extracción capilar.	50
2.4.4 Extracción con disolventes.	51
2.4.5 Eliminación supercrítica.	51
2.4.6 Eliminación catalítica.	51
2.5 Sinterizado:.....	53
2.6 Post procesado:.....	61
2.7 Capacidades del proceso MIM.....	62
Capítulo 3. Desarrollo, resultados experimentales y Conclusiones.	64
3.1 Diseño y construcción de prensa neumática	64
3.2 Molde:	64
3.3 Proceso de moldeo	65
3.4 Proceso de Desligado	67
3.5 Proceso de sinterizado.....	69
3.6 Caracterización morfológica (SEM) de muestras de 0, 5, 9 y 15 moliendas	71
3.7 Analisis TGA.....	72
3.8 Prueba de Dureza a diferentes moliendas	72
3.9 Analisis Economico.....	72
3.10 Conclusion.....	72
3.11 Recomendaciones para estudios futuros.	78
3.12 Anexos.....	72
3.13 Referencia bibliográfica	99

TABLA DE ANEXOS.

Anexo A: Prensa Neumatica.....	81
Anexo B: Cavidad Superior.....	81
Anexo C: Cavidad Inferior.....	81
Anexo D: Peso Promedio de Partes Moldeadas.....	82
Anexo E: Peso de Partes Desligadas.....	82
Anexo F: Perdida de Peso Muestras Desligadas vs Moldeadas.....	83
Anexo G: Porcentaje de Contraccion de Piezas Desligadas	83
Anexo H: Peso de Partes Sinterizadas	84
Anexo I: Perdida de Peso Muestras Desligadas VS Moldeadas	84
Anexo J: Comparacion de Volumen entre Muestras Moldeadas VS Sinterizadas	85
Anexo K: Porcentaje de Contraccion Piezas Sinterizadas.....	85
Anexo L: Comparacion de Densidades despues de Sinterizado.....	86
Anexo M: Comparacion de Densidades de Material Virgen	86
Anexo N: Comparacion de Densidad de Material 5 Moliendas	87
Anexo O: Comparacion de Densidad de Material 9 Moliendas	87
Anexo P: Comparacion de Densidad de Material 15 Moliendas.....	88
Anexo Q: Pieza Moldeada VS Pieza Sinterizada	88
Anexo R: SEM Material Virgen	89
Anexo S: SEM Material con 5 Moliendas	90
Anexo T: SEM Material con 9 Moliendas.....	91
Anexo U: SEM Material con 9 Moliendas	92
Anexo V: Composicion Quimica de las Moliendas.....	93
Anexo W: Composicion Quimica de Material Virgen	93
Anexo X: Composicion Quimica de Material 5 Moliendas.....	94
Anexo Y: Composicion Quimica de Material 9 Moliendas.....	94
Anexo Z: Composicion Quimica de Material 15 Moliendas.....	95
Anexo AA: Analisis TGA Material Virgen.....	95
Anexo AB: Analisis TGA Material 5 Moliendas	96
Anexo AC: Analisis TGA Material 9 Moliendas	96
Anexo AD: Analissi TGA Material 15 Moliendas	97
Anexo AF: Comparacion perdida de Peso Real VS Analisis TGA	97
Anexo AG: Prueba de Dureza.....	98
Anexo AH: Dureza Material Virgen.....	98
Anexo AI: Dureza Material 5 Moliendas.....	99
Anexo AJ: Dureza Material 9 Moliendas	99
Anexo AK: Dureza Material 15 Moliendas	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. dado de compactación.....	5
Figura 2. forjado de polvos.....	6
Figura 3. prensado en frío isostático.....	8
Figura 4. prensado isostático en caliente	9
Figura 5. compactación por pulverización	9
Figure 6. PASOS DEL PROCESO MIM.....	11
Figure 7. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MIM.....	12
Figure 8. METALES MÁS UTILIZADOS EN LA TECNOLOGÍA MIM.....	12
Figure 9. PRODUCCIÓN DE POLVO MEDIANTE ATOMIZACIÓN POR GAS INERTE.....	20
Figure 10. Variación de masa con tiempo de sostenimiento.....	34
Figure 11. Variación de masa con temperatura del molde.....	34
Figure 12. Variación de masa con temperatura de fusión.....	34
Figure 13. Variación de costo por pieza en funcion del número de cavidades	37
Figure 14. Bebedero y corredores	38
Figure 15. Tipos de sección de los corredores en proceso MIM	39
Figure 16. Tipos de sistema de alimentación en los moldes	39
Figure 17. Solución para el venteo.....	40
Figure 18. Sistema de expulsión	42
Figure 19. Densidad frente a fricción de polvo	43
Figure 20. Proceso de eliminación térmica del ligante	49
Figure 21. Ciclo térmico de desligado y sinterización.....	60
Figure 26. Maquina Supercritica	68
Figure 30. Horno de Sinterizado	70
Figure 52. Lijadora y pulidora	74
Figure 53. Probador de dureza	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de diversas técnicas para la producción de polvos.	19
Table 2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS EN MIM	62
Table 3. LÍMITES DIMENSIONALES Y DE TOLERANCIAS EN MIM	63
Table 4. Parametros de Moldeo	66
Table 5. Dureza	75

RESUMEN

Se evaluaron las propiedades físico-mecánicas (pérdida de peso, dureza, densidad del material, TGA, SEM y cuestiones dimensionales) de un acero inoxidable 17-4 procesado bajo la tecnología MIM (Metal Injection Molding) con el objetivo de evaluar si este material a diferentes moliendas pierde sus propiedades mecánicas y reológicas (Dureza y Densidad). Se tomó como punto de partida el material virgen y las moliendas (5, 9 y 15). Dentro de la fase de moldeo no se tuvo ningún problema para moldear las partes, todas las moliendas se trabajaron a los mismos parámetros. En la etapa de desligado la mayor pérdida de peso se tuvo en la muestra de la molienda 5, con un 4% de pérdida de cera, mientras que la molienda 15 solo perdió un 1%, no se presentó distorsión en las muestras. Durante la fase de sinterizado, se obtuvo una contracción máxima de 40% de las muestras contra las partes moldeadas, esto se presentó en las muestras de 5 moliendas y la menor contracción se tuvo en la molienda 15 con un 36%. Las durezas de todas las muestras estuvieron por arriba del valor mínimo establecido que fue 30 RHC. En las gráficas TGA se observaron transformaciones en el material debido al calentamiento de la mezcla y la pérdida de peso. En los análisis SEM se observó que el tamaño del grano de los polvos metálicos en su mayoría es de 10 a 20 micrones de forma esférica, al igual que formas irregulares, secciones donde el aglutinante se va perdiendo. En conclusión, las moliendas del material no afectan por sí sola a las propiedades mecánicas del material, pero si dependen de factores en los procesos, tales como temperatura de moldeo y presión de inyección para lograr una compactación efectiva de las partes. También es importante decir que el tiempo de sinterizado es clave para lograr la densidad deseada en el material y así no variar las propiedades mecánicas. La pérdida de aglutinante hace que las propiedades reológicas del material se vean afectadas, ya que el aglutinante es el medio de transporte para poder compactar el material. Se recomienda solo moler el material hasta 15 veces, ya que después de este punto con esta mezcla no hay pérdida de peso del aglutinante.

ABSTRACT

The physical-mechanical properties (loss of weight, hardness, material density, TGA, SEM and dimensional issues) of a 17-4 stainless steel processed under MIM (Metal Injection Molding) technology were evaluated with the aim of To evaluate if this material to different grindings loses its mechanical and rheological properties, virgin material and grinds (5, 9 and 15) were taken as a starting point. Within the molding phase there was no problem in shaping the parts, all the grindings were worked on the same parameters, in the debinding stage the biggest weight loss was in the grind sample 5 with 4% loss of wax and grind sample 15 only lost 1% no distortion was present in the samples. During the sintering phase, a maximum shrinkage of 40% of the samples against the molded parts was obtained, this was presented in the samples of 5 grinds and the smallest shrinkage was obtained in grinding 15 with 36%. Hardness all samples were above the minimum value established that was 30 RHC. In the TGA graphs, the transformations in the material were observed due to the heating of the mixture and the loss of weight. In the SEM analyzes, the grain size of the metallic powders was mostly observed, from 10 to 20 microns in a spherical shape, as well as irregular shapes, sections where the binder is lost. In conclusion grindings of the material do not affect the mechanical properties of the material alone but they depend on factors in the processes such as molding temperature and injection pressure to achieve an effective compaction of the parts, it is also important to say that the time of sintering is key to achieving the desired density in the material so as not to change the mechanical properties, the loss of binder causes that the rheological properties of the material are affected by the loss of the binder since it is the means of transport to be able to compact the material. Recommends only grinding the material up to 15 times since after this point with this mixture there is no loss of material.

Hipótesis:

Una mezcla acero inoxidable 17-4 para un proceso de inyección de metal “MIM” puede ser molido y utilizado hasta 15 veces sin afectar la densidad y dureza de la pieza final.

Objetivos:

Objetivo general:

1. Caracterizar las moliendas 0,5,9 y 15 para encontrar el efecto en la densidad y dureza de las moliendas en un acero inoxidable 17-4. Para demostrar que las moliendas no afectan las propiedades.

Objetivos específicos:

1. Encontrar la tasa de perdida de peso del material a 5, 9 y 15 molidas
2. Verificar que las propiedades de las moliendas cumplan con las especificaciones “Mínimo 7.96 gr/cm³ de densidad y 30 RHC de Dureza”
3. Caracterizar las muestras bajo el análisis TGA y SEM.

Todos estos objetivos tienen como finalidad encontrar si este material puede mantener los valores de densidad y dureza minimos hasta una molienda de 15.

Justificación:

Durante un proceso de inyección de moldeo de metal “MIM”, al menos el 80% del material inyectado se desperdicia en las correderas y el bebedero después de la molienda 10, ocasionando un gran desperdicio de dinero ya que el material es caro. En el material estudiado se determinó caracterizar el material hasta un máximo de 15. Todo material que no se recicla se manda al desperdicio, ocasionando pérdidas económicas. De ahí la importancia de emprender un análisis para caracterizar el aglutinante compuesto que sirve de medio de transporte al polvo para ser compactado en el molde. El polvo metálico no tendría que ser tirado al desperdicio, ya que el polvo metálico no sufre ningún cambio durante la fase de moldeo.

También es importante mencionar que en la región no existe una investigación como esta, debido a que este proceso es relativamente nuevo en esta región y es necesario desarrollar el conocimiento sobre el tema, para que en un futuro existan las bases y más personas se preparen para atender las necesidades de las empresas que se establezcan en la región.

Planteamiento:

La degradación del aglutinante “Cera Parafina, Polímero Polipropileno y Ácido Esteárico” producen una disminución en el punto de fluidez del material así como en su comportamiento reológico, al disminuir la cantidad de aglutinante en la mezcla debido a la degradación con cada repetición del proceso de inyección se necesita mayor temperatura y presión de inyección para llenar la cavidad esto puede ocasionar problemas de calidad en las piezas tales como distorsión de las piezas y compactación no homogénea sin hablar de la degradación del aglutinante por las altas temperaturas esto a su vez se puede traducir en problemas de densidad del material después del proceso de sinterizado. La intención de reformular el material para tener una cantidad óptima de aglutinante en la mezcla es, evitar el incremento de los parámetros de inyección mencionado “Presión y temperatura de inyección” para prevenir problemas dimensionales de las piezas al final del proceso. Éste análisis se centrará en caracterizar las diferentes moliendas para evaluar si hay un impacto en la densidad y dureza de la pieza final después de sinterizado.

Metodología:

Para el presente trabajo se utilizarán diferentes metodologías estadísticas para la obtención, análisis e interpretación de los resultados. Las metodologías utilizadas serán DOE (Design of experiment). Ésta metodología nos ayudará a plantear un método para enfocarnos en los parámetros que realmente afectan la calidad de nuestras piezas. Otro método será Análisis de correlación, el cual es de gran importancia para analizar cómo se relacionan entre sí los parámetros del proceso y cómo se relacionan entre sí, entender que pasa si uno varía con respecto a otro. Otro análisis serán TG, SEM. Todas estas metodologías tienen la intención de ayudar a caracterizar las muestras.

Capítulo 1. Generalidades & Procesos de Produccion de Polvos Metalicos

1.1 Introducción.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la caracterización del aglutinante para una mezcla de material para un proceso de inyección de metal “MIM” hasta 15 moliendas, así como asegurar que las características del producto final se verán afectadas “densidad, dureza”, algunas pruebas serán necesarias durante el proceso de MIM para determinar que no hay efectos en sus propiedades, tales procesos son “Moldeo, Desligado y Sinterizado”. En el moldeo nos enfocaremos solo en la presión de inyección, tiempo de sostenimiento y temperatura de inyección, en el desligado en el tiempo y flujo de CO₂, el proceso de sinterizado no se tocará ya que es un proceso muy caro y no cuenta con la disponibilidad se utilizarán los parámetros nominales del proceso. Como primera fase del presente trabajo, se dará enfoque a los antecedentes históricos de esta tecnología para poder entender los orígenes y los motivos que llevaron a su desarrollo y su más importante utilidad hoy en día. Se hará mención de los organismos y normas que rigen la producción y los avances tecnológicos de esta tecnología, así como los países líderes y pioneros en esta tecnología, las aplicaciones más importantes en los diferentes ramos de la vida cotidiana y como han ayudado a las empresas a reducir costos en mano de obra y desperdicios debido a proceso.

Para el desarrollo de la investigación se utilizarán diferentes metodologías para la obtención de datos y su procesamiento tales como DOE (Design of experiment), esto con el objetivo de analizar estadísticamente como se relacionan los parámetros entre sí y su influencia en la densidad de la pieza y la molienda. El proceso MIM es un proceso de conformado utilizado para piezas geométricamente complicadas sin procesos posteriores, debido a esto el análisis e interpretación correcta de sus variables puede ayudar al entendimiento de sus fenómenos.

1.2 Historia del Proceso MIM.

Como tecnología MIM (Moldeo por Inyección de Metal) ha estado presente por algún tiempo. Desde sus inicios, en los años 20, fue aplicada a la producción de piezas cerámicas en especial a los cuerpos de las bujías. Pero en los años 50, muchos componentes cerámicos y carburos fueron fabricados utilizando epóxidos, ceras o celulosas pero los volúmenes de producción fueron pequeños. La mayor atención a este proceso fue dada en 1979 cuando dos premios de diseño fueron dados a productos de metal. Un componente fue un tornillo utilizado como sello en un avión, el segundo premio fue dado para una aleación para una cámara de propulsión de un motor de un cohete. En 1980 el mayor progreso fue hecho en el formado de cerámica en componentes para motor. Como parte de la evolución, el proceso tiene muchas variantes, reflejando diferentes combinaciones de polvos, aglutinantes, técnicas de moldeo, rutas de desligado y hornos de sinterizado.[1]

Desde hace décadas, el Moldeo por Inyección de Metal (MIM) está presente en la industria como proceso de conformado para la producción masiva de piezas. Con este proceso, novedoso y competitivo, se pueden obtener piezas metálicas y/o cerámicas de alta complejidad de forma y gran resistencia mecánica con unos costos moderados. Estados Unidos, Japón, Alemania, Italia y Francia, son los países que lideran el mercado de las piezas fabricadas mediante Moldeo por Inyección de Metal.[1]

La tecnología de Moldeo por Inyección de Metal se desarrolló para aprovechar las ventajas del conformado por moldeo mediante inyección y el conformado por sinterizado de polvos metálicos y/o cerámicos. Básicamente se trata de un proceso de sinterizado, en el que la pieza “en verde” se obtiene inyectando una mezcla de polvo metálico y/o cerámico y de ligante en el interior de un molde, que puede tener una geometría compleja. El proceso de sinterizado se utiliza para fabricar piezas a partir de material en forma de polvos. Hay metales que no se pueden conformar más que con el sinterizado debido a que su punto de fusión es muy alto. En el sinterizado convencional, la compactación es el procedimiento de dar forma a la pieza antes de obtener las propiedades finales mediante el sinterizado.

Las formas obtenidas por compactación, sin embargo, no son muy complicadas puesto que la compactación es uniaxial. MIM realiza un sinterizado, pero con formas de pieza “en verde” más complejas. En el conformado por inyección, el material en estado líquido fluye bajo presión para llenar la cavidad de un molde, que puede presentar una alta complejidad. Hay diversos procesos de fabricación en los que un metal llena la cavidad de un molde para fabricar una pieza: fundición en coquillas, fundición por inyección, fundición prensada, fundición a baja presión, etc. En estos procesos, en el momento de la inyección el metal se encuentra en estado líquido y debido a la temperatura elevada tiene una fluidez suficiente para llenar la cavidad. En MIM el material metálico o cerámico está en forma de polvo y en la primera etapa se debe conseguir que éste llene una cavidad compleja. Las partículas de polvo se caracterizan por una rugosidad superficial que resulta en alta fricción entre partículas, que presentan por tanto una fluidez muy baja. Por consiguiente, el polvo solo puede fluir si es mezclado con otro material, con una fluidez alta que permita que la mezcla de ambos, alcance una fluidez suficiente para ser inyectada. Una solución lógica es el uso de termoplásticos puesto que con el aumento de temperatura y tasa de cizallado aumentan considerablemente su fluidez, según efecto conocido como “shear thinning”. El proceso de MIM combina una cantidad de polímero (fracción líquida) con el polvo metálico (fracción sólida), formando así la mezcla que puede ser conformada por inyección. Tras la inyección, el polímero se extrae con el proceso conocido como desligado (debinding) de forma que la pieza final esté compuesta básicamente por polvo metálico/cerámico.

Las técnicas de pulvimetalurgia, en específico, el proceso de moldeo por inyección de metal (MIM), se han empleado para la fabricación de estructuras porosas controladas utilizadas para implantes quirúrgicos dentales y ortopédicos. El implante de metal poroso permite el crecimiento de tejido óseo en la superficie del implante, lo que mejora la fijación y la recuperación.[2]

Acero inoxidable originalmente descubierto en 1904 por Leon Guillet. Sin embargo, fue Strauss quien comenzó a aplicar acero inoxidable para la cirugía en 1926. Descubrió acero inoxidable del tipo 316 (que contiene 18% en peso de Cr y ~8% en peso de acero inoxidable Ni que contenía 2-4% de molibdeno) con muy bajas emisiones de carbono, fueron profundamente adecuado como un implante y dispositivos quirúrgicos debido a su excelente resistencia a la corrosión y relativamente más fuerte que el acero. La resistencia a la corrosión de

las aleaciones de acero inoxidable depende en gran medida de la formación de una delgada capa de óxido de superficie pasiva que contiene Cr, Mo, por lo que el Mo imparte estabilidad en un entorno que contiene Cl.[2]

Se forma una diseñado de una sola fase (FCC fase de austenita) de su temperatura de forja (~1050 ° C) a temperatura ambiente y alcanzar resistencia a la fatiga aceptable y una resistencia mejorada como resultado de endurecimiento por deformación y fortalecimiento de mecanismos de solución sólida y un tamaño de grano fino [5,60, 75]. La estructura química de 316L SS se desarrolló de manera única para lograr una estructura austenita estable. Por lo tanto, esta estructura obliga a varias ventajas, a saber;[2]

- 1) El acero inoxidable austenítico tiene una estructura cúbica centrada en la cara y se caracteriza por un bajo límite elástico, relación de resistencia a la tracción y alta capacidad de conformabilidad;
- 2) El envejecimiento por cepa sucesivo y el trabajo en frío se pueden usar para aumentar su resistencia;
- 3) El acero inoxidable austenítico presenta una excelente resistencia a la corrosión que el acero inoxidable ferrítico debido a que la densidad atómica cristalográfica del primero es mayor que la del último; y
- 4) El acero inoxidable austenítico es básicamente no magnético

1.3 Procesos de Metalurgia de Polvos

1.3.1 Dado de Compactación

Compactación uniaxial en dados rígidos es la forma más económica y el método extensivamente más utilizado para manufacturar partes estructurales. La herramienta para compactación consiste de un dado, en general un punzón inferior estacionario, barra central y un punzón superior. El ciclo de presión envuelve los siguientes pasos, llenado de polvo en el dado, compactación a una alta presión, expulsión y remoción del componente. Un simple ciclo de compactación es mostrado en

la figura 1. Los componentes son sinterizados en un horno de vacío o atmósfera. Si es requerido las partes son sometidas a un proceso secundario. [3]

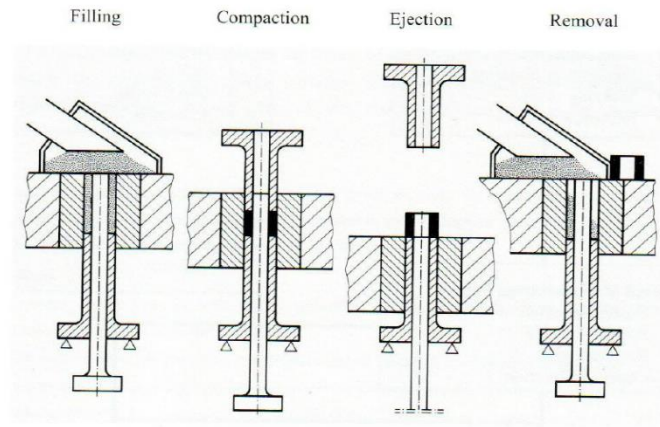


FIGURA 1. DADO DE COMPACTACIÓN

1.3.2 Forjado de Polvos

El forjado de polvos es quizás una de las más viejas formas de trabajar el metal. Una de las reliquias de la metalurgia de polvos es Pilar de Hierro de Delhi en la India que data de 319 DC. Ésta tecnología tan vieja fue olvidada hasta que fue reutilizada en el siglo 20. La era moderna del forjado de polvos de los 1940-1950 cuando varios componentes, incluyendo engranes de bombas de agua, la alta densidad la cual resultaba en el incremento significativo del desempeño del componente. [4]

El proceso de forjado de polvos consiste en una rápida densificación de la preforma calentada por uso de una forma soplada. Este proceso puede ser diferenciado en dos categorías: represado de polvos y forjado de polvos. En represado de polvos hay un límite de flujo del material y el flujo ocurre en dirección de la prensa. En este caso la preforma tiene casi las dimensiones del producto final. En el forjado de polvos el material fluye es un poco más alto con un significativo monto de material de flujo lateral. [4]

El proceso de forjado de polvos es mostrado en la figura.2 En este proceso, una preforma es compactada a una forma que refleja la geometría de la herramienta forjada. La preforma es forjada en caliente para dar el tamaño y la forma final en un dado con un límite de flujo de material. El componente resultante tiene virtualmente no poros residuales. [3]

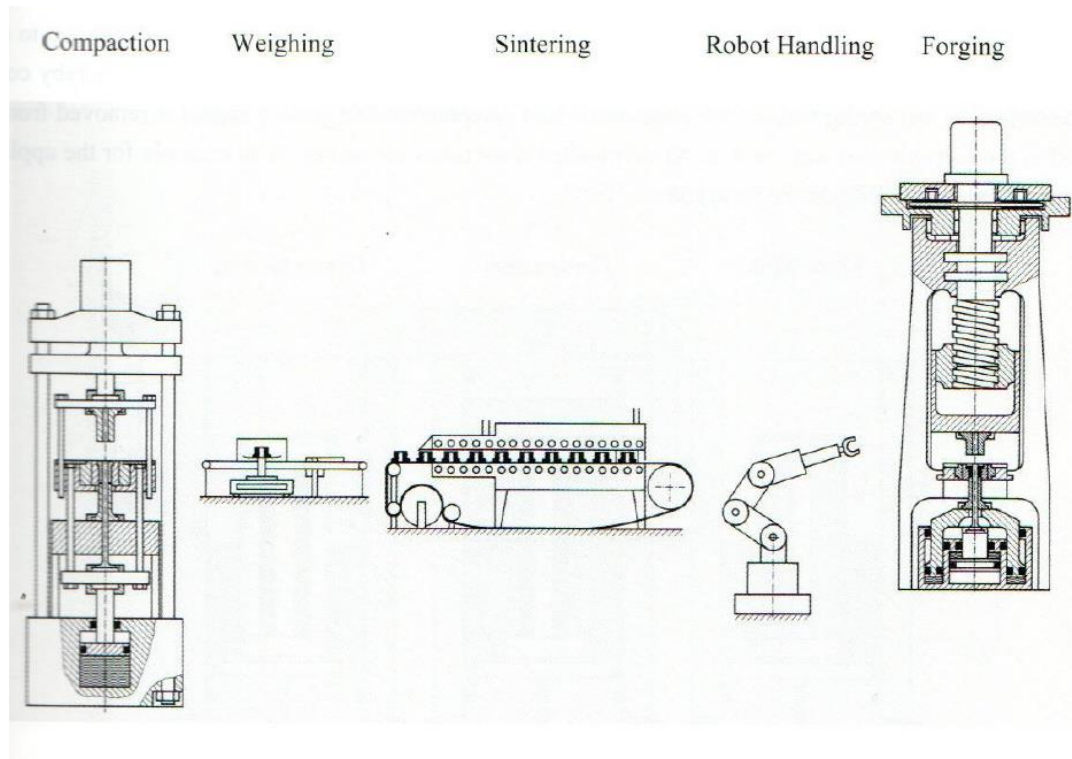


FIGURA 2. FORJADO DE POLVOS

1.3.3 Prensado Isostático

Prensado Isostático utiliza presión omnidireccional resultando en una distribución de densidad uniforme. Estas técnicas pueden ser desarrolladas a temperatura de cuarto (Prensado en frío isostático CIP) o altas temperaturas (Prensado en caliente isostático HIP).[3]

Prensado Isostático en caliente como una técnica de consolidación es la aplicación de presión y temperatura a polvos esféricos en un contenedor. A pesar que este proceso es muy utilizado para sanar defectos en casting. [4]

Encapsulado

El primer paso es manufacturar el contenedor, puede ser tan simple o complicado dependiendo en la forma final deseada después de HIP. Antes de que se vierta el polvo dentro se debe hacer una prueba de fugas para asegurar la integridad del contenedor.[4]

Desgasificación del polvo.

Los polvos que son HIP normalmente absorben algunos gases y humedad en la superficie, la cual debe ser removida antes de que el contenedor sea sellado. Para eliminar esto, el polvo es llenado el contenedor es evacuado a través de vapor de relleno metálico. La evacuación es hecha casi siempre a temperatura ambiente. Depende de la aleación, es hecha a temperaturas por arriba de 350 C. Normalmente el vacío para que el desmasificado sea efectivo debe llegar a los 10 micrones con un máximo de 10 micrones/minuto entonces el contenedor puede ser sellado. [4]

1.3.3.1 Prensado en frío isostático (CIP)

La herramienta para el formado de este proceso normalmente consiste de acero y componentes elastoméricos. Barra central, manto exterior de poliuretano. Después del llenado el espacio entre la barra y el manto con el polvo y el sellador de la herramienta, es insertado en un recipiente a presión el cual será presurizado por arriba de los 6,000 bar. Esta presión es isostáticamente transmitida a través de las paredes elastoméricas a la masa de polvos de este modo compactada. Después de la despresurización y el regreso de los componentes de la herramienta elastomérica, la parte en verde es removida de la herramienta y sinterizada en una manera convencional. [3]

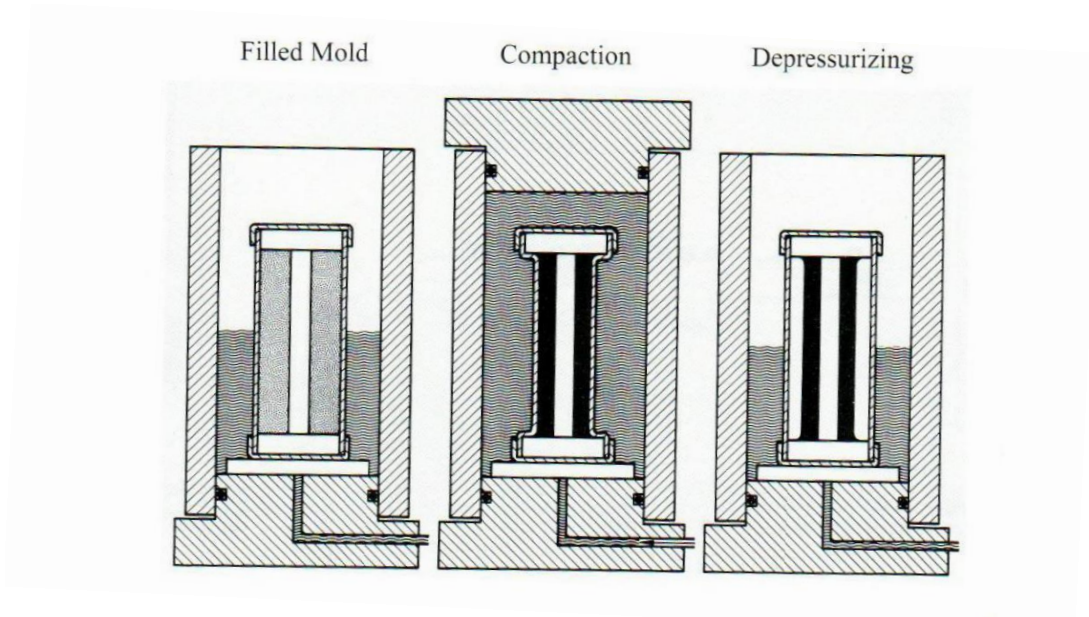


FIGURA 3. PRENSADO EN FRÍO ISOSTÁTICO

1.3.3.2 Prensado Isostático en caliente

En prensado isostático en caliente, presión isostática y el calor son aplicados simultáneamente. El polvo es vaciado en una lata metálica o cápsula, usualmente hechas de acero inoxidable templado o austenítico y cerrada con una tapa un tubo para evacuación durante el calentamiento. Rangos de presiones y temperaturas típicas están por arriba de 2,000 bar y 800-2000 grados centígrados respectivamente. [3]

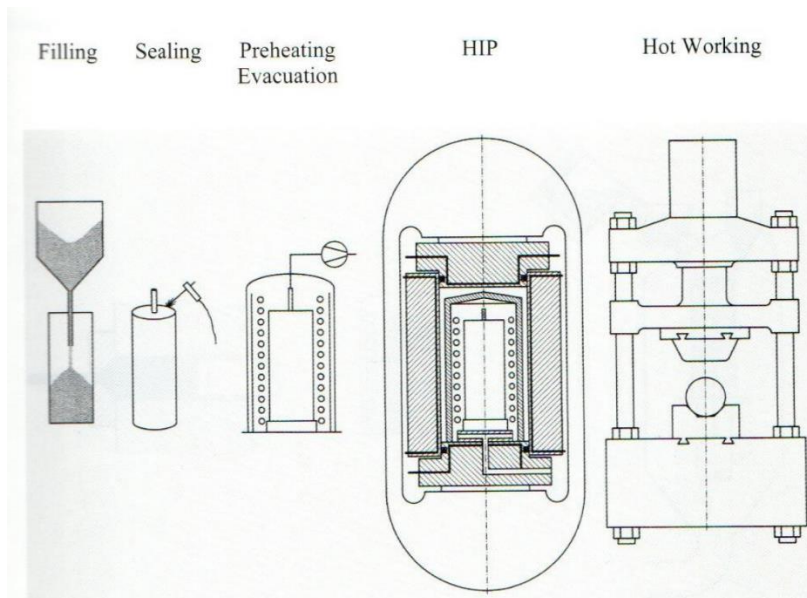


FIGURA 4. PRENSADO ISOSTÁTICO EN CALIENTE

1.3.4 Compactación por pulverización

Compactación por pulverización es un proceso donde una alta aleación derretida es desintegrada en gotas las cuales son depositadas en un objetivo de escaneo de oscilación. Las gotas de líquido o semi-derretidas solidifican en el objetivo y forman sucesivamente una preforma o moldura para futuros trabajos en caliente. El material formado está libre de segregación y puede ser más fácilmente trabajado en frío o caliente como materiales convencionales. Este material procesado son altas aleaciones de acero, materiales a base de cobre, aleaciones a base de aluminio. [3]

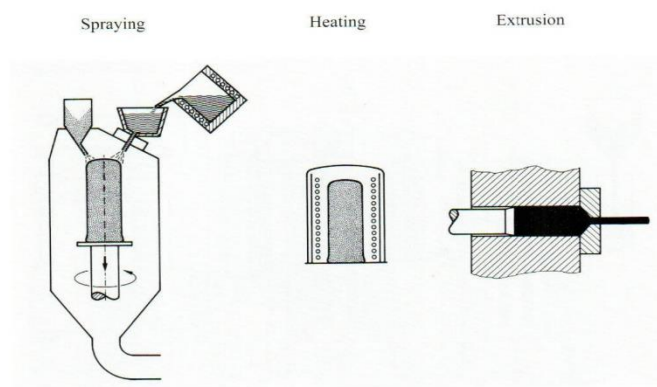


FIGURA 5. COMPACTACIÓN POR PULVERIZACIÓN

1.3.5 Polvo rolado en tiras

Tiras delgadas de metal son usualmente hechas por técnicas de forjado de metal. Las aleaciones de acero y cobre pueden ser fundidas en bloques largos, o pueden ser fundidas continuamente en tiras con un espesor de .3 in o en losas. Para hacer tiras delgadas, los bloques o tiras fundidas deben ser recalentados para ablandarlos y rolarlos mientras están calientes. Hay un límite en cuanto a la reducción de espesor que se puede lograr, solo el 30% de las tiras se pueden rolar de nuevo, un continuo calentamiento y rolado agrega costo. Además, hay problemas de pureza al incluir lozas. Para evitar los problemas de muchas operaciones de rolado, es posible rolar polvos directamente en tiras. Los polvos son cuidadosamente alimentados en el espacio entre los dos rodillos. El producto es inmediatamente pasado a un horno adyacente para unir las partículas. De esta manera, uno puede hacer tiras de .125 in de espesor en una pasada. El proceso permite el rolado directo de una tira más delgada. [5]

1.3.6 Extrusión de Polvos

Extrusión de polvos en caliente provee otra ruta para procesar materiales a una densidad completa. Esta técnica es utilizada para producir barras largas o barras de alto desempeño. El proceso usualmente produce formas con una sección trasversal uniforme sobre su longitud. La sección transversal usualmente es simple, como cuadros, rectángulos o círculos. La extrusión de polvos es hecha a temperaturas elevadas, una elevada tasa de tensión y estrés. La mayor ventaja de este proceso sobre HIP que las partículas están sujetas a un esfuerzo cortante alto durante la extrusión esto ayuda a romper cualquier óxido y promueve el contacto entre partículas. [4]

1.4 Ventajas claves del proceso MIM

- Coste de producción relativamente bajo. El equipo es ligeramente distinto al de inyección de termoplásticos.
- Alta complejidad de formas con tolerancias estrechas. En pocos casos es necesario el acabado.
- Amplio espectro de materiales a los que se puede aplicar.

- Altas propiedades mecánicas de la pieza final. La densidad del orden de 96% de la densidad teórica. Esta es quizás una de las ventajas más importantes.

En la figura 6. Se pueden observar todos los procesos que componen la tecnología de Moldeo de Inyección de Metal.

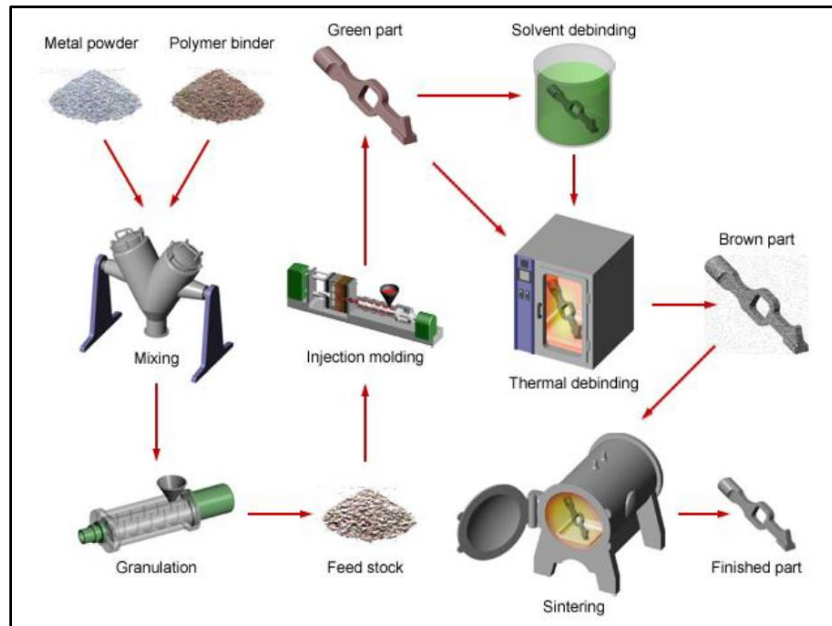


FIGURE 6. PASOS DEL PROCESO MIM

1.5 Sectores en los que compite proceso MIM

Aunque MIM se conoce desde hace varias décadas. Hoy en día MIM cubre un sector amplio de la industria, desde los utensilios odontológicos hasta los conectores electrónicos, compitiendo con procesos de fabricación rivales como inyección de metal fundido, sinterizado convencional, mecanizado convencional, etc. En la Figura 7. Se muestra el campo de aplicación de MIM en función de la complejidad y la cantidad de piezas fabricadas (tamaño de serie). En la figura 8. Se puede observar los metales más utilizados en esta industria.

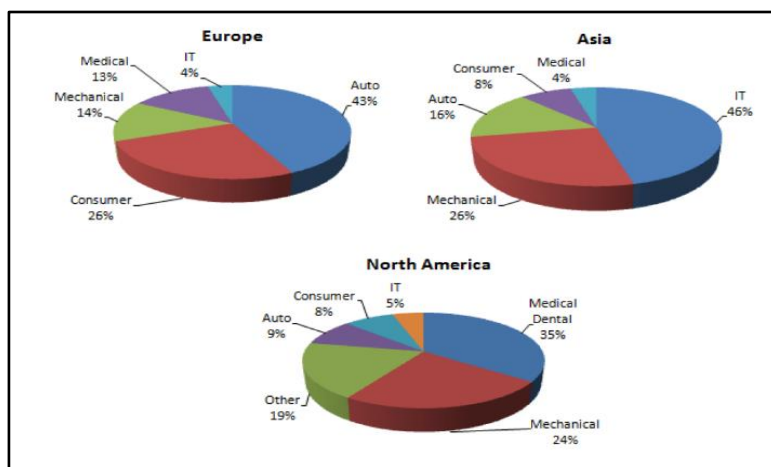


FIGURE 7. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MIM

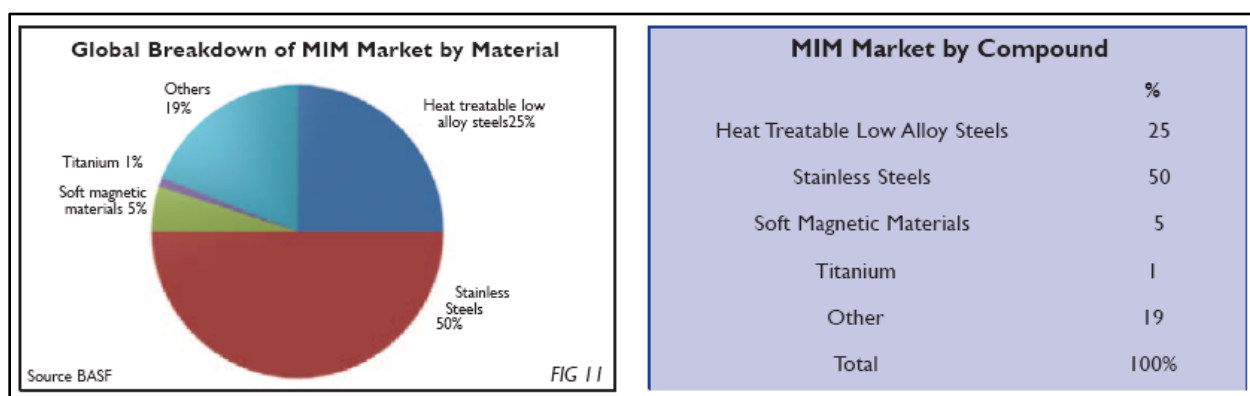


FIGURE 8. METALES MÁS UTILIZADOS EN LA TECNOLOGÍA MIM

1.6 Producción de polvos metálicos

Una gran variedad de técnicas de fabricación de polvos es aplicable a MIM (Metal Injection Molding). La fabricación de polvos tiene gran influencia en el tamaño, forma, microestructura, química y costo. Casi todos los metales pueden ser obtenidos en forma de polvo adecuado para MIM. El acero inoxidable es el material de mayor utilización, aunque el cobre, el tungsteno y el hierro se utilizan con mucha frecuencia. Aún así, el campo en el que el MIM presenta ventajas competitivas respecto de otros procesos es en el conformado de materiales raros y caros. Existe

una gran variedad de técnicas para la producción de polvo. En la Tabla 2. se exponen las más importantes. Las técnicas de la molienda y la reducción de óxidos son muy frecuentes. La molienda consiste en la molienda y rotura de las partículas grandes. En la reducción, sin embargo, el polvo cerámico se obtiene del óxido purificado en la forma muy fina. La reducción se efectúa mediante las reacciones termoquímicas con la participación de los gases reductores como monóxido de carbono e hidrógeno a temperaturas bajas para minimizar el sinterizado del producto del proceso. En la producción de polvo metálico también destacan la atomización por gas, por agua y por carbonilo.[1]

1.6.1 Maquinado

El polvo grande con una forma irregular resulta de la cizalla asociada con el mecanizado del material forjado. La gran cantidad de chatarra producida en las operaciones de trabajo del metal proporciona una fuente abundante de polvo. dicha chatarra se limpia mediante técnicas químicas y, a menudo, se muele para reducir el tamaño de partícula.

El mecanizado es una técnica fácil de configurar para la ruptura del lingote primario; Por lo tanto, es útil para la producción de polvo a pequeña escala. La falta de control sobre las características del polvo, incluidos los contaminantes químicos del aire y los fluidos de mecanizado, es una desventaja. El mecanizado no es una primera opción para la fabricación de polvo.

1.6.2 Molienda

El fresado implica compactación mecánica con bolas duras, carreteras o martillos, y es un método clásico para fabricar polvos a partir de materiales frágiles. El dispositivo más simple es un molino de jarra. que consisten en una jarra cilíndrica llena de bolas y el material a moler. a medida que la jarra gira, las bolas chocan continuamente con el material en polvo, triturándolo aún más en partículas más pequeñas.

La molienda no es útil para muchos materiales dúctiles, ya que se deforman en lugar de fracturarse. Además, el proceso, la eficiencia, es bajo, a menudo, en el rango de 1 a 3 por ciento. Dado que los materiales frágiles son más sensibles, es apropiado moler los polvos en condiciones de fragilidad.

1.6.3 Atomización de Gas.

El uso de aire, nitrógeno, helio o argón como gas para romper una corriente fundida se denomina atomización de gas. El material líquido se desintegra por la rápida expansión del gas desde una boquilla, al igual que un perfume se empaña. Los diseños de los equipos varían con respecto al mecanismo de alimentación de material fundido y la sofisticación de las cámaras de fusión y recolección.

Los atomizadores de baja temperatura se basan en diseños horizontales, el gas a alta velocidad que emerge de la boquilla crea un sifón, que tira de la masa fundida hacia la zona de expansión de gas. Una alta velocidad del gas hace que las gotas más pequeñas. El proceso de atomización de gas tiene un gran número de variables operativas, que incluyen el tipo de gas, la atmósfera residual, la temperatura de fusión y la viscosidad a medida que ingresa a la boquilla, el tipo de aleación, la velocidad de alimentación de fusión, la presión de gas, la velocidad y velocidad de alimentación de gas, la geometría de la boquilla y la temperatura del gas.

1.6.4 Atomización de líquidos y agua.

En lugar de gas, es común usar un líquido para desintegrar la corriente de fusión. Los líquidos incluyen aceites y agua, siendo el agua el más común para los materiales de baja reactividad que se funden por debajo de aproximadamente 1600 C. Los chorros de agua a alta presión se dirigen contra la corriente de masa fundida, lo que obliga a la desintegración y la rápida solidificación. El agua es generalmente dirigida desde varios chorros. El proceso es similar a la atomización con gas, excepto que las partículas se apagan rápidamente y el líquido de atomización tiene una eficiencia mucho mayor en la transferencia de velocidad a pequeños polvos.

1.6.5 Atomización Centrífuga

La atomización centrífuga se basa en la fuerza mecánica de girar la masa fundida para formar gotitas que se solidifican en partículas. Es muy útil para alta temperatura o materiales reactivos donde el contacto con un crisol es una dificultad. Existen muchas variaciones sobre el tema central: una fuerza centrífuga arroja material fundido como un rocío que se solidifica en partículas. Uno de los ejemplos más antiguos se conoce como el proceso de electrodo giratorio.

El aparato consiste en un electrodo consumible hecho del material deseado. El electrodo se funde en su extremo mediante un arco de plasma o un electrodo de tungsteno. El electrodo gira a velocidades de hasta 50,000 revoluciones por minuto a través de un motor de accionamiento externo. A medida que la fusión se produce en el extremo, la masa fundida se desecha como gotas que se congelan en la cámara de recolección protectora.

1.6.6 Atomización de plasma

Un plasma proporciona otra técnica de atomización. El alambre o el polvo grande se introducen en una antorcha de plasma donde se produce la fusión y la rápida aceleración. Como resultado, las gotitas fundidas se pulverizan fuera de la antorcha para solidificarse en partículas. Para producir una aleación, las partículas de entrada se mezclan y aglomeran para formar grupos que se funden y se alean en el plasma. La alta velocidad y las altas temperaturas del arco de plasma dan como resultado un sobrecalentamiento alto. Si el polvo tiene una trayectoria de vuelo larga, entonces se obtiene una forma esférica. Dicho método de formación de polvo esférico se optimiza cuando el polvo de entrada está entre 30 y 80 micrones. Para producir partículas más pequeñas, las gotitas aceleradas se rocían sobre un objetivo donde se fragmentan para solidificarse como partículas más pequeñas.

1.7 Tamaño y forma de la partícula

Glosario de la ASTM B243 limita que los polvos sean más pequeños que un milímetro de diámetro (0.040 in). Como una cuestión práctica, para materiales tan fuertes como el hierro, las partículas necesitan ser más pequeñas que 0.010 in, en diámetro para tener suficiente resistencia en verde en su forma compactada, y para proveer una superficie de acabado suave. Resistencia en verde se refiere a la fuerza necesaria para romper una parte compactada antes de ser sinterizada. Si la resistencia en verde es demasiado baja la parte se quebrará durante la eyección de la parte con la herramienta, en el manejo o en camino a ser sinterizada. La mejor manera de mantener la resistencia en verde es crear partículas con formas irregulares. Si partículas finas son hechas para superficies con acabados finos, porque no hacer mucho más chicas que 0.010 in de diámetro. La primera razón es el proceso de manufactura, el proceso de atomización de agua económicamente

produce partículas del rango de 0.001 a 0.010 in. El costo sería mucho mayor, para separar las partículas de 0.001 sería un problema. Segundo, las partículas no fluirían bien en los moldes, la prensa correría más despacio y con más variación en el peso de la parte. Tercero, las partículas finas tenderán a ser más irregulares en su forma tendrá resistencia en verde más baja. Cuarto, algunas de las partículas finas tenderán a irse por debajo de los dados. Las partículas finas tienen grandes beneficios como acabados superficial más finos menor tamaño de los poros, debido a su contacto superficial el sinterizado será más rápido produciendo partes con alta densidad. [5]

Se puede decir que dos átomos se han movido en su condición de energía más bajo (Estado). Para separarlos tenemos que alcanzar su nivel de energía que tuvo antes de que se unieran. Para alcanzar su energía tenemos que hacer algún trabajo sobre ellos y cada vez como los buenos físicos saben, la única manera de hacer trabajo es aplicar una fuerza y mover un objeto. Este trabajo es difícil, y las barras de acero son fuertes y toma tiempo romper los enlaces metálicos. Cuando se dice que el enlace metálico es creado por dos átomos de hierro compartiendo electrones, los físicos tienen modelos que les permiten calcular la fuerza de las uniones. [5]

A temperatura ambiente los átomos no tienen mucha energía y no vibran de un lado para otro, pero entrando al horno de sinterizado, se calienta y vibra grandes distancias espoleado por la fuerza de la partícula invasora, el átomo espía un lugar en la partícula invasora donde pueda rodearse mejor con otros átomos. El átomo extiende su nube de electrones bajando su nivel de energía para compartir electrones con ambos lados su nuevo y viejo hogar, es la manera en que tenemos la unión de dos partículas. Cuando los poros se han ido, los átomos en la superficie se acomodarán eventualmente para minimizar la superficie del área del material y se volverán esferas. [5]

1.8 Contenido de Carbono.

El rol del carbón es más complicado de lo que parece. El acero inoxidable trae algunos óxidos residuales en la superficie. Estos son óxidos gruesos de cerca de .5 micrones de espesor y no debe ser confundido con la capa pasiva de óxido que se forma a temperatura ambiente. Los óxidos en la partícula amarran cromo e interfiere con el sinterizado. El hidrógeno en el horno puede reaccionar con los óxidos en la partícula y acarrear oxígeno como vapor de agua. También una pequeña cantidad de carbón del lubricante puede reaccionar con los óxidos y formar monóxido de

carbono que se deja llevar. El problema ocurre cuando hay mucho carbón y el carbón termina como carburo de cromo. [5]

1.9 Importancia en la selección del aglutinante

La selección de un aglutinante adecuado que deje un mínimo de oxígeno y residuos de carbono después de la eliminación es un paso crítico en MIM-Ti. Las características más importantes de una carpeta incluyen:[6]

- Buena adhesión a las partículas de Ti;
- Baja temperatura de fusión para el moldeo por inyección;
- Estabilidad dimensional durante el desligue;
- Descomposición completa a baja temperatura (b260 ° C) sin ningún residuo después del desligue térmico;
- No químicamente reactivo con Ti;
- Proporcione suficiente resistencia ecológica y sea ecológico.

1.10 Efecto del Oxígeno

El oxígeno disminuye la ductilidad a la tracción, la trabajabilidad en frío, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión por esfuerzo del Ti y sus aleaciones. Aunque otros elementos intersticiales como nitrógeno, carbono e hidrógeno podrían tener una influencia perjudicial sobre las propiedades de las partes sinterizadas, la experiencia ha demostrado que durante MIM el desprendimiento de estos elementos es insignificante en comparación con el oxígeno. [6]

1.11 Características de la materia prima

características del polvo como el tamaño y la forma y la distribución, los sistemas de aglutinante, los procesos de mezcla y la carga de polvo pueden influir significativamente en la distorsión y la precisión dimensional de los productos MIM. Factores de procesamiento: los parámetros de moldeo por inyección, así como los parámetros de desligue de sinterización y sinterización pueden afectar gravemente la precisión dimensional, así como la distorsión de las muestras de MIM.[6]

La mezcla de polvo y aglutinante se denomina materia prima. En la mezcla de materia prima, se espera que cada partícula de polvo, que debe estar envuelta por una película muy delgada de aglutinante, tenga un estrecho contacto entre sí. Al mismo tiempo, todos los poros entre las partículas de polvo se llenan con aglutinante. Pero es muy difícil obtener esa mezcla ideal de polvo y aglutinante. La relación de volumen de polvo sólido al volumen total de polvo y aglutinante se define como la carga de polvo. En general, se espera que la materia prima MIM tenga una mayor carga de polvo. Un gran exceso de aglutinante es inaceptable porque el aglutinante en exceso se separa del polvo durante el moldeo, lo que conduce a un destello o en homogeneidades en las piezas moldeadas. Lo que es más importante, un exceso de aglutinante grande conduce a una caída compacta durante el desligue, ya que las partículas no se mantienen en su lugar cuando se elimina el aglutinante.[7]

La carga de polvo significa una menor contracción del volumen compacto y un control más fácil de la tolerancia de la dimensión, lo cual es muy importante para la producción masiva de piezas MIM complejas y delicadas. Pero una carga de polvo demasiado alta también es inaceptable porque conducirá a una viscosidad demasiado alta del material de alimentación y dará como resultado la falla del moldeo por inyección.[7]

Li et al. investigaron el efecto de la carga de polvo sobre el grosor compacto crítico durante la eliminación del ligante, concluyeron que el grosor crítico era inversamente proporcional a la carga de polvo. German et al. estudiaron el efecto de la carga de polvo en el cambio dimensional in situ durante el desligue del solvente de los componentes moldeados por inyección de polvo. Liu y Tseng estudiaron la influencia de la carga de polvo en la evolución de la microestructura verde y el comportamiento de sinterización de los artículos moldeados. Tseng evaluó la influencia de la carga de polvo en el control dimensional en el moldeo por inyección de cerámica mediante el análisis estadístico. Todos los trabajos anteriores ayudan mucho a comprender el efecto de la carga de polvo en el moldeo por inyección de metal y polvos cerámicos. Sin embargo, el efecto de la carga de polvo no es el punto clave de la investigación, en la mayoría de estos informes anteriores.[7]

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE DIVERSAS TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE POLVOS.

Existe

una carga de polvo óptima que está justo por debajo de la carga crítica de polvo para cualquier sistema de aglutinante en polvo dado. Una materia prima con la carga de polvo óptima tendrá buenas propiedades reológicas para el moldeo, pequeña distorsión y buenas propiedades mecánicas después del desligado y la sinterización.[7]

técnica	tamaño [μm]	forma obtenida	material tratado	coste
atomización por gas	5 ÷ 40	esférica	metales, aleaciones	alto
atomización por agua	6 ÷ 40	redonda, ligamentos	metales, aleaciones	moderado
atomización centrífuga	25 ÷ 60	esférica	metales, aleaciones	moderado-alto
atomización por plasma	2 ÷ 40	esférica	metales, aleaciones, cerámica	alto
reducción de óxidos	1 ÷ 10	polígona, redonda	metales, cerámica	bajo
precipitación	0.1 ÷ 3	polígona	metales, compuestos	bajo-moderado
molienda	1 ÷ 40	irregular	frágiles	moderado

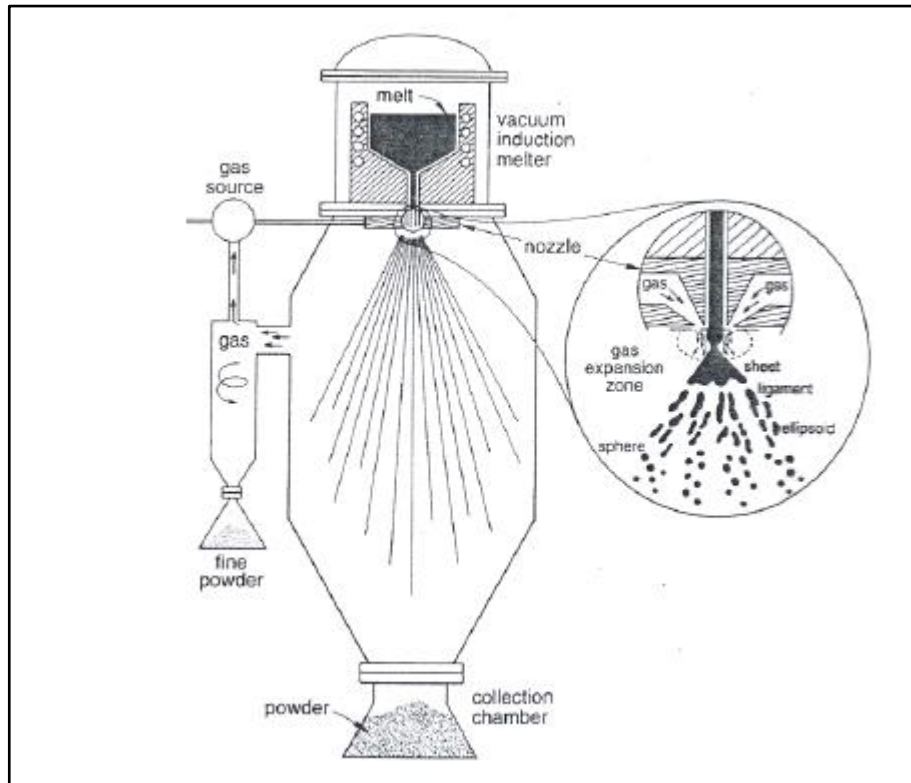


FIGURE 9. PRODUCCIÓN DE POLVO MEDIANTE ATOMIZACIÓN POR GAS INERTE

En la Figura 9. se representa el proceso de la atomización por gas. El principio de la atomización por agua o por carbonilo es el mismo. El metal fundido alimenta la boquilla de la expansión de gas donde el chorro del gas lo dispersa en gotitas que solidifican antes de tocar las paredes de la vasija. Los gases que se utilizan son aire, nitrógeno, helio, argón o vapor de agua.

Zauner investigó el efecto del tipo y tamaño de polvo en la variabilidad dimensional. La caracterización del polvo juega un rol importante en el proceso MIM según Zauner. Condujo un estudio para mostrar el efecto del tamaño del polvo, forma del polvo, distribución del tamaño del polvo enfocándose en la variación dimensional y la dependencia del tipo de polvo, forma y tamaño de la partícula. Arakida y Miura estudiaron polvo fino (20 Micras), cuarzo (150 Micras) procesado por atomización de agua/gas y su efecto en la fluidez y densidad de empaque. Su trabajo mostró

que los polvos producidos por atomización de gas exhiben mayor densidad, el cual produce mejoras en las propiedades mecánicas.[8]

El acero inoxidable grado 316L es una de las aleaciones moldeadas por inyección de metal más comunes debido a su excelente resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas. Las aplicaciones típicas consisten en productos de consumo tales como anteojos, cajas de reloj y dispositivos médicos. Los parámetros de procesamiento de la materia prima de los polvos de 316 L pre-aleados atomizados tanto en agua como en gas son bien conocidos y están ampliamente publicados. La técnica de pre-aleación utiliza polvos atomizados que son de la química exacta como el componente final. Alternativamente, una técnica de aleación maestra utiliza polvos atomizados enriquecidos con aleación que se mezclan con polvo de hierro y carbonilo para lograr una composición de 316L después de sinterizar. [9]

Tingskog et al. investigó el efecto del tamaño de partícula y también el uso de la técnica pre-aleada versus la aleatorizada. Sus hallazgos fueron que, en el estado pre-aleado, -16 μ m, -22 μ m, y -31 μ m los polvos pueden producir 99.2% de densidad o mejor. Sin embargo, el polvo de -31 μ m era más susceptible a la formación de defectos durante la eliminación y sinterización. Los defectos se redujeron al aumentar las velocidades de calentamiento y al aumentar la velocidad del flujo de gas. Las mezclas de aleación maestra también se examinaron para polvos de aleación principal de -22 μ m y -31 μ m; sin embargo, se lograron densidades de solo 98.5. Aunque se han realizado muchos estudios para evaluar estas diferentes técnicas de aleación y tamaños de polvo, no se midieron otras propiedades mecánicas además de la densidad. [9]

Capítulo 2. Procesos que conforman la Tecnología MIM.

2.1 Mezcla y Peletizado.

La mezcla es crítica algunos dirían es el factor más crítico en el éxito de la producción de componentes moldeados. En cierta medida, las composiciones y procedimientos exactos siguen siendo secretos propios, sin embargo, la mayoría de las partes son mezcladas con compuestos orgánicos siendo ceras naturales o polímeros sintéticos. Otra sustancia puede ser agregada para modificar las propiedades. [1]

La mezcla es llevada a altas temperaturas donde el aglutinante es líquido y esta condición debe humedecer las partículas de polvo produciendo una mezcla homogénea sin tener ningún grupo de partículas. Es en esta etapa donde los surfactantes son agregados a la composición, sin embargo, no hay una reacción química entre el aglutinante y el metal. Otro requisito es que el aglutinante no se deteriore durante el proceso. Por razones económicas es requerido que los canales de inyección y cualquier pieza verde rechazada regresen a la etapa de granulación para ser reutilizada. [1]

Algunos de los equipos utilizados en el proceso MIM para mezclar los componentes son tomboleadoras de doble cono. El objetivo principal es asegurarse que la superficie completa de cada partícula esté cubierta de aglutinante. Algunas veces el polvo es pre-procesado para facilitar e intensificar el contacto entre las partículas y el aglutinante. La cantidad mínima de aglutinante debe ser utilizada, pero la fracción de volumen adecuada de polvo depende de las características del mismo. En la industria, la fracción de volumen de polvo varía de 0.5 a 0.7. Esto usualmente se convierte en la mezcla de polvo-aglutinante, llamado feedstock, en pellets sólidos por un proceso de granulado. Estos pellets se utilizan para alimentar las máquinas de moldeo. [1]

Muchas de las partes manufacturadas obtienen su mezcla de proveedores certificados. Una mezcla de calidad consistente es obtenida para proveer alta calidad del producto final, en términos de propiedades del material y dimensional. El encogimiento de las dimensiones del molde a la dimensión final del componente puede ser relacionada con las propiedades del feedstock.

La viscosidad del feedstock es una propiedad muy importante en la tecnología MIM, la cual determina que tan bien el material puede ser transportado y alimentado dentro de la cavidad del

molde. Cuando el comportamiento del flujo es considerado, uno puede tener en cuenta que el término viscosidad puede tener diferentes significados dependiendo la condición actual de prueba.[10]

Una vez que el polvo y el aglutinante han sido seleccionados, la preocupación es la mezcla de estos componentes. La uniformidad de la mezcla es crucial, la mejor mezcla ocurre con un alto esfuerzo de corte, pero no hasta el punto donde dañe la partícula o se sobre caliente el aglutinante, una apropiada mezcla de material consiste en una dispersión homogénea de los polvos en el aglutinante evitando los poros internos. Una mezcla no homogénea termina en viscosidades no uniformes dificultando el moldeo y el sinterizado. Polvos pueden separarse derivado de las diferencias en tamaño, forma o densidad. La separación de partículas del aglutinante ocasiona distorsión en el producto final. Pequeñas o formas irregulares de partículas requiere mayor tiempo de mezclado para lograr una mezcla homogénea.

La materia prima llamada en inglés “Feedstock” representa una mezcla balanceada de polvos y aglutinante. Dependiendo del porcentaje de aglutinante podemos tener los siguientes escenarios, muy poco aglutinante resulta en alta viscosidad y aire atrapado que ocasiona problemas durante el moldeo. Exceso de binder provoca que los polvos se separen después del moldeo, lo más importante es encontrar el balance entre la carga de polvos y aglutinante. La carga óptima de sólidos para moldeo tiene menos polvos que la carga crítica de sólidos. En este punto la mezcla tiene la viscosidad suficientemente baja para moldeo, pero se exhibe buen contacto entre partículas para asegurar la preservación de la forma durante el proceso. La densidad de empaque de un polvo es el primer predictor de la carga crítica de sólidos. Polvos que se empacan a alta densidad requiere menos aglutinante para moldeo y tiene mejor características en el sinterizado.

La temperatura disminuye la carga de sólidos porque el aglutinante tiene mayor coeficiente de expansión térmica comparado con el polvo, el aglutinante se expande más que el polvo, por ejemplo, el coeficiente de expansión térmico de la cera es 20 veces mayor que el del polvo de metal, la mezcla puede variar desde un 45% a 75% de carga de sólidos. El mezclado es la preparación de la mezcla, consistente en mezclar el polvo con el ligante, que a su vez está compuesto por un conjunto o mezcla de materiales termoplásticos. Este conjunto está basado en

termoplásticos comunes tales como cera o polipropileno a los que se añaden estearatos y activadores superficiales. El conjunto ligante crea un entorno de cohesión entre las partículas de polvo y aporta a la mezcla una alta fluidez. Su papel es actuar como un vehículo temporal para desplazar y repartir las partículas de polvo a todos los rincones de la cavidad. Esta mezcla, una vez preparada y homogeneizada en los tambores de mezcla, se enfría y seguidamente se transforma en granza que mantiene la homogeneidad obtenida durante el mezclado. De este modo, se almacena para ser suministrada al equipo de inyección.[1]

Uno de los desafíos serios para Ti-MIM es la falta de precisión dimensional y distorsión de los productos finales. Estos problemas son más desafiantes y difíciles de controlar para los componentes fabricados usando MIM de polvos de Ti de forma irregular. En una publicación de revisión reciente, los autores actuales abordaron los factores más importantes que afectan la reproducibilidad dimensional, la contracción desigual y la distorsión de los componentes MIM. Declararon el tamaño, la geometría y el grosor de las partes (factores componentes), tamaño, forma y distribución de polvos, sistemas aglutinantes, procesos de mezcla y carga de pólvora (factores de materia prima) y moldeo por inyección, des agrupación y parámetros de sinterización (factores de procesamiento) son los parámetros más importantes responsables de la precisión dimensional de los componentes MIM. A pesar de problemas tan complejos para el control dimensional de los componentes MIM, diferentes investigaciones han demostrado que este problema es controlable mediante la selección precisa de polvos, aglutinantes, parámetros de inyección y sinterización.[11]

2.2 Moldeo por inyección de metal.

Moldeo por Inyección de Metal (MIM) es relativamente una nueva y promisoría tecnología para la producción en masa de pequeños, complejos componentes cercanos a la forma del producto. Las dimensiones, tolerancias y propiedades mecánicas de productos MIM están influenciados por los parámetros de moldeo por inyección, así como por el sinterizado. Las propiedades mecánicas dependen primeramente de la densidad de sinterizado y su microestructura. Sin embargo, los parámetros de moldeo por inyección no deben ser descuidados. Esta investigación mostró que las propiedades mecánicas para un proceso MIM pueden ser obtenidas. Sin embargo, ellas pueden ser significativamente reducidas si las condiciones de moldeo y sinterizado son incorrectamente

seleccionadas. Un proceso incompleto de desligado puede resultar en carbón residual, el cual dificulta el sinterizado. Alta temperatura en el sinterizado por vacío puede causar evaporación de elementos volátiles (Cromo, Manganeso) resultando mayor porosidad en la superficie. La formación de una fase sigma dura y frágil se controla con la tasa de enfriamiento después del sinterizado. Los soportes de cerámica pueden reaccionar con el acero sinterizado. En este trabajo se discute la influencia de los parámetros de moldeo y sinterizado sobre las propiedades mecánicas del material sinterizado.[10]

Las máquinas normalmente utilizadas para este proceso son las mismas utilizadas en un proceso de plástico en la industria. Solo hay algunas características especiales para las máquinas de inyección de moldeo MIM como desgaste de las resistencias, geometría del husillo o un control especial del proceso de inyección. Estas características dependen del feedstock que será procesado. El husillo del cual el feedstock será extruido dentro de la cavidad está localizado en el cañón. La temperatura del cañón y la boquilla son cuidadosamente controladas para asegurar condiciones de proceso constante. La temperatura del molde también es controlada deber ser lo suficientemente baja para asegurar que la pieza esta compactada y rígida al ser removida.[10]

La influencia de la temperatura en la inyección de partículas de polvo de SS316L tamaño 11. 225 micras y 19.6 micras mezcladas con PEG, PMMA y ácido esteárico fue investigado para un sistema de desligado. El feedstock fue cargado con polvo a 64% V y 65%V. La investigación descubrió que el éxito de la inyección es dependiente de las propiedades reológicas del feedstock. Polvo fino con baja carga de polvo tiene alta sensibilidad que los polvos de coarso. La investigación encontró que la temperatura de inyección tiene influencia en la calidad de la pieza final compactada. Temperatura de inyección a 140 °C fue la temperatura óptima mientras el polvo óptimo fue el polvo fino, ya que proporciona alta flexión, resistencia y densidad cuando se moldea a 140 °C. Sin embargo, la investigación no encontró ninguna significancia entre la temperatura de inyección y tasa de remoción del ligante.[8]

Yimin investigó el efecto de la carga de polvos (60, 64, 68 y 72% de volumen) en piezas de acero inoxidable en un proceso MIM. La investigación probó que 68% de carga de polvos fue la carga óptima para inyección de moldeo, con atomización de gas de partículas esféricas de polvo de acero inoxidable 17-4 PH y aglutinante de 65% PW + 30% EVA + 5% SA. La carga de polvo a 68% puede ser inyectada al molde con una baja viscosidad en rango variable de temperaturas y es lo mejor para lograr un rápido empaquetado y orientación de las moléculas durante la inyección de moldeo. Desde el punto de partida de compactación y la retención de la forma, dimensión y control de tolerancias. La carga óptima de polvo a 68% fue la mejor, con esta carga fue fácil obtener la densificación del sinterizado y tiene superiores propiedades mecánicas y microestructurales.[12]

La resistencia a la tracción de las piezas PIM sinterizadas también está influenciada por los parámetros de moldeo por inyección, especialmente la presión de sostenimiento, la temperatura de fusión y la velocidad de inyección. Es claramente evidente que las condiciones de fabricación afectaron la resistencia a la tracción y el alargamiento, mientras que el efecto sobre la dureza, el límite elástico y la contracción es insignificante. [13]

El moldeo por inyección de metal (MIM) que se enfoca en componentes miniaturizados complejos se ha convertido en uno de los principales procesos de fabricación donde combina las tecnologías de moldeo por inyección de plástico y metalurgia de polvo. El procesamiento básico de las propiedades mecánicas finales. Sin embargo, existe una limitación debido a la oxidación durante el manejo, donde los polvos submicrométricos tienden a ser pirofóricos. Además, es deseable una materia prima de baja viscosidad para llenar los micro detalles durante el moldeo por inyección rápidamente antes de que se solidifique la materia prima. [14]

La variabilidad dimensional de los componentes moldeados por inyección de metal está pensada, por Heaney y Zauner, como afectada por la variabilidad de ciertas características del polvo. Las características clave del polvo que se correlacionan con la variabilidad dimensional del componente sinterizado incluyen la distribución del tamaño de partícula, tal como se define específicamente por el valor D10 (10% del polvo por volumen, menor que el diámetro del tamaño de partícula en μm) y la densidad picnométrica. La densidad picnométrica de la materia prima se utiliza comúnmente en el moldeo por inyección de polvo como herramienta de caracterización y predictor cualitativo del comportamiento de contracción. [9]

Existen muchos objetivos de optimización que podrían incluirse en la función objetivo para proporcionar una evaluación exhaustiva de la calidad. Además de los objetivos de calidad, también se tienen en cuenta los objetivos de costos, que apuntan a aumentar la productividad, así como a reducir la inversión de capital en la máquina de moldeo y el molde. En este documento, tres objetivos de optimización típicos se seleccionan y describen de la siguiente manera. La presión de la cavidad al final del llenado, $cavity$, es tanto objetivo de calidad como de costo. Una presión de cavidad inferior corresponde a una tensión de cizalladura más baja, lo que reduce la posibilidad de defectos de moldeo tales como destello, alabeo y adherencia mecánica. Mientras tanto, reducir al mínimo la presión de la cavidad puede reducir la inversión de capital de la máquina de moldeo y el molde. La diferencia de temperatura al final del llenado, T_d , es un objetivo de calidad para la uniformidad de la temperatura de fusión. Una distribución de temperatura no uniforme causará contracción o alabeo durante la etapa de enfriamiento. La diferencia de temperatura puede medirse por la diferencia entre la temperatura máxima de fusión $T_{max\ m}$ y la temperatura mínima de fusión $T_{min\ m}$ al final del llenado. [15]

2.2.1 Propiedades Reológicas

En un proceso MIM, las propiedades reológicas de la mezcla son características claves que influyen el flujo estable y la uniformidad de llenado en el molde. La evaluación de las propiedades reológicas de la mezcla está basada en la viscosidad y el esfuerzo cortante, así como la sensibilidad a la temperatura.[12]

Parámetros de inyección de moldeo que simultáneamente satisfacen la calidad de las partes en verde (defecto de pieza en verde, fuerza de la pieza en verde, densidad de la pieza en verde) han sido optimizados utilizando método de grupo ortogonal de Taguchi. Variables de moldeo que están envueltas en la optimización son: presión, temperatura de moldeo, temperatura de molde, presión de sostenimiento, tiempo de sostenimiento y tiempo de enfriamiento. El análisis de varianza (ANOVA) fue empleado para determinar el nivel de significancia (α) y la contribución de estas variables en la calidad de la pieza en verde. Los resultados mostraron que la temperatura del molde y el tiempo de sostenimiento simultáneamente son altamente importantes para la calidad de la

pieza verde, mientras que la presión de sostenimiento y el tiempo de enfriamiento no muestran ninguna significancia. Basado en eso, la densificación de la parte compactada con parámetros de moldeo optimizado está presente en este documento. Con temperaturas de sinterizado del rango de 1340 a 1400 °C mientras la tasa de calentamiento y el tiempo de retardo permanece a 10 °C/min y 4 horas respectivamente demostrando que los parámetros optimizados de moldeo son capaces de producir una parte sinterizada con una densidad la cual está muy cercana a la densidad sólida de SS316L.[16]

Termoplásticos son por definición el aglutinante preferido para el proceso de polvos. En esta etapa, la mezcla es calentada y plastificada mediante la rotación de husillo y está preparada para ser inyectada a la cavidad. El husillo se desplaza horizontalmente y la mezcla sale a través de la boquilla y fluye por los corredores, la entrada y finalmente llena la cavidad. Una vez completo el llenado, la pieza se mantiene bajo una presión de compactación para compensar las contracciones térmicas. La pieza inyectada es de una forma similar a la pieza final, aunque las dimensiones serán distintas debido a que una gran cantidad del volumen es ligante. La pieza se denomina pieza “en verde” y presenta unas prestaciones mecánicas muy bajas por lo que no se puede utilizar. Aunque la etapa de moldeo es idéntica a la inyección de termoplásticos, los parámetros de inyección tales como presión y fuerza de cierre, suelen ser de un mayor orden de magnitud. Asimismo, debido a su naturaleza bifásica y a pesar de la homogeneidad inicial, la mezcla sufre segregaciones entre la fracción sólida y la fracción líquida, que provocan que la pieza obtenida finalmente no posee una densidad homogénea. La segregación, es una de las mayores de las desventajas del proceso MIM puesto que, de ser inadecuados los parámetros de diseño de la pieza, sus consecuencias aparecen en las etapas posteriores del proceso como defectos.[1]

La mezcla de polvo con aglutinante es un factor importante y afecta la fluidez de la materia prima durante el proceso PIM. Para el moldeo a baja presión, es importante predecir el comportamiento de flujo de la materia prima; de lo contrario, poca fluidez y alta viscosidad conducen a muchos defectos de moldeo. La carga de polvo sólido es otro factor importante e influye en las propiedades finales de las muestras moldeadas. Existe una relación óptima entre las partículas de polvo y el aglutinante que mejora la calidad y la densificación debido a la compactación del polvo. La carga y la temperatura sólidas afectan la viscosidad de varias materias primas. Una carga sólida alta

muestra la contracción mínima de volumen compacto y es fácil controlar las dimensiones de las partes. Baja contracción juega un papel importante en la producción en masa de piezas complejas. Por otro lado, una carga demasiado alta mejorará la viscosidad de la materia prima y puede causar fallas en PIM. [17]

La viscosidad de las materias primas juega un papel vital en la determinación de las propiedades de moldeo durante el moldeo por inyección a baja presión. En este trabajo de investigación, se establece una relación entre la temperatura y la viscosidad. Se estudia el impacto del sistema aglutinante de baja viscosidad (a base de cera) sobre el índice de comportamiento de flujo, así como las propiedades térmicas de varias materias primas. [17]

Los resultados de moldeo muestran que la presión de inyección jugó un papel importante en el moldeo de las microestructuras. Comparado con el moldeo por inyección de polvo convencional, el moldeo por inyección de microestructuras requería una mayor presión de inyección. Usando la presión de inyección de 90 bar, las micro cavidades no se llenaron completamente incluso cuando se usaba una alta presión de mantenimiento de 80 bar. Cuando la presión de inyección aumentó a 110 bar y utilizando una presión de 80 bar, las micro cavidades se llenaron por completo. Esto se debió a la mayor fricción en el canal de flujo (incluyendo el bebedero, el corredor y la cavidad del molde) y la gran cantidad de micro cavidades que requerían una mayor presión de inyección para llenar las micro cavidades. La masa aumentó a medida que aumentó la presión de inyección. La presión de inyección de 130 bar se usó para experimentos posteriores con el fin de obtener microestructuras sinterizadas de mayor densidad que serían útiles para aplicaciones potenciales tales como insertos de moldes para moldeo por inyección de plástico o gofrado en caliente. El aspecto más importante de la fase de presión de mantenimiento fue la adición de fusión fresca para compensar los efectos de la contracción térmica de la masa fundida durante el enfriamiento. [18]

En general, se usan dos parámetros básicos para describir la microestructura de un material nano cristalino: el tamaño del grano y el contenido de los defectos del enrejado, como las vacantes, las dislocaciones, las fallas. La influencia de las propiedades de los monómeros y polímeros en la eliminación de vehículos orgánicos de las molduras de cerámica y metal. Las propiedades del

polímero que controlan la constante de difusión están relacionadas con la dependencia de la temperatura de la viscosidad de la suspensión fundida. La entalpía de vaporización del vehículo orgánico y la energía de activación para el coeficiente de difusión tienen una influencia dominante en la tasa de calentamiento crítico para evitar defectos. Las pautas preliminares emergen para el diseño de polímeros para la formación plástica de suspensiones cerámicas. [19]

La capacidad de fabricar artefactos de forma compleja a partir de la ingeniería de cerámica o polvos metálicos se ha mejorado mediante la transferencia de técnicas utilizadas en el procesamiento de polímeros, principalmente el moldeo por inyección. El polvo se incorpora en fracciones de volumen en el rango de 0,5-0,75 para producir una suspensión en un vehículo orgánico que se puede modelar aprovechando las propiedades de cizallamiento y flujo extensional de los polímeros altos. La fase orgánica se elimina a continuación para dejar un conjunto de partículas de densidad comparada comparable a la obtenida por la compactación convencional y capaz de sinterizarse usando métodos estándar.[19]

El hecho de que ambos procesos de transporte, flujo viscoso y difusión presenten una dependencia de temperatura similar significa que la dependencia de la viscosidad en la temperatura puede usarse para proporcionar una guía experimentalmente accesible en la selección de materiales tanto para el llenado como para la eliminación del vehículo orgánico. [19]

Las correlaciones entre composición y microestructura indican las siguientes relaciones fundamentales:

- La densidad, el contenido de ferrita y la porosidad están fuertemente correlacionados. A medida que aumenta la ferrita, la densidad aumenta y la porosidad disminuye.
- El tamaño de grano y la microdureza están relacionados; granos más pequeños dan como resultado una microdureza incrementada. [20]

Las propiedades elásticas locales están determinadas por la orientación local de las moléculas de plástico de cadena larga. Por ejemplo, las moléculas de plástico se alinearán si se congelan en condiciones de alta cizalladura (por ejemplo, durante la fase de inyección) y el material resultante se caracteriza por un pequeño módulo de Young en la dirección de alineación. Las moléculas de plástico que se congelan bajo condiciones de baja cizalladura (por ejemplo, durante la fase de

compensación) estarán orientadas aleatoriamente y, en consecuencia, tendrán propiedades elásticas que son independientes de la dirección. Por lo tanto, para determinar la forma final del objeto, es necesario investigar el crecimiento (y el entorno de tensión) de la piel de plástico sólido dentro del molde durante el proceso de moldeo.[21]

Los espacios vacíos de contracción a menudo aparecen en molduras cerámicas gruesas, y su incidencia disminuye a medida que aumenta la presión de mantenimiento. Desafortunadamente, el uso de presiones más altas tiende a generar una distribución de tensiones que crea grietas. La presión de mantenimiento se aplica para compensar la contracción en el moldeo de solidificación, pero cuando la compuerta se solidifica, el núcleo fundido se aísla y se crean vacíos a medida que la masa fundida solidifica sufre contracción.[22]

La disposición geométrica de las matrices capilares participa significativamente en las características reológicas obtenidas. Una aplicación de troqueles planos o cónicos cambia el espesor de la capa de deslizamiento y la velocidad de deslizamiento. Sin obstáculos, ya que se encuentran matrices planas en el proceso PIM y se cumple con el moldeo por inyección sin problemas. [23]

Se ha evaluado el deslizamiento de la pared como un fenómeno reológico crucial que influye en el moldeo por inyección de compuestos PIM con el objetivo de la geometría de los canales de flujo. La determinación confiable del deslizamiento de pared participa fuertemente en las simulaciones exitosas del proceso PIM. Se ha demostrado que la aplicación de los capilares de entrada planos, utilizados en la abrumadora mayoría de los estudios reológicos, proporciona valores exagerados de las velocidades de deslizamiento. Esto es causado por un obstáculo de ángulo de entrada de 180° , que no cumple con las disposiciones geométricas durante el proceso PIM. Una aplicación de troqueles cónicos parece ser más beneficiosa ya que las mediciones reológicas correspondientes están de acuerdo con la regla de proporcionalidad lineal entre la velocidad de deslizamiento de la pared y el esfuerzo cortante.[23]

Con la adición de 1 y 3% en peso de VC, la viscosidad aparente experimenta ligeros cambios en comparación con la viscosidad aparente obtenida en las mismas condiciones para M2 sin refuerzo. Cuando se utiliza una mayor cantidad de refuerzo (6% en peso de VC), la viscosidad aparente disminuye notablemente y alcanza un valor mínimo antes de aumentar nuevamente después de la adición de una cantidad progresivamente creciente de refuerzo. Estos resultados pueden explicarse teniendo en cuenta que con un aumento en la cantidad de refuerzo se logra una mayor densidad de empaquetamiento.[6]

Se investigó el comportamiento reológico y la procesabilidad de las materias primas compuestas por acero para herramientas AISIM2 reforzado con diferentes cantidades de polvo de carburo de vanadio. La adición de diferentes cantidades de VC tuvo un efecto directo en las propiedades reológicas de las materias primas y modificó notablemente los valores de viscosidad aparente.[6]

Se encontró que la variación de densidad era un problema inherente en el proceso de moldeo por inyección de polvos metálicos y cerámicos.[24]

Mannschatz A. et al. encontraron que la falta de homogeneidad en el empaquetamiento de partículas durante el llenado del molde de la materia prima dio como resultado variaciones en la distribución de la densidad después de la sinterización. [24]

Moon Kyu Lee et al. llevando a cabo la simulación de llenado del molde de polvos cerámicos mostró que la fracción de volumen de polvo, un índice de las características de empaquetamiento del polvo en la mezcla polvo-aglutinante-aire, se determinó por la distribución de la presión.[24]

Un conocimiento profundo del polímero termoplástico en el aglutinante a base de cera es esencial para garantizar las dimensiones y propiedades mecánicas de las piezas de moldeo por inyección de acero inoxidable 316L. El rendimiento de los aglutinantes depende principalmente del contenido del polímero principal, que determina la resistencia de piezas verdes en la etapa de moldeo por inyección y mantiene la forma del compacto en la etapa de desligado.[25]

La técnica de moldeo por inyección de metal (MIM) permite la producción de espumas metálicas altamente porosas con niveles de porosidad hasta 90%. Hace uso de la presión acumulada por la descomposición de un agente espumante que se incorpora en un material de cobre precursor espumable obtenido por compactación de polvo. La reología es uno de los factores clave para garantizar el éxito de la técnica MIM y para predecir fallas, ya sea debido al componente y las composiciones del aglutinante, la carga de polvo o los parámetros inadecuados del proceso.[26]

La calidad de la pieza moldeada por inyección depende de muchos factores y están relacionados tanto con las propiedades del material plástico como con los parámetros del proceso. Como se mencionó anteriormente, es posible distinguir tres grupos de parámetros del proceso de moldeo por inyección, mientras que diferentes especialistas podrían usar variables de diferentes grupos para monitorear y construir un modelo para el control del proceso y un marco para el monitoreo del proceso de moldeo por inyección. Como ejemplo, Shoemaker establece que las condiciones de moldeo comprenden la temperatura de fusión, la temperatura del molde, el tiempo de llenado, el tiempo de empaquetado y la presión de empaque.[27]

Los problemas de calidad son un problema común para el proceso de moldeo por inyección debido a la variación de temperatura no uniforme en el molde. Durante el diseño de los moldes para el proceso de moldeo por inyección, es muy difícil lograr un enfriamiento eficiente con una distribución térmica uniforme. [27]

El efecto posterior DSC de la materia prima demuestra que la temperatura de infusión de la materia prima MIM debe ser superior a 96,9 ° C también, la temperatura debe ser inferior a 65,2 ° C para un mejor moldeo por inyección. Para controlar la temperatura del molde, se proporcionaron canales de refrigeración en la herramienta de moldeo con entrada y salida para la circulación del medio de refrigeración. En el estudio, la inyección se realizó por encima de 96,9 ° C, es decir a 160 ° C y 170 ° C, donde el aglutinante en la materia prima se funde por completo.[28]

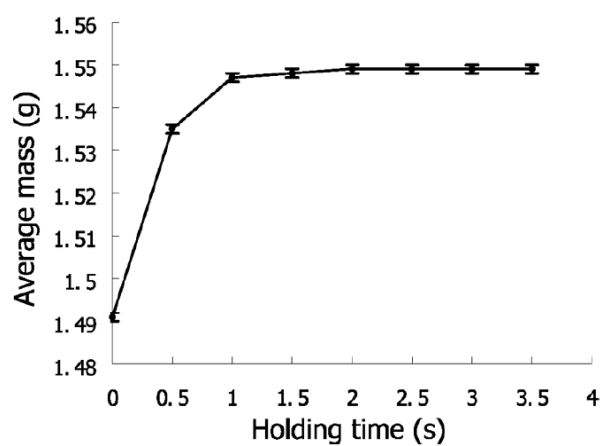


FIGURE 10. VARIACIÓN DE MASA CON TIEMPO DE SOSTENIMIENTO

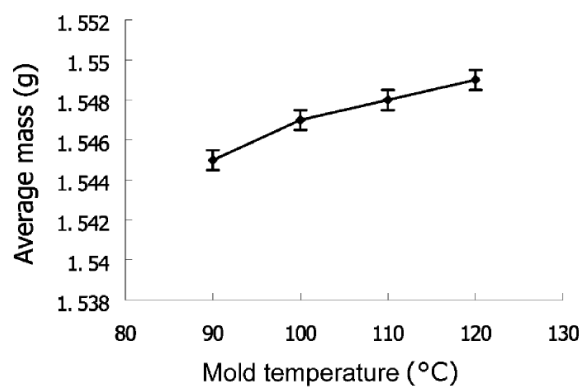


FIGURE 11. VARIACIÓN DE MASA CON TEMPERATURA DEL MOLDE

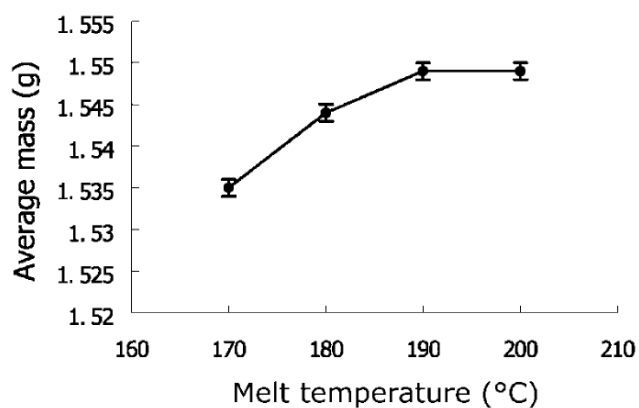


FIGURE 12. VARIACIÓN DE MASA CON TEMPERATURA DE FUSIÓN

2.3 Construcción de moldes

Los moldes para el Moldeo por Inyección de Metal son parecidos a los usados en la inyección de plástico. El molde contiene la cavidad con la forma de la pieza y los canales de alimentación para conducir la mezcla. No obstante, hay una diferencia principal: la construcción del molde en la inyección de plástico cuenta con unas dimensiones de la cavidad prácticamente iguales a las dimensiones de la pieza a obtener, mientras que, en el MIM, sólo la forma es igual, mientras que las dimensiones son mayores. Al final del sinterizado, el volumen de la pieza final tiene sólo el 60÷65% del volumen de la pieza “en verde” ya que se ha eliminado la totalidad del ligante. La pieza después del desligado tiene unas dimensiones moldeadas y una porosidad del orden de 40%. Sin embargo, después del sinterizado la densidad llega hasta 98% de la teórica (2% de la porosidad residual) con unas dimensiones hasta 15% menores. En consecuencia, para construir el molde se ha de realizar el cálculo de la contracción en base a la fracción sólida en la mezcla para estimar las dimensiones de la cavidad. Además, el comportamiento reológico del flujo en el MIM y en la inyección de plástico es diferente debido a las distintas propiedades térmicas y mecánicas del material inyectado. La temperatura del molde en el MIM suele ser elevada (35- 50°C). De no ser así, se produce un cambio brusco de orientación molecular entre la capa solidificada en el contacto con el molde y el interior de la pieza. Este efecto se produce también en la inyección de plástico. Sin embargo, en MIM el efecto es mayor porque la zona donde acaba la capa solidificada suele contener más ligante que polvo. Después del desligado, los poros residuales son mayores y suelen ser el núcleo de grietas posteriores. Se procura que el molde sea de dos piezas, quedando la cavidad su interior. En torno a la cavidad existe un sistema de canales de refrigeración por los que circula el líquido refrigerante. La cavidad está unida con la superficie del molde mediante el sistema de alimentación que consiste en bebedero, corredores y entrada(s).[1]

La fuerza de fricción desarrollada en la fase de desmoldeo del proceso de moldeo por microinyección está determinada principalmente por el acabado de la superficie del molde, que afecta los fenómenos tribológicos que se producen en la interfaz de la herramienta de polímero.[29]

Los resultados de las pruebas experimentales mostraron las fuertes interacciones entre el efecto de la topografía de la superficie del molde y los de los parámetros de proceso que promueven la replicación, como la temperatura del molde y la presión de retención. En particular, a un valor bajo

de la temperatura del molde, la fuerza de eyección es mayor para la topografía micromecanizada, porque la fusión del polímero durante la fase de inyección solo es capaz de replicar los valles más grandes que caracterizan la topografía.[29]

2.3.1 Cavidad

La cavidad es el corazón del molde. Como ya se ha mencionado, la cavidad en MIM tiene la forma de la pieza, pero con unas dimensiones proporcionalmente aumentadas. La relación típica entre las fases sólida y líquida es 60:40. A partir de la densidad final y la densidad teórica del material del polvo, así como de la fracción sólida, la ecuación 1. De contracción lineal y la ecuación 2. Coeficiente de expansión se pueden expresar como:

Ecuación 1. Contracción lineal.

$$Y = 1 - \left(\frac{\Phi}{\rho / \rho_t} \right)^{1/3}$$

Ecuación 2. Coeficiente de expansión

$$Z = \frac{1}{1 - Y} = \dots = \left(\frac{\rho / \rho_t}{\Phi} \right)^{1/3}$$

Por ejemplo, si la densidad final de la pieza obtenida tras el sinterizado es 97,7% de la teórica y la fracción sólida es 60%, la contracción lineal $Y = 15\%$ y el coeficiente de expansión $Z = 1,176$. Por tanto, una dimensión final de la pieza de 10 mm requiere la dimensión de la cavidad de 11.76 mm. Aunque puede parecer sencillo, este cálculo es complicado por factores tales como la segregación de fracciones. Como consecuencia de la segregación, la fracción sólida no es constante en todas las regiones de la pieza. Además, tampoco se puede asegurar que dos piezas de una serie tengan la misma distribución de fracción sólida, lo cual complica mantener las dimensiones dentro de unas tolerancias. El número óptimo de cavidades en un molde depende del tamaño de la serie, el coste del molde, la capacidad de inyección de la máquina disponible, la fuerza de cierre, etc. Hoy en día, en MIM, los moldes suelen incorporar de 1 a 8 cavidades, dependiendo del tamaño de la pieza. La dependencia del número de cavidades y el coste por pieza se muestra en la Figura 10.[1]

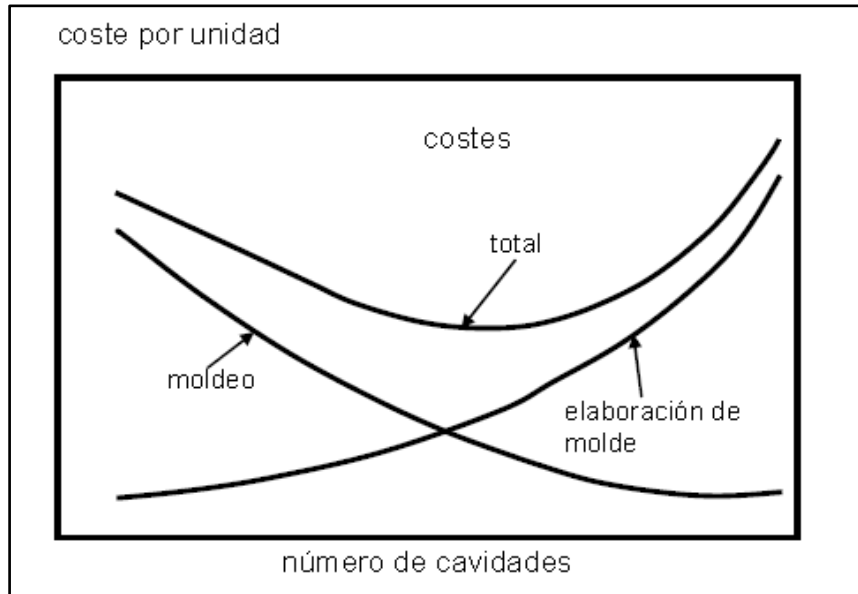


FIGURE 13. VARIACIÓN DE COSTO POR PIEZA EN FUNCION DEL NÚMERO DE CAVIDADES

Análisis de llenado en μ MIM utilizando líneas de soldadura como marcadores de flujo

En el moldeo por inyección cuando dos o más frentes de flujo se encuentran durante el llenado de las cavidades, se crea una imperfección observable como una línea. Este defecto de las piezas moldeadas por inyección se conoce como línea de soldadura. Las líneas de soldadura están influenciadas por la composición del material, el diseño del molde y las condiciones del proceso. [30]

2.3.2 Línea de partición.

La situación de la línea de partición está marcada por la funcionalidad y la aplicación de la pieza. A mayor fuerza de cierre, mayor será la rebaba que a veces colisiona con los requisitos funcionales y ergonómicos. Sin embargo, en MIM, la rebaba contiene mucho más polímero que polvo porque el juego entre las piezas del molde es muy pequeño y detiene la penetración de las partículas de polvo. De ese modo, la rebaba creada entre las partes del molde a lo largo de la línea de partición es menos notable después del desligado de la pieza. Con unas adecuadas tolerancias para el cierre del molde y limitando la presión de inyección se puede evitar la rebaba.[1]

2.3.3 Sistema de alimentación.

El sistema de alimentación está formado por el bebedero, los corredores y las entradas. Hay sistemas de bebedero que se calientan mediante calentadores eléctricos. En éstos la boquilla del equipo de inyección está siempre en contacto con el bebedero, ya que el material del sistema de alimentación no se enfría y se utiliza en la próxima inyección.[1]

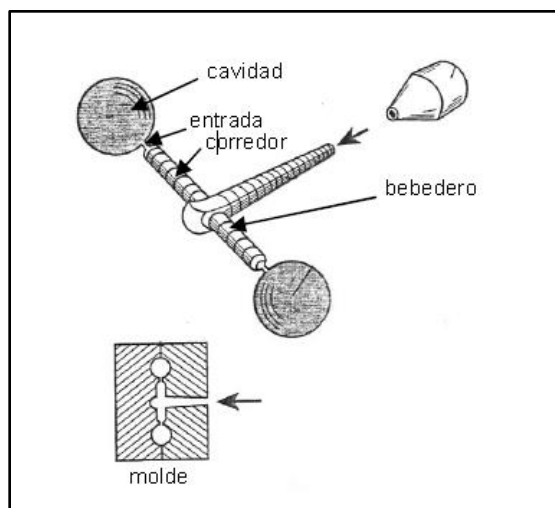


FIGURE 14. BEBEDERO Y CORREDORES

El bebedero conecta la boquilla con el sistema de corredores. Es normal, como se ve en la Figura 11, fabricarlos con un ángulo de despulla de 5° para disminuir la caída de presión. El diámetro estándar del bebedero es de 4 a 6 mm. El punto donde el bebedero conecta con los corredores, suele prolongarse para impedir que la capa solidificada disminuya el paso de la mezcla (Figura 11). Al mismo tiempo, sirve para frenar y albergar las impurezas que arrastra el frente de flujo. Los corredores son la continuación del bebedero y conducen la mezcla directamente a la cavidad. Hay tantos corredores como cavidades. Es deseable que por la pérdida de calor sean cortos, aunque pueden estar calentados (hot runner system) El diámetro de corredores es de 3 a 6 mm. Teniendo en cuenta el fenómeno de la segregación, se intenta, en la medida de lo posible, que los corredores sean rectos. La sección del corredor tiene diferentes formas: circular, trapezoide, cuadrada, etc. (Figura 12).[1]

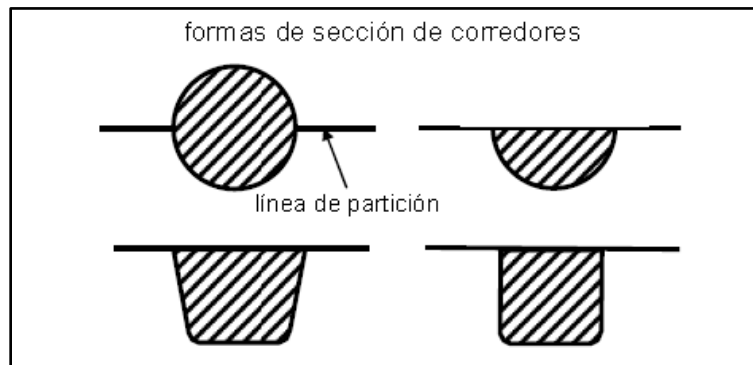


FIGURE 15. TIPOS DE SECCIÓN DE LOS CORRERORES EN PROCESO MIM

En caso de moldes multicavidad, el sistema de alimentación se puede diseñar de varios modos (Figura 13).

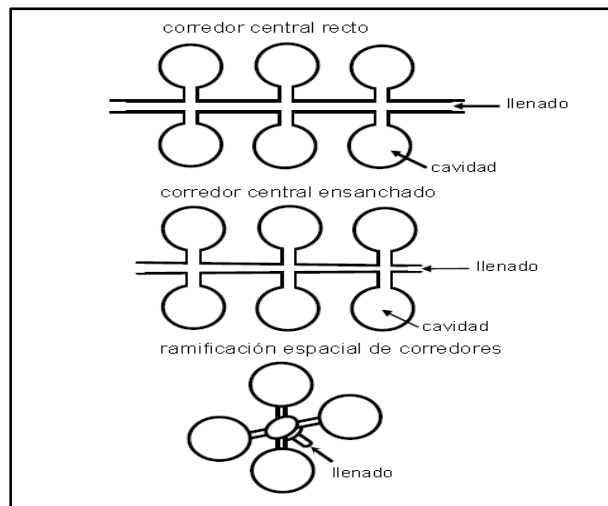


FIGURE 16. TIPOS DE SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN LOS MOLDES

La entrada a la cavidad es el final del sistema de alimentación. De ahí en adelante, la mezcla comienza a llenar la cavidad. Se puede decir que la entrada es la parte de molde más sensible y su diseño es importante desde varios puntos de vista. Una forma o dimensiones inadecuadas pueden causar el efecto de chorreado, el quemado de la mezcla por el cizallado excesivo, etc. Hay varios diseños para las entradas con diámetros de 1 a 4 mm y secciones de 4 a 12 mm². En el fondo, el diseño de la entrada en MIM es similar al diseño de la entrada en la inyección de plástico. Aun así, el tamaño de la entrada en MIM es mayor ya que las tensiones de cizallado son mayores por la naturaleza bifásica. El espesor de la cavidad normalmente establece el tamaño de la entrada para evitar el chorreado (la dimensión vertical de la entrada suele ser 10-50% del espesor). La posición de la entrada también es muy importante, puesto que la mezcla se enfrenta a un gran cambio de sección al entrar en la cavidad. Si al entrar en la cavidad, la mezcla tiene una viscosidad baja, un mal posicionamiento, un tamaño inadecuado de la entrada o una velocidad muy grande, puede causar la pérdida del contacto con la pared del molde y entrar en la cavidad en forma de chorro, plegándose a continuación. Es un efecto negativo porque crea pliegues que en las etapas posteriores del proceso dan lugar a grietas. Una de las soluciones es el llenado progresivo, donde se establece la posición de la puerta para que la mezcla tome contacto con una pared al entrar en la cavidad (Figura 14).[1]

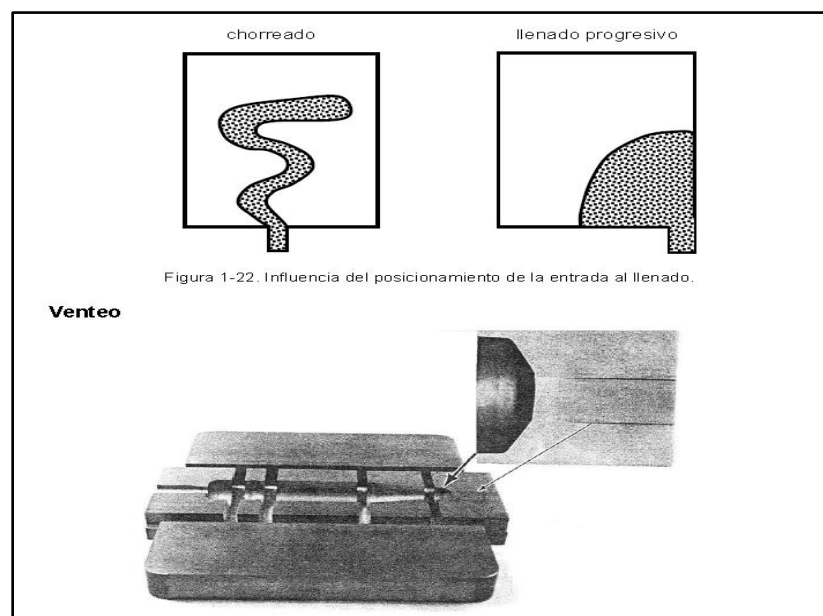


Figura 1-22. Influencia del posicionamiento de la entrada al llenado.

Venteo

FIGURE 17. SOLUCIÓN PARA EL VENTEO

Al cerrar el molde para inyectar la mezcla, la cavidad está llena de aire. A medida que la mezcla progresa por la cavidad, va empujando al aire para desalojarlo. Un venteo apropiado asegura que el aire no quede atrapado en el molde, evitando burbujas y grietas en la pieza. Aún más, si no encuentra salida, el aire se va comprimiendo y aumenta localmente la temperatura provocando quemaduras en la superficie de la pieza. Las concavidades en la superficie o dentro de la pieza y las quemaduras (manchas negras) en la pieza son una señal segura de mal venteo. Típicamente, el venteo es un juego de 0,015mm y 12- 15mm de ancho (Figura 14). A veces el aire puede salir por el juego entre las piezas del molde, aunque un valor exagerado de ese juego puede aumentar la rebaba. Otra solución es la incorporación de cualquier material resistente y poroso en la pared del molde. Los poros de este material deben ser lo suficientemente grandes para dejar escapar el aire, sin permitir la penetración del material inyectado.[1]

2.3.4 Expulsores

La fuerza de expulsión tras el enfriamiento de la pieza depende de muchos factores. Los más importantes son el modulo elástico de la mezcla, el área del contacto entre la pieza y las paredes del molde, el coeficiente de fricción y la contracción térmica. Para disminuir la fuerza de expulsión, se introduce un ángulo de salida de la pieza. En general, es preferible utilizar un mayor número de expulsores de menor superficie porque la fuerza se distribuye mejor por la superficie. El posicionamiento de los expulsores y el movimiento del molde durante la apertura son, como en caso de la puerta, una cuestión de análisis para cada pieza. Cabe destacar que ciertas formas como ranuras y roscas interiores hacen que la expulsión sea más difícil y compleja. En la Figura 15. Se puede ver un sistema de expulsión que, además de expulsar la pieza, recorta la parte enfriada en el sistema de alimentación.[1]

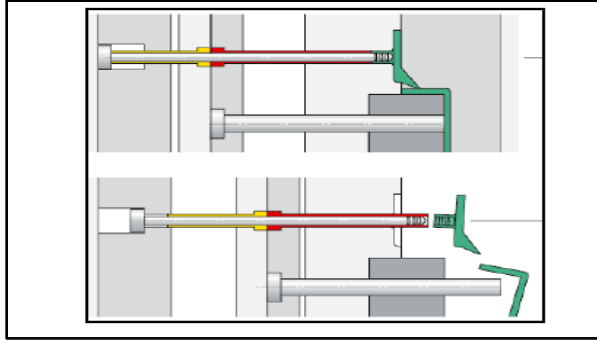


FIGURE 18. SISTEMA DE EXPULSIÓN

2.4 Desligado (Debinded):

La remoción del aglutinante de la pieza verde es un paso clave del proceso y una de los requerimientos que necesita mayor control hay diferentes procesos básicos:

1. Calentar la pieza verde compactada para provocar que el polímero funda, descomponga y evapore. Esto debe ser hecho con gran cuidado para evitar interrupción de la parte moldeada y en esta conexión la composición del aglutinante depende de varios componentes que se descomponen a diferentes temperaturas. El proceso normalmente toma algunas horas. Por lo tanto, este proceso se lleva a cabo por un proceso por lotes. El tiempo requerido para remover el aglutinante depende del espesor de la parte.
 2. La descomposición catalítica del feedstock utilizando gases de ácidos nítricos o ácido oxálico reduce el tiempo para la remoción del aglutinante y el riesgo de la ruptura de la parte.
 3. Un proceso alternativo para la remoción del aglutinante es disolverlo utilizando solvente tales como la acetona, etanol. Algunos aglutinantes son solubles en agua. Normalmente el calentamiento es requerido como paso final para completar la remoción por evaporación.
- [10]

El ligante es el componente sacrificado en el moldeo por inyección, aunque es crítico tanto a la hora del moldeo como de su eliminación. Es el medio utilizado para mantener las partículas unidas con el fin de obtener la forma deseada. Por ello, el ligante no debe condicionar la composición de la pieza final, excepto si se desea que los productos residuales de su eliminación sirvan de aleantes.

La selección previa se realiza no sólo por su viscosidad, contracción en el enfriamiento, compatibilidad interfacial, sino también por la posible contaminación que pueda sufrir el material final durante el proceso.[31]

En la bibliografía aparecen multitud de sistemas ligantes a base polímeros termoplásticos para su utilización en moldeo por inyección de metal, pero apenas existe bibliografía en la que se hayan utilizado resinas de polímeros termoestables, debido principalmente a la dificultad que presentan estas para el reciclado de piezas defectuosas. Únicamente aparecen cuando el entrecruzamiento del polímero se realiza en una etapa posterior al proceso de inyección o el conformado se realiza por un proceso alternativo a la inyección. La mayoría de los ligantes usados son multicomponentes ya que es más fácil la eliminación escalonada de ellos. La cantidad de ligante varía entre el 15 y el 50% en volumen dependiendo de las características del polvo de partida (tamaño, forma y distribución de partículas) y del tipo de ligante. Normalmente la carga crítica se determina obteniendo la gráfica que se presenta en la Figura 16. La cantidad óptima de polvo varía entre un 2-5% por debajo de la carga crítica.[31]

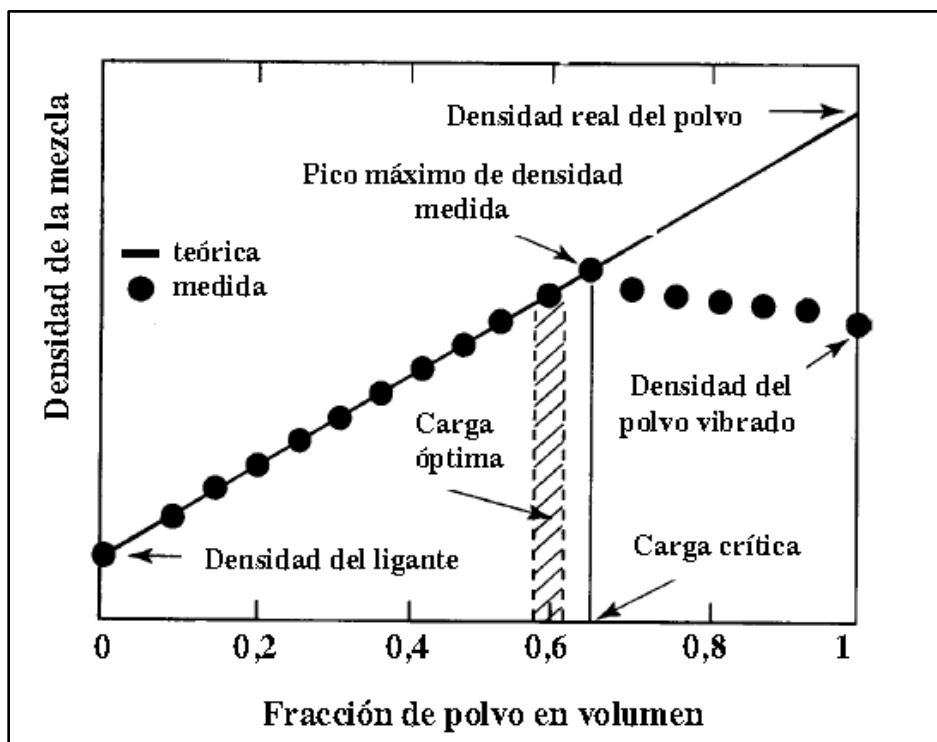


FIGURE 19. DENSIDAD FRENTE A FRICCIÓN DE POLVO

Después del moldeo, la atención se torna hacia el desligado y el aglutinante juega un rol importante en el moldeo. Muchas de las fallas al momento de remover el aglutinante pueden resultar en una distorsión del componente, grietas y contaminación. Remover el aglutinante sin tener problemas de separación de partículas puede resultar complicado y necesita de varios pasos. Es la fase en la que el ligante, que ha servido como vehículo temporal para rellenar el volumen de la cavidad con polvo, es parcialmente eliminado. La pieza sigue teniendo las dimensiones de la pieza “verde”, aunque su estructura presenta una gran porosidad residual debida a la eliminación de la totalidad del ligante que contiene. Como consecuencia, la pieza es muy frágil. Físicamente, esta tercera etapa es un proceso de extracción del conjunto ligante por técnicas de difusión térmicas, disolución o una combinación de dos. Las piezas se calientan despacio por lo que el ligante de las capas exteriores se evapora primero, mientras que el interior de la pieza se funde y migra hacia la superficie donde se evapora.[1]

Según el autor se menciona que la remoción del aglutinante puede constituir hasta 30% o más del peso de la pieza de la cual aproximadamente el 98% es removido en esta etapa del proceso por medio de gas y temperatura, los tiempos y temperaturas pueden variar dependiendo de la composición del aglutinante, los primeros componentes en fundir son las ceras y por último el termoplástico que tiene un punto de fusión más alto el resto del aglutinante desaparecerá en la etapa de sinterizado.[1]

En las industrias actuales de PIM, generalmente se adopta una secuencia de desligado en dos pasos. En primer lugar, los componentes de bajo peso molecular del sistema aglutinante, por ejemplo, cera y ácido esteárico, se eliminan mediante extracción con disolvente, extracción de fluido supercrítico, desligue por capilaridad o desligue térmico a temperaturas relativamente bajas. En segundo lugar, el componente de alto peso molecular del sistema aglutinante, es decir, el polímero, se elimina por desunión térmica a altas temperaturas.[32]

Los resultados de la simulación unidimensional revelaron que hay tres rutas principales para que el polímero interno se escape del compacto durante la eliminación final del polímero residual por desligue térmico. Primero, el polímero líquido es conducido para fluir desde la superficie interna

a la superficie externa del compacto. Posteriormente se evapora de la superficie exterior del compacto hasta que la saturación del líquido del polímero disminuye hasta la saturación de líquido irreducible. En segundo lugar, el polímero líquido se degrada a vapor en el interior del compacto y el vapor de polímero fluye desde la superficie interna a la superficie exterior del compacto debido a la convección y difusión en la fase gaseosa. Posteriormente es eliminado por la corriente de aire atmosférico. En tercer lugar, el vapor de polímero que se disuelve en el polímero líquido fluye desde la superficie interna a la externa del compacto debido a la difusión en el polímero líquido y la convección con el flujo de polímero líquido y luego es eliminado por la corriente de aire atmosférico.[32]

El proceso de eliminación del polímero se puede dividir en tres períodos, es decir, los períodos de velocidad de desligue creciente, alta y decreciente. Durante los períodos de tasas de desligue cada vez mayores y altas, hay dos rutas principales para polímero interno que escapa del compacto. En primer lugar, el polímero líquido es conducido para fluir desde el interior del compacto a las superficies externas donde posteriormente se evapora. En segundo lugar, el polímero líquido se degrada a vapor en el interior del compacto y el vapor de polímero fluye desde las superficies interna a externa por convección y difusión. Posteriormente se elimina de las superficies externas del compacto por la corriente de aire atmosférico. Sin embargo, el efecto de la primera ruta en la eliminación del polímero es más significativo que el de la segunda ruta. El flujo de polímero líquido y vapor de polímero no es uniforme[32]

Más polímero líquido y vapor de polímero escapan de la interna hacia las superficies externas de las vías de paso compactas de menor distancia. El polímero líquido fluye más no uniformemente que el vapor del polímero. El flujo no uniforme de polímero líquido y vapor de polímero da como resultado el desarrollo de porosidad no uniforme en el interior del compacto. Después de que se ingresa el período de disminución de la tasa de extinción, solo queda la segunda ruta para controlar el proceso de eliminación del polímero, ya que la primera ruta desaparece porque la saturación del líquido disminuye hasta la saturación de líquido irreducible. En el período de velocidad de alta desunión, la tasa de desunión no es una constante, y es diferente del período de frecuencia de secado constante bien conocido en la teoría del secado.[32]

Durante la eliminación térmica, el proceso de eliminación del polímero se controla mediante la degradación del polímero y se ve afectado principalmente por el flujo de líquido. El flujo de líquido (redistribución de líquido) está dominado principalmente por flujo forzado a presión en lugar de flujo impulsado por capilaridad. A diferencia de todos los modelos existentes, el presente modelo simula y analiza con éxito el fenómeno de enriquecimiento con polímero líquido en las regiones superficiales externas del compacto que se produce en el proceso de eliminación del polímero. Baja temperatura de desengrase, menor fracción de volumen de polímero en un sistema aglutinante, y un polímero con mayor viscosidad contribuirá a disminuir la presión del gas en la parte interna del compacto y evitará que se produzcan defectos durante la eliminación final del polímero residual de un compacto PIM por desligado térmica.[32]

Las distorsiones producidas en los procesos de desligado se minimizan para una relación en peso de polímeros al total peso de aglutinante de 35%. Cuando se elimina el aire, la eliminación del aglutinante (%) de los materiales compactos MIM disminuye a medida que aumenta la temperatura de desligue debido a la oxidación de los polvos metálicos, y, simultáneamente, las contracciones de los materiales compactos continúan con la temperatura de desligue. Por el contrario, para una afinación en N₂, la eliminación del aglutinante (%) de los comprimidos aumenta a medida que aumenta la temperatura, y, simultáneamente, los compactos muestran una tendencia a hincharse. [33]

Hwang investigó la tasa de desligado por solvente para piezas compactas con diferentes tamaños de partículas. La investigación concluyó que la tasa de desligado es determinada por el espesor de la sección transversal, el tamaño de la partícula no afecta tortuosidad para polvos esféricos. Adicional en la investigación de la carga de polvos, la tasa de desligado fue ligeramente más lento. Con una mayor carga de polvos, la tasa de desligado disminuyó porque la porosidad total y el área de flujo para que el componente aglutinante soluble se difunda, disminuye. Este trabajo tiene como objetivo presentar el trabajo de los autores sobre la investigación de la influencia de la temperatura en la inyección de 316 L de polvos finos y gruesos.[34]

La formulación de Binder juega un papel muy importante en MIM. El componente orgánico es el vehículo de fluidez durante el paso de moldeo y también proporciona la retención de forma durante los siguientes pasos en el proceso global. En general, los sistemas de polímeros termoplásticos son los más estudiados y se utilizan en la industria. El aglutinante de polietileno y cera de alta densidad es uno de los sistemas más simples utilizados en el moldeo por inyección de metal (MIM) .1 Las principales ventajas son el bajo costo, bajo peso molecular y buenas propiedades de lubricación. Habitualmente, los aglutinantes multicomponente, que comprenden polímero y otros aditivos, se preparan porque mejoran el proceso de desglomerado. La principal ventaja de estos aglutinantes es la eliminación gradual de diferentes componentes que previenen las grietas y la pérdida de forma. La combinación de componentes de polímero de bajo peso molecular y diferentes permite una eliminación progresiva a medida que la temperatura aumenta lentamente. Las vías de difusión abiertas por el componente volátil facilitan la eliminación del polímero a temperaturas de descomposición más altas. La ampliación del rango de temperatura de descomposición facilita la retención de forma y la eliminación rápida. [16]

La formulación de la materia prima (mezcla de metal y aglutinante) es uno de los aspectos más críticos debido a sus efectos en cada paso del proceso MIM. Algunos de los principales requisitos de la materia prima son buena fluidez y baja viscosidad, ya que el aumento de la velocidad de corte da como resultado un comportamiento pseudoplástico. El uso de pequeñas cantidades de aglutinante produce una materia prima de alta viscosidad que dificulta el proceso de moldeo, mientras que grandes cantidades de aglutinante proporcionan poca resistencia y pueden producir partes verdes heterogéneas.1 Los aglutinantes utilizados para el moldeo por inyección de M2 HSS suelen ser multicomponentes basados en polipropileno y cera de parafina, poliacetales o diferentes tipos de ceras. [16]

Una atmósfera inerte degradación térmica del vehículo orgánico tiene lugar; pero cuando el oxígeno está presente, la degradación oxidativa y la pérdida preferencial de vehículo orgánico ocurren en la región superficial del cuerpo cerámico mientras que la degradación térmica tiene lugar en el interior. German ha considerado la descomposición térmica del vehículo orgánico en fragmentos de bajo peso molecular que posteriormente pasan a través de los poros vacíos del cuerpo en estado gaseoso. [35]

Se evalúa el tiempo para la eliminación total del vehículo orgánico y se encuentra que es directamente proporcional al cuadrado del espesor de la sección de la moldura. La pérdida de polímero da como resultado un núcleo no degradado que se contrae a medida que el polímero retrocede en el espacio interparticular en preferencia a la creación de nuevas superficies internas de polímero. El resultado es que el radio efectivo (que contiene el polímero) del cilindro disminuye al aumentar la temperatura, pero los coeficientes de difusión permanecen sin modificar. La presión capilar en todo el cuerpo poroso provoca la reordenación del polímero restante de modo que se establece una distribución uniforme de la porosidad. La fracción volumétrica de la porosidad aumenta a medida que el polímero parte y el resultado es una disminución en la resistencia al transporte masivo de productos de degradación, pero el radio permanece sin cambios.[35]

Cuando la presión de vapor del monómero en el polímero excede la presión ambiente, es posible la nucleación de una burbuja en la suspensión cerámica. Es raro que se use un único polímero alto como vehículo orgánico. Los plastificantes, aceites y ceras se agregan universalmente y esto le confiere tres ventajas. En primer lugar, tales productos de bajo peso molecular pueden perderse por evaporación antes de la degradación del polímero, dejando los poros cerca de la superficie o distribuidos por todo el cuerpo. En segundo lugar, una mezcla de diferentes especies o fracciones de peso molecular de una sola especie puede sufrir degradación en un amplio rango de temperaturas, de modo que la curva de pérdida de peso es considerablemente menos pronunciada que las de poli alfa metil estireno. En tercer lugar, la difusión en el polímero puro está fuertemente influenciada por la concentración del difusor, de modo que, a 500 K, en el caso del poli alfa metil estireno, D varía en dos órdenes de magnitud a medida que la concentración de monómero de alfa metil estireno aumenta de cero a 20%. Este es un efecto de volumen libre y especies compatibles de bajo peso molecular añadidas a la mezcla tendrían un efecto similar al difusor.[35]

Los defectos que aparecen durante el desligue térmico afectan la forma de las partes, la microestructura y, como consecuencia, las propiedades finales de los materiales. Por esta razón, es esencial controlar la temperatura, la velocidad de calentamiento y la atmósfera durante el desligue térmico para garantizar la eliminación completa del ligante. El desligue incompleto puede introducir elementos intersticiales que contaminan los materiales y, por lo tanto, afectan las

propiedades mecánicas y magnéticas. De manera similar, la atmósfera de sinterización es esencial para diseñar las propiedades apropiadas de las aleaciones magnéticas blandas.[36]

2.4.1 Eliminación del ligante

Una vez extraída la pieza moldeada, y eliminados los canales de alimentación, el ligante debe ser eliminado del compacto. Esta es la operación más delicada de todo el proceso. Son varios los procesos descritos en la bibliografía para conseguir la eliminación del ligante: algunos se utilizan por sí solos y otros únen varios de los procesos para conseguir una mejor eliminación. Es la etapa más crítica del proceso porque es donde más defectos se pueden producir en el procesado de las muestras.[31]

2.4.2 Degradación térmica.

Constituye el principal método para la eliminación de los ligantes ver figura 17. La degradación térmica pasa por tres estados básicos. Durante los primeros estados del calentamiento se produce una expansión térmica del líquido del ligante inducido por la presión hidráulica. Cuando la temperatura aumenta el ligante se va eliminando por efecto de la evaporación desde las superficies. Cuando el nivel de saturación del ligante se ha reducido lo suficiente el líquido remanente en la mezcla asciende hacia la superficie por capilaridad, donde puede evaporarse. El ligante eliminado deja una red de poros interconectados por donde puede continuar la salida del polímero que queda en el interior del compacto, y a su vez puede entrar el gas del exterior. Si la eliminación se produce en atmósfera de aire, las reacciones pueden producirse a través de estos canales.[31]

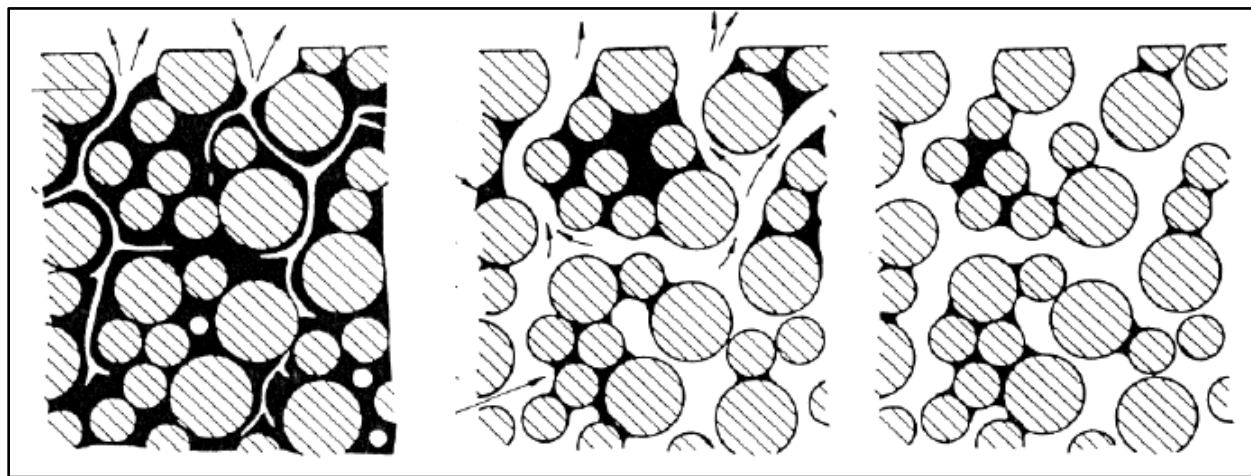


FIGURE 20. PROCESO DE ELIMINACIÓN TÉRMICA DEL LIGANTE

Con la eliminación del ligante se pueden producir dos situaciones diferentes: que la eliminación se produzca en la superficie o interface entre el ligante y la atmósfera, o bien que se produzca en todo el volumen del material. Si ocurre la primera situación va eliminándose progresivamente el ligante por la reacción con la atmósfera. Si por el contrario domina la segunda situación, lo que puede ocurrir es que se produzca la delaminación y formación de fisuras en el interior de las piezas. La eliminación térmica puede ayudarse de sistemas con baja presión, es decir sistemas con una bomba de vacío usada para ayudar a evacuar el gas generado de los compactos. La sublimación por vacío de los ligantes está limitada a sistemas con moléculas pequeñas, como agua o anilina. La ventaja principal es que normalmente se elimina el ligante mientras se sube hasta la temperatura de sinterización con lo que no es necesario enfriarlos y manipularlos hasta que se termina la sinterización. Las desventajas son que es un proceso relativamente lento, el equipamiento es caro, y puede ocurrir que el polímero funda a temperaturas inferiores a las de reacción de los componentes y pudiendo producirse distorsiones de las piezas.[31]

2.4.3 “Wick debinding” o extracción capilar.

Este término se usa cuando la eliminación del ligante polimérico se ayuda de un efecto de capilaridad. Este método se basa en la colocación de las piezas, a las que se les quiere eliminar el ligante, recubiertas de una capa de polvo fino, que no sea reactivo, normalmente alúmina, que extrae el ligante una vez el compacto se ha calentado y el polímero este líquido. Puede realizarse completamente o parcialmente, y continuar con una técnica diferente, por ejemplo, por degradación térmica o por desgasificación del ligante remanente. La razón fundamental para el funcionamiento de esta técnica es que, en teoría, y en la práctica, los procesos de flujo capilar son rápidos hasta un punto conocido como de “saturación irreducible”, donde las bolsas desconectadas de líquido remanente forman puentes atraídas por las partículas de metal sólido. Este ligante que queda pegado ha de eliminarse por degradación térmica con o sin desgasificación. Por tanto, lo que este proceso tiende es a reducir el proceso de eliminación del ligante, presentando un resultado de interés económico.[31]

2.4.4 Extracción con disolventes.

La extracción por inmersión en disolventes, por exposición a vapores disolventes o a disolventes condensados, requiere que alguno de los componentes del ligante sea insoluble en el disolvente y que no se produzca hinchamiento de este. Los disolventes típicos más usados son dicloroetileno, hexano, heptano, o tricloroetano y son calentados para aumentar su capacidad disolvente. Para mantener una baja concentración del ligante en el disolvente este debe ser limpiado por extracción. La porción insoluble del ligante mantiene unidas las partículas del sólido tras la inmersión, mientras el compacto se seca. El esqueleto de polímero se elimina posteriormente por degradación térmica. Los defectos típicos asociados a este tipo de proceso son el hinchamiento y la aparición de fisuras superficiales producidas después de la eliminación del componente soluble como consecuencia de un secado excesivamente rápido.[31]

2.4.5 Eliminación supercrítica.

Los ligantes basados en ceras pueden ser eliminados supercríticamente. El método consiste en utilizar un fluido por encima del punto crítico. Este método se usa en la industria química y alimenticia para extraer componentes orgánicos, y posteriormente esta aplicación se ha llevado a la extracción de ligantes en PIM. Este método también se aplica en cromatografía líquida para analizar componentes orgánicos. Un ciclo típico consiste en calentar el compacto en atmósfera de dióxido de carbono a una presión de 25-30 MPa. Durante la extracción, el ligante es condensado en el exterior en una zona fría.[31]

2.4.6 Eliminación catalítica.

Es una combinación de los procesos de eliminación térmica y eliminación con disolventes. La reacción depende de la entrada a través de los poros de un vapor que cataliza la reacción, y la salida a través de los poros de los productos de la descomposición. La eliminación catalítica normalmente se realiza para sistemas ligantes a base de poliacetales, como polióxido de metileno (POM), e introducidos en el mercado por BASF. La temperatura de la reacción y la concentración del catalizador determinan la velocidad de eliminación del ligante, que normalmente es de unos 2 mm/h. Otros autores eliminan los poliacetales por despolimerización térmica en aire a

temperaturas aproximadas. La temperatura de descomposición puede reducirse hasta 110-135°C mediante la introducción de 0.1-0.5% vol. de un ácido en forma de gas. La eliminación se realiza en reactores especiales que se muestran en la Figura 17 donde se introduce un flujo de gas (normalmente nitrógeno) y de ácido (normalmente nítrico o acético muy controlado), y a la salida se combinan los productos de reacción con oxígeno y un gas de combustión para producir el quemado de los gases, lo que proporciona un gas de salida muy limpio.[31]

La separación polvo-aglutinante durante el moldeo por inyección causa defectos tales como agrietamiento, alabeo o contracción anisotrópica durante la cocción.[36]

TGA y DSC se pueden usar para determinar el contenido de aglutinante de las tecnologías polvo-aglutinante, la homogeneidad de la materia prima en polvo de metal. Se comparó la sensibilidad del uso de TGA, DSC y picnómetro para medir el volumen sólido de la materia prima en polvo metálica y que estos métodos se pueden usar para medir los efectos de la segregación dentro de la materia prima. El método TGA también se puede usar para detectar la distribución punto a punto y la segregación del polvo metálico en las partes verdes, como se demostró.[36]

Los beneficios adicionales del uso de TGA y DSC son los siguientes para el proceso de desligado e inyección. Al observar la pérdida de peso de los aglutinantes durante el quemado del aglutinante en una TGA, se puede determinar y refinar los parámetros del proceso de desligue térmico, los cuantos como la temperatura de mantenimiento y la duración. El peso residual del TGA después del agotamiento determina el contenido de polvo en las muestras. Cualquier ganancia de peso que pueda ocurrir se registrará durante los experimentos que ayudan a la determinación de los parámetros de proceso óptimos para el disolvente y el desligue térmica. Se ha demostrado que las propiedades térmicas, los cuantos como el calor específico y el calor de fusión de la materia prima en el polvo metálico, se determinan por la fracción en el volumen de polvo y aglutinante. Se puede determinar el uso del DSC, los puntos de reblandecimiento, el calor de fusión, la capacidad calorífica específica de los aglutinantes y la materia prima, y esto puede usarse para identificar las temperaturas adecuadas de la composición y el moldeo.

Con los experimentos de TGA, el contenido de polvo en la materia prima o en la barra de prueba está determinado por la fracción de peso restante de las muestras. La fracción volumétrica del

polvo se determina usando la regla de mezcla y las densidades medidas del polvo y del sistema aglutinante. El TGA revelaría las curvas de pérdida de peso y la temperatura de descomposición de los componentes del aglutinante. Esta información puede usarse para la temperatura de mantenimiento durante el desligue de los cuerpos verdes.[36]

La suposición de este método es que el polvo de metal tiene menor calor de fusión en comparación con los aglutinantes, por lo tanto, un aumento en la carga de sólidos disminuiría el calor de fusión de la materia prima. Este estudio investiga los datos de calor de fusión del sistema de aglutinante en lugar de cada componente de aglutinante para determinar la fracción de volumen de polvo.[36]

La distribución uniforme del contenido de polvo en un compacto verde moldeado por inyección es importante para evitar los defectos que se producirán durante el desligue y la sinterización. La distribución desigual hace que la expansión térmica dentro de los compactos verdes varíe, durante la descomposición térmica y la densificación los compactos verdes experimentan una contracción anisotrópica que conduce a grietas y alabeos en las partes marrones y partes sinterizadas. La capacidad de medir la distribución del polvo dentro de los compactos verdes permitirá la detección temprana de defectos y ayudará en la optimización del proceso de moldeo por inyección. [36]

2.5 Sinterizado:

Sinterizado es un proceso de calentamiento en el cual partículas separadas se fusionan y provén la fuerza necesaria para el acabado del producto. El proceso es con horno de atmósfera controlada, algunas veces en vacío a temperaturas por debajo del punto de fusión del metal. Sinterizado en MIM es sustancialmente el mismo utilizado en las partes tradicionales hechas por el proceso PM. La atmósfera es controlada para evitar la oxidación del metal, la atmósfera utilizada es generalmente reducida.[10]

La integridad estructural de un proceso de metalurgia de polvos proviene del sinterizado, el cual es un tratamiento térmico para fundir las partículas en una masa sólida. Este es un paso necesario una vez que se ha extraído el aglutinante. Poros son eliminados como parte de la unión de las partículas durante el sinterizado a alta temperatura. Consecuentemente, el componente sufre una

contracción que provoca una reducción en las dimensiones. El sinterizado ocurre casi a la temperatura de fusión del material. La unión de las partículas ocurre por el movimiento individual de los átomos a través del estado sólido o en la fase líquida. El movimiento atómico ocurre tan rápido como el incremento de la temperatura. La temperatura de sinterizado varía dependiendo del material que se esté procesando, por ejemplo, los aceros son sinterizados cerca de los 1,250 grados centígrados, cobre cerca de los 1,045 grados centígrados. En materiales MIM, sinterizado es medido por la densidad de compactación, la cual incrementa debido a la contracción, así como la eliminación de poros. La evolución de la microestructura es un factor primario para determinar las propiedades. La unión en el sinterizado es evidente cuando las partículas están en contacto.

Hay dos posibles puntos de inicio en el sinterizado: el primero es el desligado, tiene que dejar un poco de aglutinante para asegurar la conservación de la forma hasta llegar a la temperatura de sinterización. Por otro lado, el desligado puede tomar el 100% del aglutinado, pero agregando un presinterizado que asegure la forma de la pieza.[1]

Las propiedades mecánicas dependen principalmente de la densidad y microestructura de sinterización. Sin embargo, los parámetros de proceso del moldeo por inyección no deben descuidarse. Esta investigación mostró que se pueden obtener las propiedades mecánicas apropiadas de los productos MIM. Sin embargo, se reducen drásticamente si se seleccionan condiciones de moldeo por inyección y sinterización inapropiadas. Un proceso incompleto produce carbono residual, lo que dificulta la sinterización. La sinterización al vacío a alta temperatura provoca la evaporación de elementos volátiles (cromo, manganeso), lo que resulta en una porosidad aumentada cerca de la superficie. La formación de una fase sigma dura y quebradiza se controla mediante la velocidad de enfriamiento después de la sinterización. [13]

Las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y el alargamiento, de los compactos MIM de desligue en el aire son mucho más altos que los desligues en N₂. La dependencia de esas propiedades mecánicas en la temperatura de desligado se corresponde con la tendencia de la densidad relativa de compactos frente a la baja de peso molecular. Los constituyentes del peso se evaporan sin degradación molecular. Si están presentes polímeros de alto peso molecular, estos se someten a una escisión de la cadena y los productos de descomposición se difunden a la superficie y se evaporan. [33]

La parte marrón producida conserva su forma debido a la fricción entre las partículas de polvo de metal. Esta parte es muy quebradiza y necesita ser sinterizada cuidadosamente para lograr su densidad final y las propiedades mecánicas, químicas y dimensionales deseadas. Las propiedades finales del producto se pueden mejorar aún más con tratamientos térmicos. [13]

Las propiedades mecánicas de las partes sinterizadas pueden diferir en gran medida, aunque se utilice el mismo material. Las principales razones son las condiciones de sinterización inadecuadas, el tamaño de los poros y los granos, las impurezas, la composición química, los defectos después de la sinterización y la densidad de sinterización. [13]

Una elección inadecuada de material para los soportes, una desintegración incorrecta del aglutinante en carbono residual, la atmósfera, una tasa de calentamiento demasiado alta y temperaturas de sinterización (evaporación de Cr, Mn y Si), impurezas y una velocidad de enfriamiento demasiado lenta, mejorando la formación de la fase sigma, reduce drásticamente las propiedades mecánicas de las piezas sinterizadas. [13]

Las características de sinterización y distorsión de una aleación maestra para 17-4PH se exploraron previamente con el objetivo de investigar la difusión de los elementos de aleación en las barras de prueba sinterizadas. La densidad aparente de la aleación maestra mezclada y el polvo de Fe carbonilo fue mayor que la de cada componente. Esto se debe al hecho de que el tamaño de partícula del polvo de carbonilo Fe, típicamente -5 m, era significativamente más fino que el polvo de aleación principal atomizado por gas. Las partículas de Fe de carbonilo llenan los huecos entre el polvo de aleación principal de manera eficiente, lo que dio como resultado una densidad de toma aumentada y, en última instancia, debería mejorar la densidad del material sinterizado. El análisis de rayos X de dispersión de energía (EDX) para la aleación maestra 17-4PH también se usó para mapear la distribución de los principales elementos de aleación Cr, Ni y Cu, así como el elemento base Fe. Los mapas EDX mostraron claramente que, para las microestructuras pre-sinterizadas, los elementos de aleación se concentran en la aleación madre y el polvo de carbonil Fe se distingue fácilmente de la aleación principal. La sinterización se produjo en las barras de aleación maestra a un rango de temperatura significativamente más bajo (800_C a 1075_C) que las barras pre-aleadas. El rango también corresponde al inicio de la difusión de la aleación, que prácticamente se completa con 1000_C. Los mapas EDX mostraron visualmente que el Fe se distribuye homogéneamente en las partes sinterizadas. La sinterización produjo una microestructura homogénea con una

composición química dentro de los límites estándar para 17-4PH, lo que indica que la difusión de la aleación se completó después de la sinterización. Las barras de aleación maestra se sinterizan casi hasta la densidad total con una microestructura similar al material pre-aleado. [15]

Parámetros de sinterizado de un SS316L producido por atomización de agua y moldeo de inyección han sido optimizados para obtener la mejor densidad de sinterizado. La matriz orthogonal de Taguchi fue utilizado en el experimento mientras la temperatura de sinterizado, tiempo sinterizado, tasa de calentamiento y enfriamiento fueron seleccionados como factores que influyen la densidad de sinterizado. El ambiente de sinterizado fue en vacío, cuatro réplicas fueron hechas para cada ensayo. El análisis de varianza muestra que el nivel de confianza para el experimento fue 99.5% ($\alpha = 0.005$) y todos los factores son altamente significantes para la densidad de sinterizado a una $\alpha = 0.005$. El estudio concluyó que la tasa de calentamiento tiene la mayor influencia para la densidad de sinterizado (41.29%) seguido por la temperatura de sinterizado (31.60%), tiempo de sinterizado (11.13%) y tasa de enfriamiento (11.10%). La densidad óptima de sinterizado obtenida es 98.48% de la densidad teórica y los parámetros óptimos han verificado que la densidad de sinterizado obtenida está en el rango de confiabilidad.[37]

En esta fase, la pieza “en verde” desligada se sinteriza. El sinterizado elimina la porosidad, produciendo una contracción que da lugar a una pieza de alta densidad y propiedades mecánicas, preparada para su función. Después de la contracción, las piezas quedan con sus dimensiones reducidas. Si la relación de la fracción sólida y la líquida es igual en todas las zonas de la pieza, la contracción será homogénea y la pieza mantendrá su forma. En caso contrario, la pieza sufrirá deformaciones. El sinterizado tiene lugar en el horno de sinterizado, con una temperatura de orden de 1000°C (por ejemplo, entre 1,120 y 1,350°C para acero inoxidable). Cabe destacar que las dimensiones de la pieza final y de la pieza “en verde” difieren significativamente por la variación del volumen de la pieza debido a la extracción del ligante. Las dimensiones del molde en MIM se calculan en base a la fracción sólida y la fracción líquida.[37]

La temperatura de sinterización afecta la densidad y la microestructura del material. La densidad y la distribución de la porosidad son factores clave que afectan las propiedades magnéticas y

magnetoelásticas de las piezas MIM. Cuando la temperatura de sinterización aumenta, la porosidad disminuye y el tamaño de grano se vuelve más grande.[38]

La sinterización de alta densidad del acero inoxidable de endurecimiento por precipitación, como el 17-4 PH, implica una combinación de temperatura relativamente alta ($> 1350^{\circ}\text{C}$) y un tiempo de sinterización prolongado. En este estudio, se investigó el efecto de la adición de FeB sobre las características de sinterización del acero inoxidable 17-4 PH. Se promueve la adición de boro para obtener aceros sinterizados muy densos. La cantidad de boro juega un papel en la determinación de la microestructura y propiedades sinterizadas. Con la mayor cantidad de FeB, la densidad sinterizada y la resistencia a la tracción aumentan mientras el tiempo de sinterización y la temperatura disminuyen. [18]

La sinterización es crítica para determinar la calidad final de las piezas producidas por MIM. Debido a que la alta densidad sinterizada es imprescindible para obtener buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, lograr una densidad total o casi total ha sido un objetivo principal de la sinterización. Por lo tanto, la mayoría de las investigaciones sobre sinterización de acero 17-4PH hasta la fecha se han centrado en el comportamiento de sinterización de las piezas moldeadas a las altas temperaturas de sinterización de $1300\text{-}1350^{\circ}\text{C}$. Se ha prestado muy poca atención a lo que sucede a baja temperatura.[39]

Después de sinterizar a 650°C y 750°C durante 3 horas, no había aparente vinculación entre las partículas en las muestras, lo que sugiere que estas temperaturas eran demasiado bajas para producir una densificación medible.[39]

La sinterización de la materia prima de acero inoxidable 17-4PH en la atmósfera N_2 / H_2 dio como resultado la oxidación de cromo para formar Cr_2O_3 , lo que condujo a ganancias de peso en las muestras sinterizadas, muy probablemente debido a la existencia de oxígeno residual en la atmósfera después de purgar con nitrógeno.[39]

- La oxidación progresó con el aumento en la temperatura de sinterización, como se ejemplifica por las ganancias de aumento de peso a temperaturas más altas, principalmente debido a la cinética de reacción incrementada.[39]

Varias investigaciones han usado boro como aditivo de sinterización para lograr la densidad sinterizada en aceros inoxidables a temperaturas de sinterización de los amantes. La alta densidad es imprescindible para mejorar la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas en todas las piezas de PM. Los poros residuales en el acero inoxidable sinterizado disminuyen las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Las adiciones de boro como FeB y Fe₂B al hierro dieron como resultado una mayor densificación en comparación con el boro cristalino o amorfo. Toennes y German demostraron que la densidad total y una mejora notable en las propiedades mecánicas se obtuvieron mediante la adición de 200 ppm de boro al acero inoxidable martensítico. [18]

El proceso MIM de tungsteno ultra fino y su polvo de aleación se ha aplicado para fabricar varias piezas en diferentes campos de la industria. Los beneficios más obvios de usar el proceso MIM con polvo ultra fino se resumen como la mejora de la sinterización, la reducción de la temperatura de sinterización, el aumento de la densidad final y el suministro de una microestructura homogénea.[40]

Después de la eliminación, puede haber algo de materia orgánica restante, dispersantes y algunos fragmentos de polímeros, que pueden eliminarse rápidamente mediante pirólisis a 600 ° C en la primera etapa del proceso de sinterización. Se mantendrá una gran cantidad de carbono en las partes sinterizadas si se utilizan velocidades de calentamiento más rápidas. Esto se debe a que la sinterización ocurre antes de que todos los componentes orgánicos hayan sido eliminados de la parte. Por estas razones, se usaron los siguientes parámetros de sinterización. Primero, la parte de rebose se calentó desde la temperatura ambiente de 25 °C a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 7 °C / hora, luego se mantuvo durante una hora a 600 °C. La pieza se calienta desde 600 °C hasta la temperatura de sinterización y se mantiene durante una hora. Después de eso, la parte sinterizada se enfrió de forma natural en el horno hasta la temperatura ambiente. La

sinterización se realizó en un horno CMtube bajo un nivel de vacío de 1,07 Pa. Se realizaron sinterizaciones a 1200 °C, 1250 °C y 1300 °C. [41]

La sinterización a diferentes temperaturas se realizó al vacío. Durante la sinterización, los poros y el tamaño de poro se redujeron a medida que la temperatura de sinterización aumentaba de 1,200 °C a 1,300 °C. Los poros aislados en el grano a 1,300 °C impiden una mayor densificación. La medición del nanoindenter mostró que las diminutas dimensiones no tenían influencias significativas en las propiedades mecánicas de las microestructuras sinterizadas. [41]

Los efectos de la temperatura de sinterización y el tiempo en los granos se examinaron para las estructuras microsize. Generalmente el tamaño del grano aumentaba al aumentar la temperatura o el tiempo. A 1,200 °C (0,87 Tm), un tiempo de sinterización de 60 min produjo un considerable crecimiento de grano. Se obtuvo un tamaño de grano promedio de 26.5 µm para las estructuras microsize, que era más de diez veces el tamaño de partícula promedio original de 2.37 µm. Con el aumento de temperatura (hasta 1,330 °C), el tamaño de grano promedio de las estructuras microsize es mayor que el radio de las estructuras microsize, que está por encima de 50 µm. [42]

La tasa de sinterización aparentemente disminuye debido a la transformación de austenita aún retenida en ferrita delta en el rango de temperatura 1,365-1,425u°C. Por encima de esta temperatura, la velocidad de contracción aumenta rápidamente debido al contenido líquido incrementado. De esto se puede concluir que la temperatura óptima de sinterización máxima es y 1,365u°C, donde la tasa máxima de sinterización se obtiene con una cantidad relativamente pequeña de fase líquida. [43]

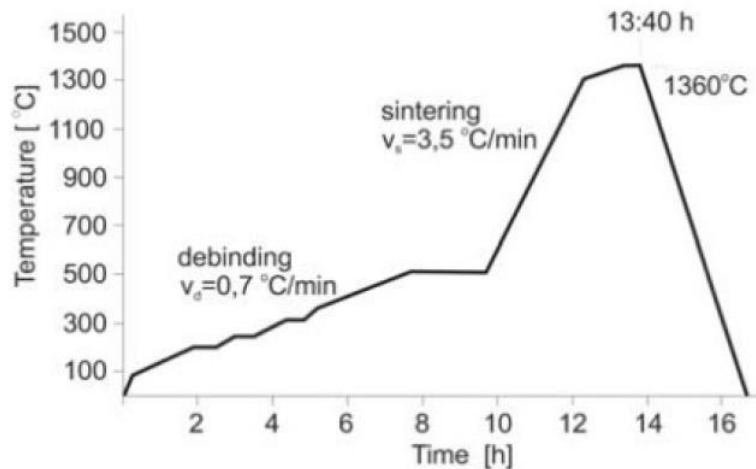


FIGURE 21. CICLO TÉRMICO DE DESLIGADO Y SINTERIZACIÓN

Dimensiones y encogimiento en partes sinterizadas.

En promedio, la contracción después de la sinterización fue entre 13 y 13.5%. Normalmente, la contracción de sinterización puede controlarse mediante los parámetros de sinterización, pero a expensas de las variaciones de densidad y propiedades mecánicas. Es muy importante que las desviaciones de contracción ya estén minimizadas durante el proceso de moldeo por inyección. Los parámetros de moldeo por inyección inapropiados pueden aumentar enormemente las desviaciones de contracción después de la sinterización. El consejo general con respecto a los parámetros de moldeo por inyección es el siguiente: alta presión, temperatura del molde y la masa fundida, tiempo de enfriamiento suficientemente largo, etc. Las mayores desviaciones de contracción aparecieron cuando la cavidad no se llenó correctamente (1%), mientras que la más baja las desviaciones fueron 0.3%. Los parámetros óptimos de moldeo por inyección disminuyeron enormemente las variaciones de contracción después de la sinterización. Los parámetros óptimos de moldeo por inyección durante los presentes experimentos fueron los siguientes: presión de mantenimiento de 50 MPa, temperatura del molde de 40 uC, temperatura de fusión de 200 uC, velocidad de inyección de 40 mm s⁻¹ y un tiempo de enfriamiento suficientemente largo. [43]

Las densidades sinterizadas de los compactos en el aire aumentan con el desligado de la temperatura de extinción hasta 350 ° C, mientras que disminuyen bruscamente para componentes de desligado temperaturas más altas. Por otro lado, las densidades sinterizadas de los componentes

de desligue N₂ son casi independientes de la temperatura de desligado, y muestran valores considerablemente más bajos en comparación con el desligado del aire. Las densidades sinterizadas de los compactos MIM tienen una tendencia a aumentar ligeramente con un aumento en el contenido de polímeros en el aglutinante.[33]

Predijeron la distribución de esfuerzos en una estructura de dos capas que consistía en una capa de alta densidad y una capa de baja densidad, y descubrieron que una región altamente estresada entre dos capas producía un agrietamiento del borde durante la sinterización. Sin embargo, la distribución de densidad en cuerpos verdes MIM era más compleja que la de estructuras graduadas o estructuras de capas. Por lo tanto, la predicción de la distribución de tensiones en los compactos MIM depende en gran medida de la precisión de las variaciones de densidad inicial en el cuerpo verde.[11]

El efecto gravitatorio produjo una contracción desigual en la dirección del espesor, pero el efecto fue leve. Sin embargo, el efecto puede ser significativo cuando la parte era compleja y tenía una estructura hueca. Cuando la distribución de densidad verde no era homogénea, la contracción de las regiones no era uniforme, lo que resultaba en tensiones internas.[11]

La densificación de las regiones depende no solo de la densidad inicial, sino también de la evolución de las tensiones internas durante la etapa de sinterización. La predicción de contracción es importante para controlar la precisión dimensional de las piezas MIM.[11]

2.6 Post procesado:

Esta última fase, no siempre necesaria, consiste en un conjunto de operaciones finales que pueden aplicarse para modificar las características definitivas de la pieza (por ejemplo, su estado superficial). Después del sinterizado, la pieza tiene altas propiedades mecánicas que suelen ser superiores a las de las piezas obtenidas por otros procesos. Se han de mencionar procesos de acabado como la impregnación, la densificación y el tratamiento térmico. En la Tabla 2 se pueden ver los parámetros típicos en el Moldeo por Inyección de Metal para distintas etapas del proceso. Aunque estos valores dependen del tipo de material, la forma de partículas y complejidad de la pieza, los valores mostrados son los más habituales.[1]

TABLE 2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS EN MIM

Parámetro	Valores típicos
Tamaño de partículas [μm]	0.1 + 20
Relación fracción líquida – sólida [%]	40 ÷ 50
El tiempo de llenado [s]	0.1 + 0.4
Temperatura de moldeo [$^{\circ}\text{C}$]	100 + 180
Temperatura de molde [$^{\circ}\text{C}$]	35 + 50
Presión de inyección [MPa]	15 + 30
Presión de sostenimiento [MPa]	< 10
Temperatura de desligado [$^{\circ}\text{C}$]	100 + 600
Tasa de desligado [$^{\circ}\text{C}/\text{min.}$]	1 + 3
Temperatura de sinterizado [$^{\circ}\text{C}$]	1100 + 2000

2.7 Capacidades del proceso MIM

Indudablemente, las ventajas del proceso MIM son grandes. Aún así, el proceso tiene sus límites. Se puede afirmar como norma general que las formas viables para la inyección de plástico serán un buen punto de comienzo para MIM. En cuanto a las ventajas principales se pueden destacar las siguientes:

1. En el caso de las formas sencillas, macizas y gruesas, MIM no puede competir con el sinterizado por compactación, ni tampoco con el mecanizado convencional. MIM es superior a sus rivales en el campo de piezas pequeñas y complejas, que son muy costosas para el mecanizado convencional y muy complejo para el sinterizado convencional.
2. MIM supera al mecanizado convencional en el campo de metales difíciles de procesar por su dureza, alto punto de fusión, etc. así como en el campo de metales caros, donde la posibilidad de reutilizar el material que ofrece MIM es su ventaja esencial.
3. Una alta productividad de piezas que, combinada con su complejidad de forma, es la combinación en la que MIM es más competidor que sus rivales.[1]

Las recomendaciones sobre los límites de dimensiones en MIM indican un valor máximo de 100 mm en las dimensiones mayores de la pieza, espesores máximos de 10 mm y un volumen inyectado inferior a 100 cm³. Sin embargo, se han conformado piezas de dimensiones hasta 350 mm y espesores hasta 30 mm, pero, en esos casos el control y las condiciones de trabajo son muy específicos. Como norma general, las tolerancias obtenidas en MIM son ± 0.3 % de la dimensión (Tabla 3), aunque, el efecto de la segregación de fracciones puede perjudicar las tolerancias y disminuir el índice del proceso. Un factor que suele ser limitante son los costes de la producción del polvo. Las partículas de polvo que se utilizan en MIM son de 20 μ m de diámetro medio y una distribución gaussiana. Estas partículas deben tener un estado superficial adecuado y los procesos para su elaboración pueden incrementar el coste de la serie de piezas significativamente.[1]

TABLE 3. LÍMITES DIMENSIONALES Y DE TOLERANCIAS EN MIM

Parámetro	Valor típico (recomendado)
Dimensión máxima [mm]	< 100
Espesor [mm]	0.25 ÷ 10
Volumen de inyección [cm ³]	< 100
Tolerancias [%]	± 0.3

Capítulo 3. Desarrollo, resultados experimentales y Conclusiones.

3.1 Diseño y construcción de prensa neumática

El equipo fue construido para simular el proceso de moldeo de una máquina convencional con el cual se podrá simular el ciclo de inyección manejando tres parámetros que es la presión de inyección, tiempo de sostenimiento y temperatura de trabajo.

3.2 Molde:

Se fabricaron dos cavidades para formar la pieza, el molde consta de una cavidad inferior y superior, la pieza fabricada en el molde es un cilindro esto debido a que la construcción y el flujo de material fue mas sencillo, también cuenta con un bebedero por donde se introduce el material a la cavidad. Se instaló una resistencia para mantener la mezcla en estado líquido mientras se inyecta el material.

Prensa:

La prensa consta de una placa de aluminio como base y una estructura de aluminio que sostiene un pistón neumático que comprime la mezcla dentro de la cavidad, adjunto al pistón esta un cañón donde se coloca la mezcla del material para ser fundido. Para mantener la presión estable en la prensa, se colocó un manómetro y un regulador para mantener una presión constante.

Manómetro

Se colocó un manómetro para controlar la presión de aire que se suministra al pistón para controlar la velocidad de inyección.

3.3 Proceso de moldeo

Los parámetros de moldeo se determinaron de acuerdo con las propiedades reológicas de la muestra, el material es una combinación de componentes tales como polipropileno (PP), Cera (Parafina), Ácido esteárico y polvo metálico (Acero Inoxidable 17-4). Para efectos de la experimentación, se tomó como referencia el punto de fusión del polipropileno, ya que la cera y el ácido esteárico tienen menor punto de fusión. Cabe señalar que el punto de fusión del acero inoxidable 17-4 es muy alto por lo tanto no se considera este valor, ya que el objetivo de la prueba es empacar este material en la cavidad, no fundirlo.

El material virgen hasta 15 moliendas se vierte en el cañón de la prensa después se coloca en el pistón y el molde, se enciende la resistencia y se ajusta la temperatura para fundir la muestra, luego se activa el pistón ajustando la presión para inyectar el material en la cavidad del molde. Es importante dejar un tiempo de sostenimiento para asegurar la compactación de la pieza. Todos los parámetros de moldeo requeridos se presentan en la tabla de parámetros.

Es muy importante dejar un tiempo de enfriamiento de la pieza para eliminar distorsión en la pieza al igual que para separar la pieza del molde. El proceso de moldeo se realizará en las moliendas de 0,5,9 y 15 teniendo como punto de inicio el material virgen. En este ciclo se moldearán 3 piezas se mandarán a los procesos posteriores.

Materiales:

Mezcla de acero inoxidable 17-4 con un aglutinante (Polipropileno, cera, ácido esteárico)

Equipo:

Prensa semi automática para prensado de la mezcla. Cuenta con un molde, un pistón neumático, resistencia de calentamiento y un regulador de flujo.

Parámetros:

TABLE 4. PARAMETROS DE MOLDEO

Parámetros de Moldeo				
Molienda	Temperatura (°C)	Tiempo de sostenimiento (seg.)	Presión de Inyección (PSI)	Tiempo de enfriamiento (seg.)
0	173	15	80	120
5	173	15	80	120
9	173	15	80	120
15	173	15	80	120

Método:

1. El proceso inicia con el material virgen
2. Se vierte el material en el cañón hasta que se llene el recipiente sin dejar espacios
3. Se enciende la resistencia de la prensa hasta que alcance una temperatura de 173 °C
4. Se deja calentar la mezcla por 20 minutos hasta que esté con consistencia líquida
5. Se enciende el compresor de aire y se regula la presión del pistón a 80 PSI
6. Se activa el pistón para inyectar la mezcla dentro de la cavidad y se mantiene la presión por 15 segundos
7. Se deja enfriar el molde por 120 segundos antes de abrirlo
8. Se abre el molde y se retira la pieza
9. Este proceso se debe repetir 3 veces para cada molienda
10. Las 3 piezas serán enviadas para los siguientes procesos (Desligado, Sinterizado)

Resultados:

Las 3 muestras fueron moldeadas exitosamente sin problemas para llenar la cavidad, en los anexos, se muestra la gráfica del peso promedio de las muestras después del proceso.

Discusión

Con el material virgen y el de 5 moliendas tomo más tiempo para lograr un estado semilíquido para ser inyectado en la cavidad alrededor de 30 minutos, mientras que en las moliendas 9 y 15 tomo alrededor de 20 minutos.

3.4 Proceso de Desligado

Los parámetros de desligado se determinaron de acuerdo al espesor de la pieza y al máximo de pérdida de peso. Durante el proceso, se simuló varias veces el proceso demostrando que después del primer proceso, ya no existía pérdida en los procesos posteriores.

Fórmula

$$\% \text{ Peso} = \frac{\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

Se pesan las piezas, se captura el peso y luego las piezas son colocadas en un crisol separadas por número de molienda. En cada ciclo, se colocaron 4 crisoles con 3 piezas. Se cargó el programa en la máquina corriendo con los parámetros establecidos. Al final del proceso, se purga la cera extraída del proceso y se vierte en un contenedor, se sacan las piezas del crisol y se pesan nuevamente para registrar la pérdida de peso durante el proceso.

Material: Partes moldeadas a diferentes moliendas

Gas CO₂

Crisol

Equipo:

Marca: Applied Separations

Modelo: Helix



FIGURE 22. MAQUINA SUPERCRITICA

Parámetros:

Temperatura: 180° C

Presión: 5000 PSI

Flujo de gas de CO₂: 35 LPM

Tiempo: 1 hora

Método:

1. Pesar las 3 piezas para registrar el peso inicial
2. Coloque las piezas en el crisol
3. Coloque el crisol en la cámara
4. Cierre correctamente la cámara
5. Encienda el equipo y seleccione el programa
6. Regule el flujo de gas a 35 LPM
7. Deje el proceso por 1 hora
8. Abra la cámara y retire el crisol
9. Pese las piezas y registre el peso
10. Calcule la pérdida de peso de acuerdo a la fórmula

Resultados

Las muestras a diferentes moliendas corrieron a través del proceso de desligado sin ningún problema, la pérdida de peso varió dependiendo de la molienda la que presentó mayor pérdida fue la de 5 moliendas con un 4.28% y la que obtuvo menor pérdida fue 15 moliendas con un 1.06%. ver los anexos.

3.5 Proceso de sinterizado

Para el proceso de sinterizado se tomaron las recomendaciones de la literatura para los aceros inoxidables 17-4, que es 1,325 grados centígrados como temperatura de sinterizado durante una hora de proceso. La duración total del proceso es de 18 horas por las rampas de calentamiento, este proceso se llevó a cabo en un horno de atmósfera controlada al alto vacío con hidrógeno como gas inerte.

Se colocaron las 3 muestras en una placa de alúmina cerámica de 4" x 4", después se colocan dentro de la cámara del horno, se cierra la cámara y se carga el programa. En las primeras etapas del procedimiento se pretende extraer el aglutinante, siendo primero el resto de cera en la pieza, así como el ácido esteárico. Por último, el polímero de los 400°C hasta 700°C. Desde este rango de temperatura, empieza una microsinterización de las partículas, ya que no existe aglutinante que garantice cuerpo para que no colapse la pieza. El proceso de sinterización como tal comienza a los 1,325 grados centígrados durante una hora, después de ello se lleva a cabo el enfriamiento de las piezas durante 4 horas antes de poder abrir la cámara.

Materiales:

Piezas después del proceso de desligado a diferentes moliendas

Placa cerámica de alúmina 4 x 4 pulgadas

Gas Nitrógeno

Gas Hidrógeno

Gas Argón

Equipo:

Marca: Elnik System

Modelo: MIM3045T-50-HXB-44



FIGURE 23. HORNO DE SINTERIZADO

Parámetros:

Temperatura de Sinterizado: 1325°C

Tiempo de Sinterizado: 1 hr

Tiempo proceso total: 18 hrs.

Método:

1. Cargar las 3 piezas de cada molienda en una placa de alúmina de 4 x 4 pulgadas
2. Colocar las placas dentro del horno
3. Cerrar el horno
4. Cargar el programa
5. Esperar 18 horas
6. Abrir la cámara

7. Sacar las piezas
8. Medir cada una de las piezas de las moliendas para ver sus diferencias con respecto al plano de la parte, con ello evaluar los cambios.

Resultados:

Las muestras se midieron después del proceso de sinterizado para ver si sufrieron diferentes grados de contracción debido al proceso, además de comprobar que el número de moliendas no afecta las dimensiones de las piezas.

3.6 Caracterización morfológica (SEM) de muestras de 0, 5, 9 y 15 moliendas

Se realizó microscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de 0, 5, 9 y 15 moliendas, con la intención de estudiar su estructura morfológica y poder definir si existe alguna alteración en la microestructura debido al proceso de moldeo. Cabe recalcar que el estudio se les realizó a las piezas en el proceso de moldeo y no en el sinterizado, ya que el tema de interés fue encontrar rastros de degradación del aglutinante. Este estudio se realizó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de Universidad Autónoma de Baja California.

En los anexos se muestra la estructura de cada una de las moliendas en ella se puede visualizar el tamaño de los granos metálicos y zonas de concentración del aglutinante, así como la mezcla de granos irregulares provenientes del proceso de producción de polvos llamado atomización por agua, estos representan el 25% de la composición de la muestra, por otro lado granos redondos provenientes del proceso de atomización por gas estos representan el 75% restante de la carga de polvos, la razón para tener esta mezcla de polvos es porque así se tiene una mejor compactación de la pieza y alcanza la densidad deseada.

Resultados

Después de analizar los resultados del estudio con microscopía electrónica de barrido (SEM), se observó la diferencia en el tamaño de los polvos metálicos, los resultados arrojaron que conforme las moliendas incrementan las zonas sin aglutinante tienden aparecer, la forma de los polvos tiende a ir de una forma esférica a una forma irregular debido a la molienda mecánica que está expuesto el material, en algunos casos el tamaño del grano incrementó por arriba de las 15 micras.

La composición química de las mezclas se mantuvo constante, varió en los porcentajes en algunas mezclas, pero los valores no están tan alejados, en la molienda 9 y 15 se encontró presencia de oxígeno.

3.7 Analisis TGA.

Resultados:

El análisis TGA se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Baja California. Se analizaron las cuatro muestras (Material virgen, 5, 9 y 15 moliendas) con el objetivo de caracterizar la morfología de las muestras, así poder analizar las transformaciones del material y a las temperaturas que se da, esto nos ayudó a comprender cuando había una evaporación del aglutinante y qué etapa, también se analizó la pérdida de peso de las muestras en las diferentes etapas de la transformación.

3.8 Prueba de Dureza a diferentes moliendas

Se realizaron pruebas dureza de las muestras después del proceso de sinterizado de cada una de las moliendas para verificar si las propiedades mecánicas de las piezas tuvieron alguna variación debido a la molienda. Este proceso se realizó con equipo de alta precisión Microdureza. Se tomaron tres lecturas de cada pieza para tener un valor más cercano a la realidad y evitar los errores por calibración. En total, se tomó la dureza a 12 piezas, 36 mediciones. Con esto se graficó de manera que se observará el comportamiento del material a través de cada molienda y observar si existe alguna tendencia.

Material para las probetas: Partes sinterizadas

Resina: Phenocure

Agente desmoldante

Equipo:

Descripción: Máquina para probetas

Marca: Buehler

Modelo: Simplimet XPS1



Parámetros:

Tiempo de calentamiento: 160 Segundos

Tiempo Enfriamiento: 90 Segundos

Temperatura: 350 °F

Presión: 4200 PSI

Dureza Mínima: 30 HRC

Material para el Lijado y pulido:

Lijas de 600 para desbaste

Lija de 1200 para pulido

Equipo:

Descripción: Lijadora y Pulidora

Marca: Buehler

Modelo: Metaserv 250



FIGURE 24. LIJADORA Y PULIDORA

Material para Prueba de Dureza:

Probeta lijada y pulida.

Equipo:

Descripción: Probador de Microdureza

Marca: Buehler

Modelo: Micromet 6040



FIGURE 25. PROBADOR DE DUREZA

Resultados

Después de realizar 3 tomas de dureza en cada probeta se encontró que todas las muestras cumplen con la dureza mínima que es 30 HRC, dando mejores resultados la molienda 15. Esto debido a que existió una mejor compactación de los polvos metálicos no había tantos espacios debido al aglutinante, se comprueba que las moliendas no afectan la dureza del material siempre y cuando se compacte correctamente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las pruebas de dureza.

TABLE 5. DUREZA

Material	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Virgen	30.1	31.2	36.6
5 molidas	39.1	36.5	37.4
9 molidas	35.2	38.6	37.6
15 molidas	38.3	38.7	37.3

3.9 Analisis Economico.

Como se menciono anteriormente el costo de material para un proceso MIM es muy caro de allí la importancia de reutilizar las coladas y piezas malas que salen del proceso de moldeo ya que solo en esta fase el material puede ser reutilizado.

El costo de un bracket en fase de moldeo es = \$ 0.0975 Centavos de Dólar

El peso de un bracket en fase de moldeo es = 0.0639 gr.

El costo de una colada en fase de moldeo es = \$ 0.78 Centavos de Dólar

El peso de una colada en fase de moldeo es = 0.5112 gr.

Por reutilizar el material después de la molienda 10 hasta la molienda 15 con una demanda diaria de 11,000 brackets la empresa se puede ahorrar el consumo de 59.73 KG de material SS 17-4 al año con un impacto financiero de \$ 91,149.53 dolares

3.10 Conclusion:

El proceso de Inyección de Metal "MIM" es un proceso el cual es de gran utilidad para sectores donde es necesaria gran precisión dimensional y propiedades mecánicas de alto rendimiento, como pudimos observar este proceso se enfoca principalmente en la fabricación de piezas pequeñas con geometrías complejas.

Durante el trabajo nos planteamos diferentes objetivos específicos de las cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones, se encontró la pérdida de peso de las moliendas en los diferentes procesos "Moldeo, Desligado y Sinterizado" se concluye que durante cada una de las fases de los procesos existe una degradación del aglutinante lo cual se refleja en una pérdida de peso, en la fase de moldeo pudimos observar que con cada molienda el peso de la pieza aumento debido a la relación de polvo metálico y aglutinante.

Otro objetivo específico fue analizar que las muestras cumplieran con los requisitos mínimos de dureza y densidad, tras analizar las muestras se encontró que todas las muestras están dentro del rango aceptable de dureza por arriba de los 30 RHC, mientras que en la densidad las muestras estuvieron por debajo de los valores aceptables se concluye que el proceso utilizado para compactar las piezas influyo en el resultado ya que no es comparable la fuerza de compactación de una prensa convencional contra la prensa utilizada.

Por último se realizó un estudio de morfología para estudiar la degradación de la mezcla con cada proceso de moldeo, se realizó un análisis electrónico de barrido SEM a cada una de las mezclas encontrando que con cada molienda el tamaño de los granos se va haciendo más irregular y aumentando de tamaño además se observó zonas donde se observa la degradación del aglutinante. En el análisis TGA se observó las transformaciones que sufre el material y la pérdida de peso o degradación del material los resultados fueron muy similares a los obtenidos en la fase práctica. Como se puede observar los objetivos plasmados en este trabajo fueron exitosamente llevados a cabo.

Tras analizar los resultados se concluye que la hipótesis se acepta ya que la evidencia muestra que hasta 15 moliendas las propiedades mecánicas "Dureza, Densidad" no se ven afectadas por las moliendas, pero si por los procesos que componen esta tecnología se observó que el proceso de moldeo juega un papel importante en el comportamiento mecánico de la pieza, al igual no se recomienda usar el material por arriba de las 15 moliendas ya que no existe una pérdida de peso

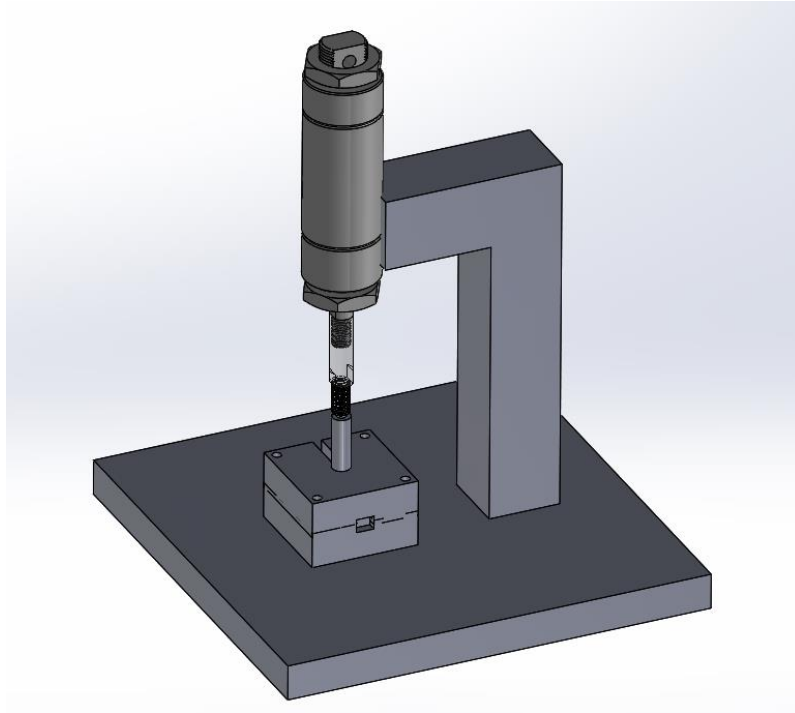
después de moldeo lo que refleja que ya no hay suficiente aglutinante en la mezcla para tener un punto optimo de fluidez.

3.11 Recomendaciones para estudios futuros.

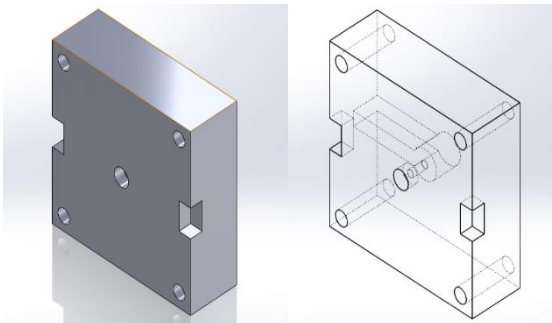
1. Realizar diferentes reformulaciones para reutilizar el material despues de las 15 moliendas, llevar acabo estudios con diferentes reformulaciones de aglutinante
2. Analizar el índice de fluidez en un plastómetro calibrado, para conocer el índice de cada molienda y evaluar la reología del material.
3. Moldear probetas en una maquina de moldeo convencional, para tener la fuerza y temperatura adecuada.
4. Llevar acabo el estudio de las moliendas con otros materiales (Cobre, Titanio y otros aglutinantes) para analizar su comportamiento.

3.12 Anexos.

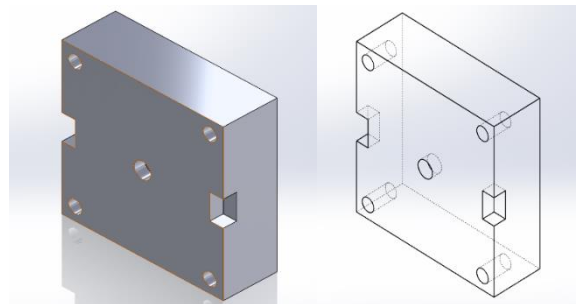
ANEXO A: PRENSA NEUMATICA



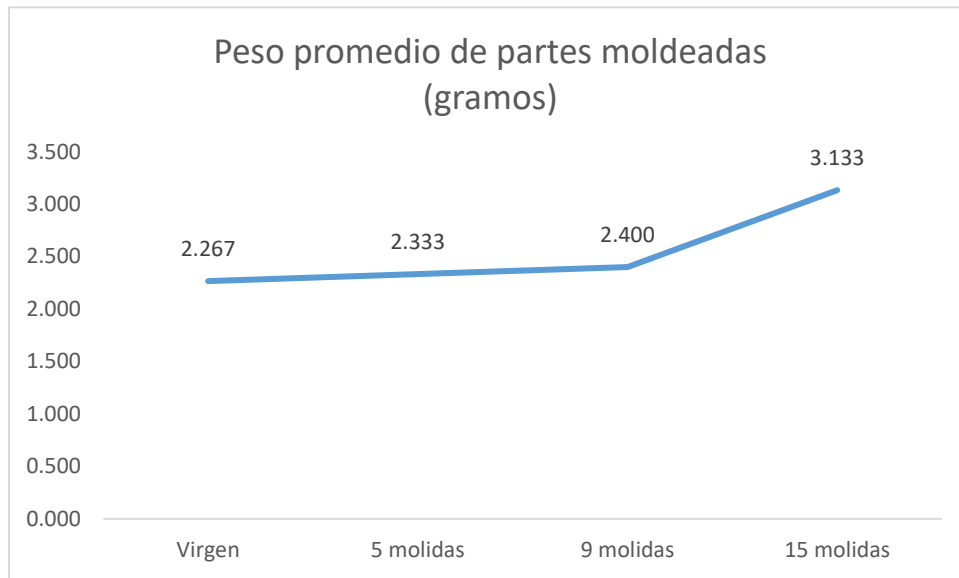
ANEXO B: CAVIDAD SUPERIOR



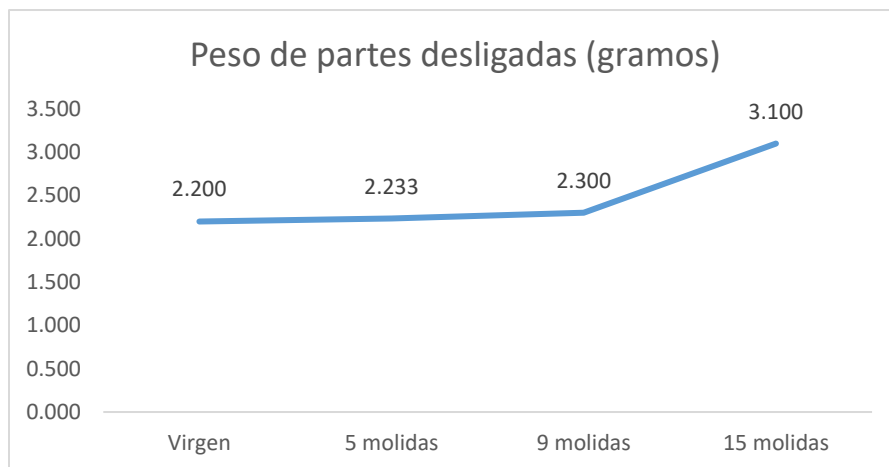
ANEXO C: CAVIDAD INFERIOR



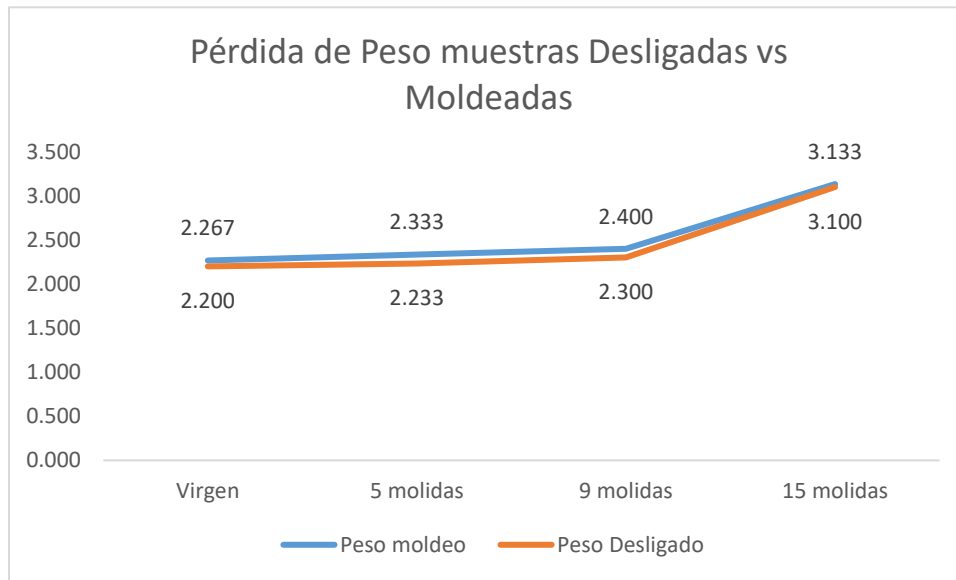
ANEXO D: PESO PROMEDIO DE PARTES MOLDEADAS



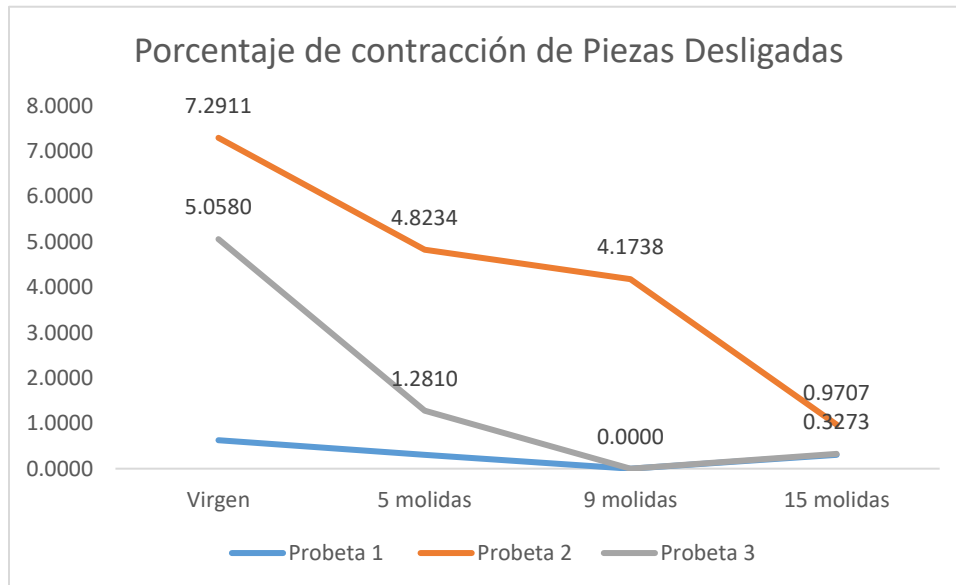
ANEXO E: PESO DE PARTES DESLIGADAS



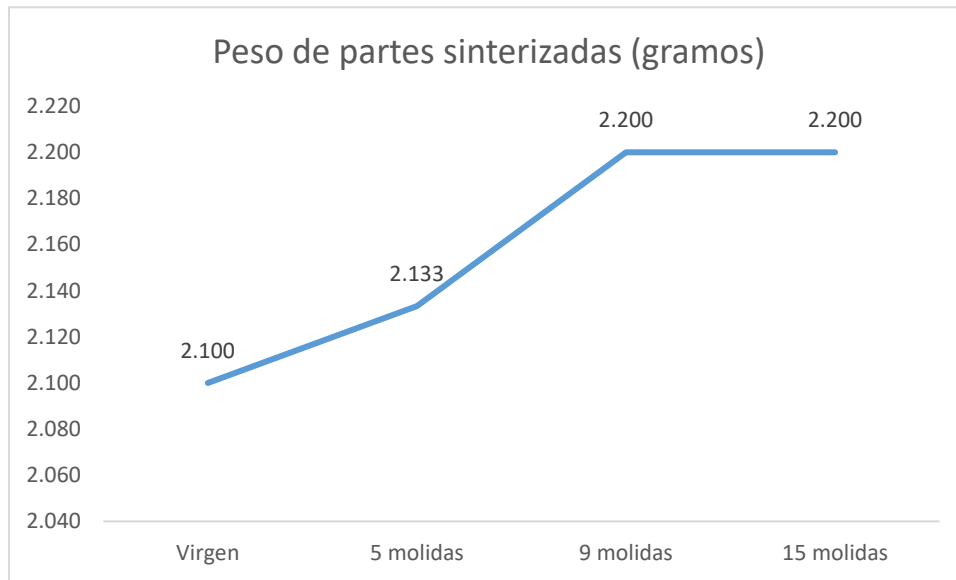
ANEXO F: PERDIDA DE PESO MUESTRAS DESLIGADAS VS MOLDEADAS



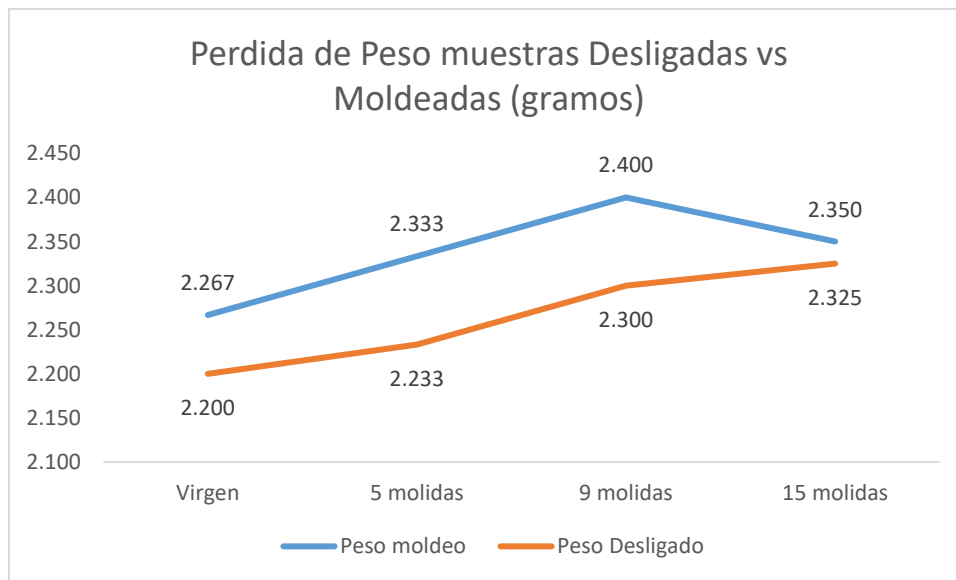
ANEXO G: PORCENTAJE DE CONTRACCION DE PIEZAS DESLIGADAS



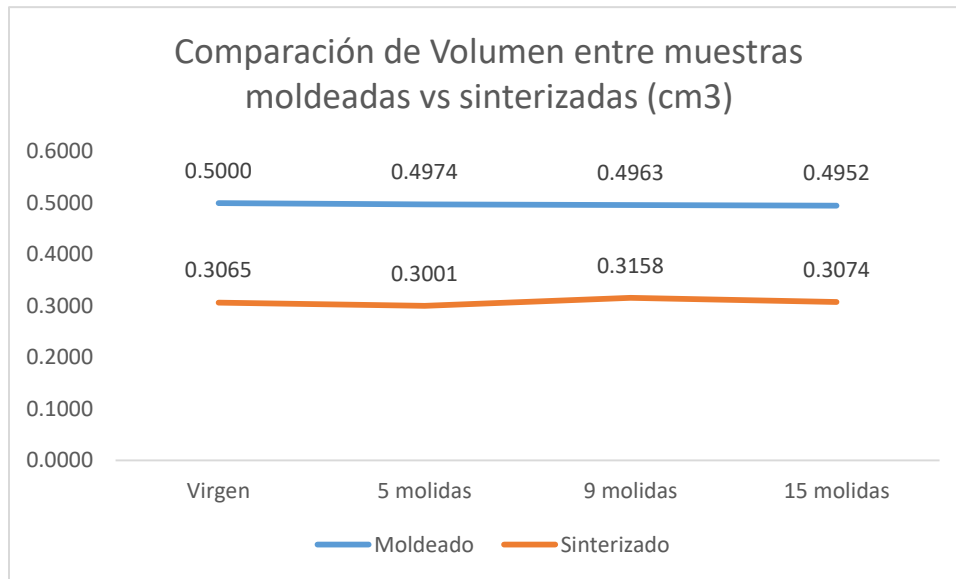
ANEXO H: PESO DE PARTES SINTERIZADAS



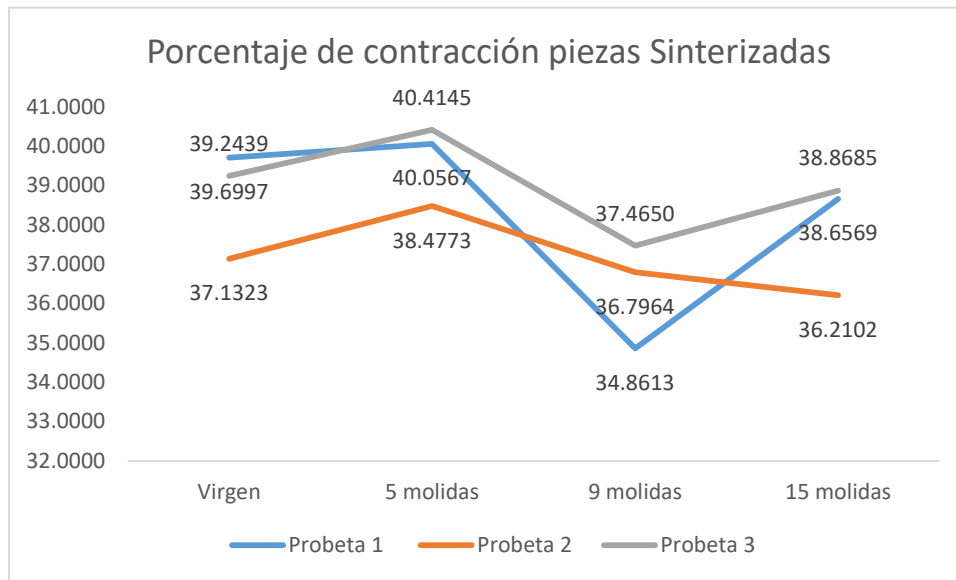
ANEXO I: PERDIDA DE PESO MUESTRAS DESLIGADAS VS MOLDEADAS



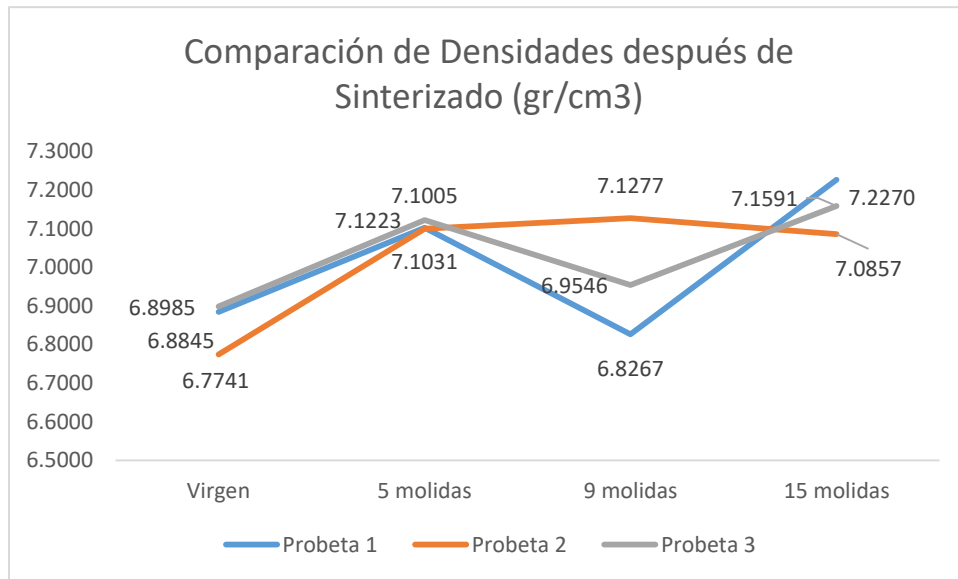
ANEXO J: COMPARACION DE VOLUMEN ENTRE MUESTRAS MOLDEADAS VS SINTERIZADAS



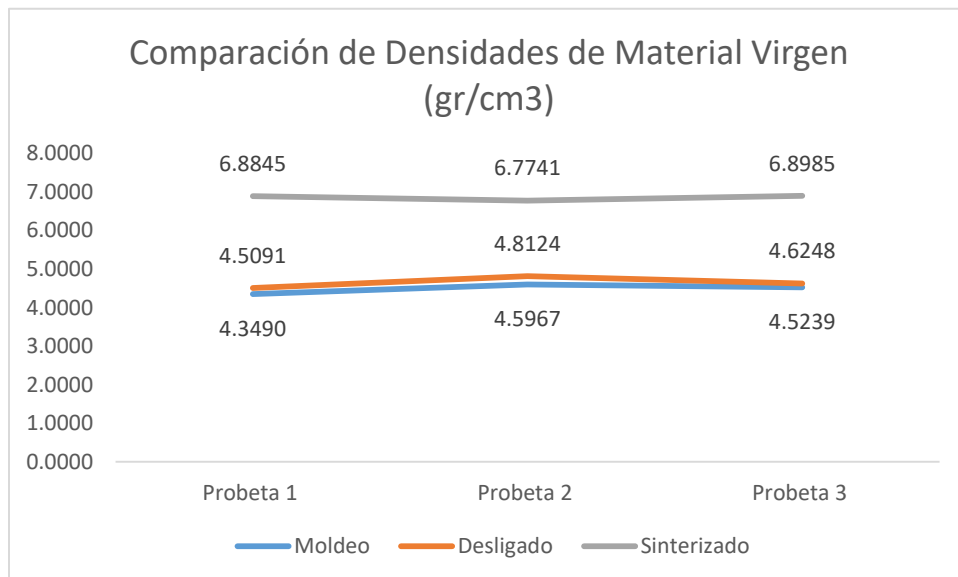
ANEXO K: PORCENTAJE DE CONTRACCION PIEZAS SINTERIZADAS



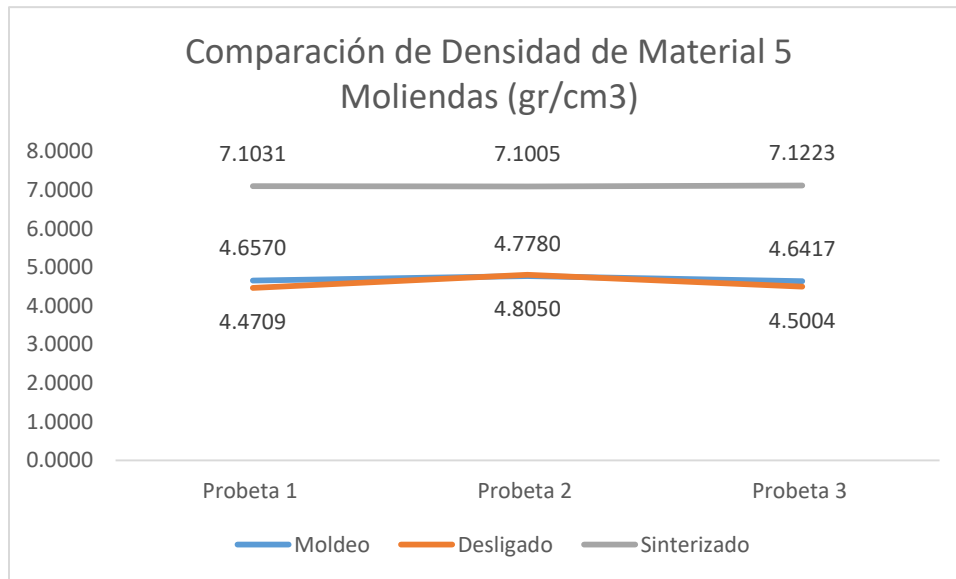
ANEXO L: COMPARACION DE DENSIDADES DESPUES DE SINTERIZADO



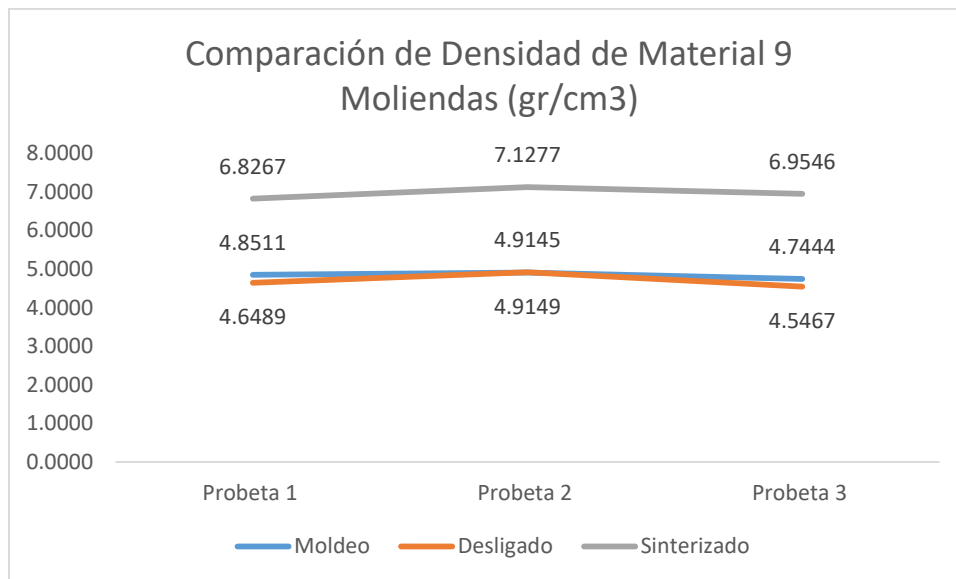
ANEXO M: COMPARACION DE DENSIDADES DE MATERIAL VIRGEN



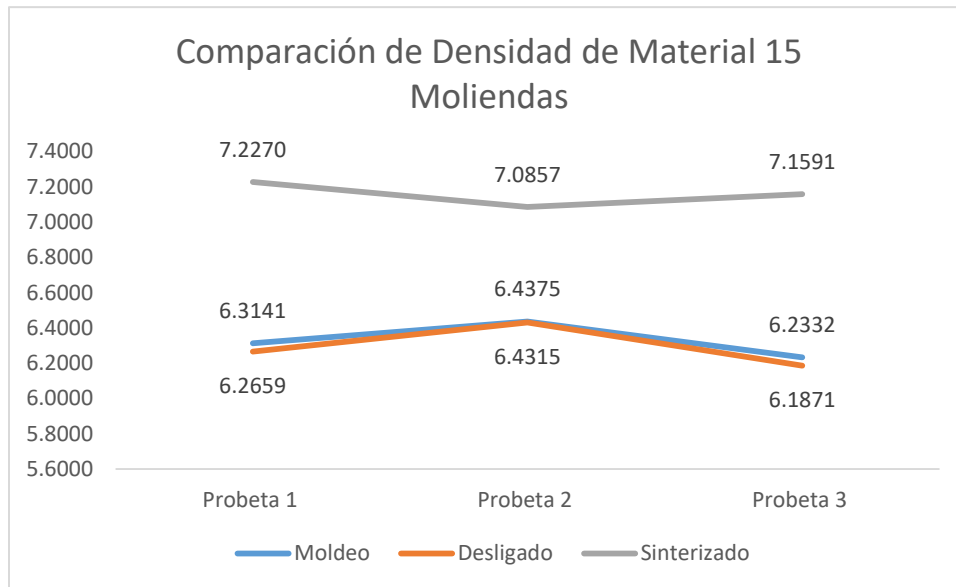
ANEXO N: COMPARACION DE DENSIDAD DE MATERIAL 5 MOLIENDAS



ANEXO O: COMPARACION DE DENSIDAD DE MATERIAL 9 MOLIENDAS



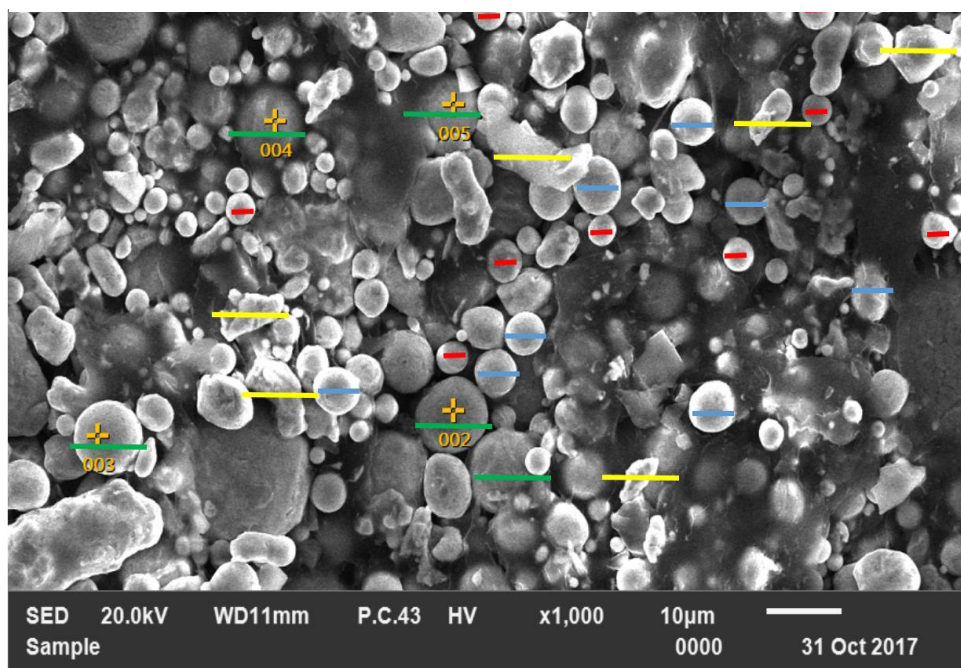
ANEXO P: COMPARACION DE DENSIDAD DE MATERIAL 15 MOLIENDAS



ANEXO Q: PIEZA MOLDEADA VS PIEZA SINTERIZADA.



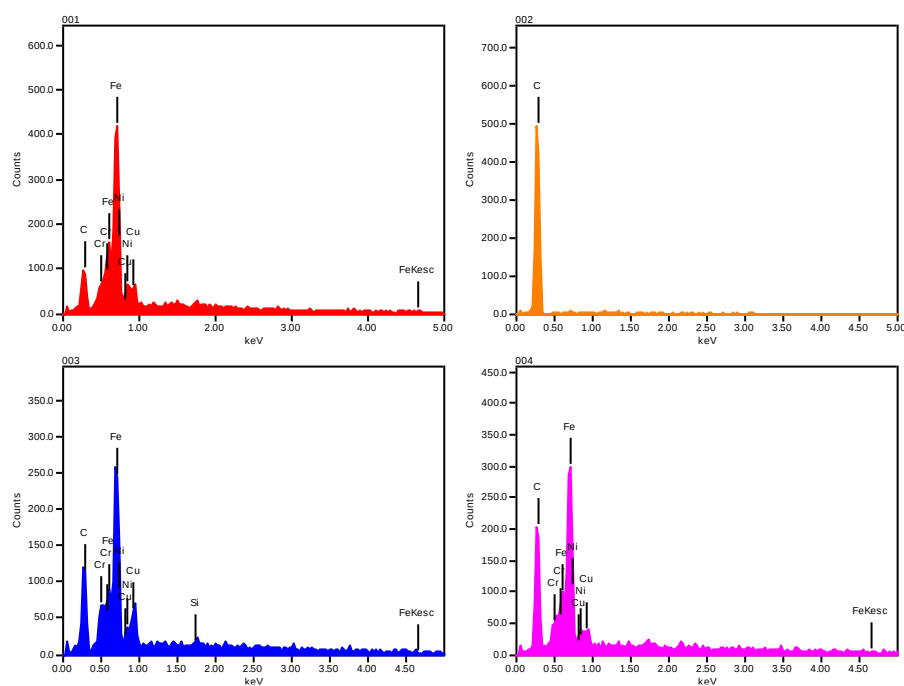
ANEXO R: MATERIAL VIRGEN 0 MOLIENDAS



Volt : 10.00 kV
Mag. : x 450
Date : 2017/11/20
Pixel : 1280 x 960

10 Micras
5 Micras
< 5 Micras
Polvo Irregular

90% Polvo esférico
menor 10 Micras
10% Polvo Irregular
entre 5 a 10 Micras



Acquisition Condition

Instrument : 6010LA

Volt : 10.00 kV

Current : ---

Process Time : T4

Live time : 49.93 sec.

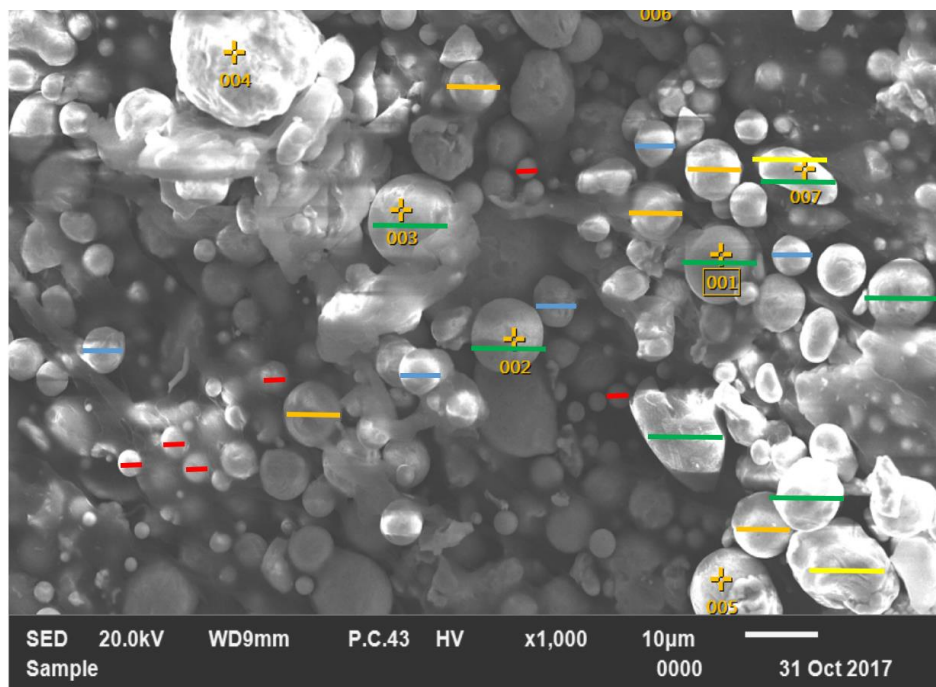
Real Time : 50.18 sec.

DeadTime : 0.00 %

Count Rate : 236.00 CPS

	Fe	C	Si	Cr	Ni	Cu
001	64.08	9.51		14.39	9.70	2.32
002		100.00				
003	55.88	15.66	0.41	12.38	10.68	4.99
004	55.18	22.68		13.38	6.94	1.83
Average	58.38	36.96	0.41	13.38	9.11	3.05
Standard deviation	1.85		7.14	0.00	0.00	1.25
						0.70

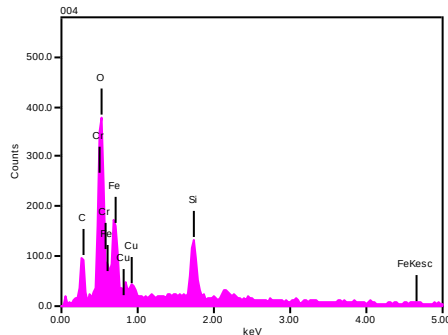
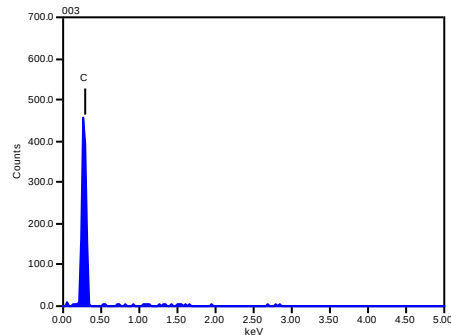
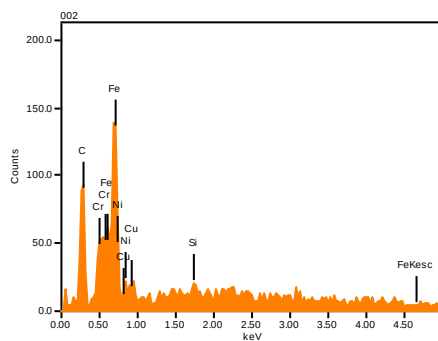
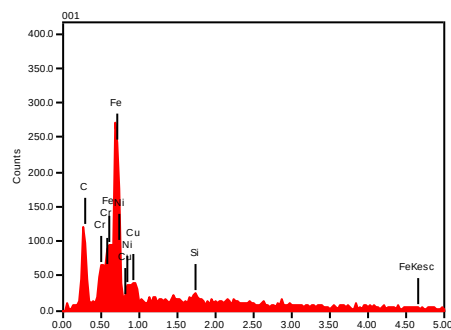
ANEXO S: MATERIAL CON 5 MOLIENDAS



Volt : 10.00 kV
Mag. : x500
Date : 2017/11/20
Pixel : 1280 x 960

— 10 Micras
— 5 Micras
— < 5 Micras
— Polvo Irregular

75% Polvo esférico
menor 10 Micras
25% Polvo Irregular
entre 5 a 10 Micras



Acquisition Condition

Instrument : 6010LA

Volt : 10.00 kV

Current : ---

Process Time : T4

Live time : 60.00 sec.

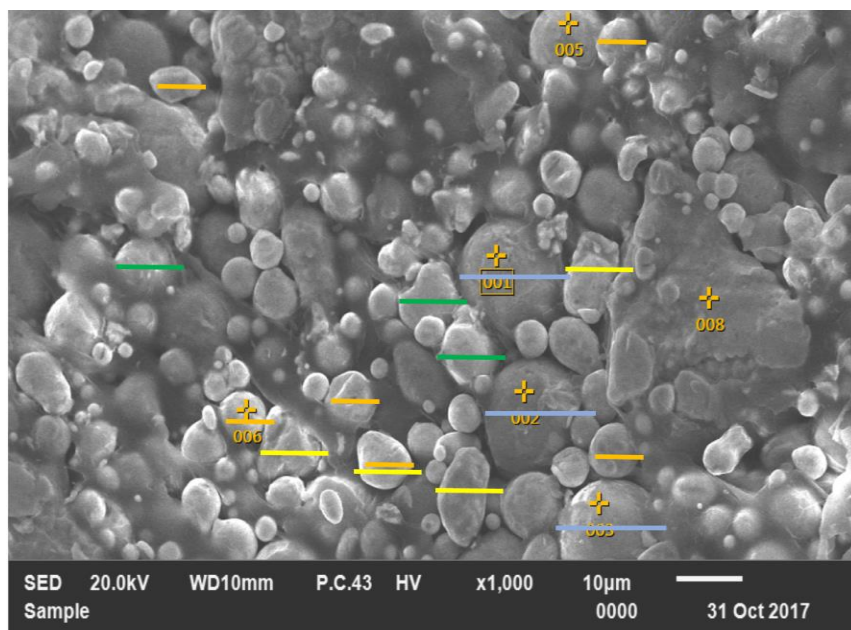
Real Time : 60.27 sec.

DeadTime : 0.00 %

Count Rate : 262.00 CPS

	Fe	O	C	Si	Cr	Ni	Cu
001	60.41		14.91	0.54	14.91	7.61	1.62
002	68.28		11.46	0.40	14.74	4.38	0.74
003			100.00				
004	36.90	17.36	12.24	6.67	25.98		0.85
Average	55.19	17.36	34.65	2.54	18.55	6.00	1.07
Standard deviation	10.56		0.00	11.21	2.39	4.29	1.14
							0.12

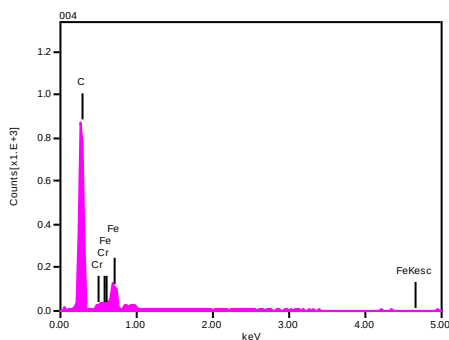
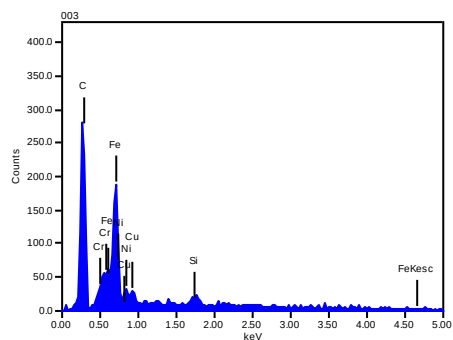
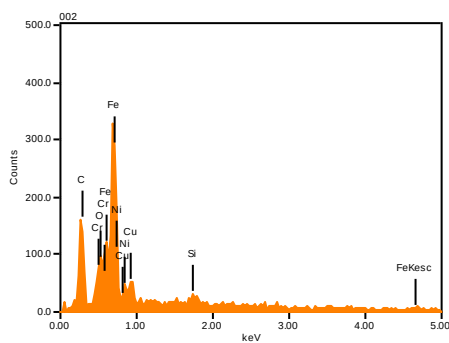
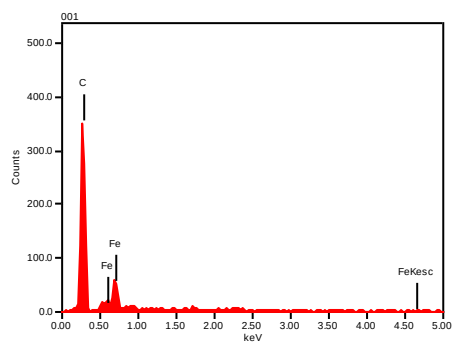
ANEXO T: MATERIAL CON 9 MOLIENDAS



Volt : 10.00 kV
Mag. : x500
Date : 2017/11/20
Pixel : 1280 x 960

10 Micras
5 Micras
< 5 Micras
Polvo Irregular
15 Micras

70% Polvo esférico
menor 10 Micras
30% Polvo Irregular
entre 5 a 15 Micras



Acquisition Condition

Instrument : 6010LA

Volt : 10.00 kV

Current : ---

Process Time : T4

Live time : 39.24 sec.

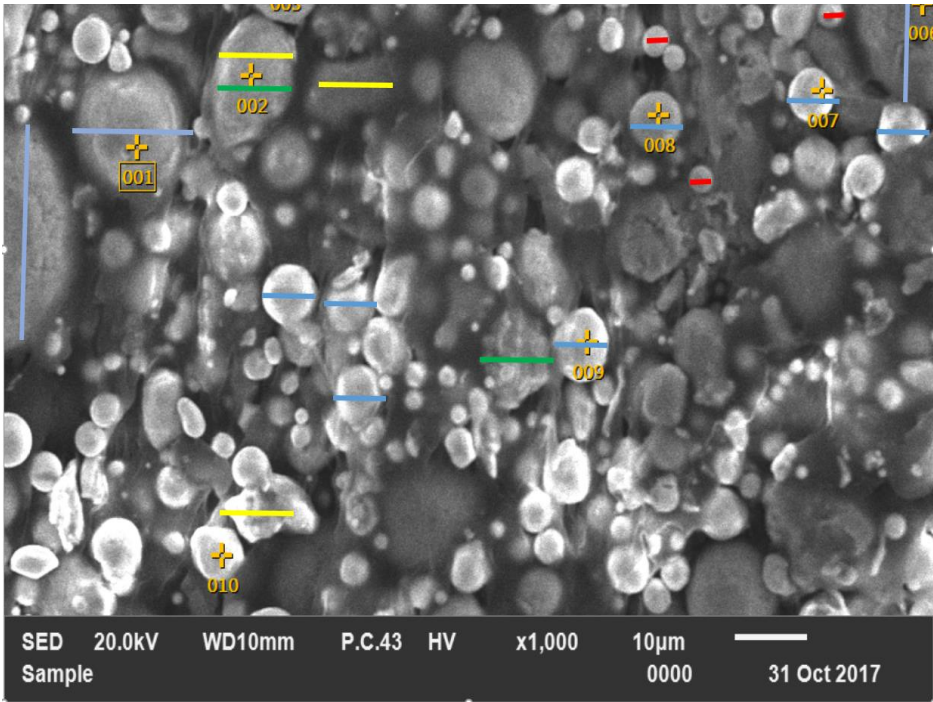
Real Time : 39.43 sec.

DeadTime : 1.00 %

Count Rate : 279.00 CPS

	Fe	O	C	Si	Cr	Ni	Cu
001	16.07		83.93				
002	49.73	1.96	19.18	0.60	15.19	10.37	2.97
003	35.72		41.90	0.72	12.88	7.06	1.72
004	13.40		81.90		4.70		
Average	28.73	1.96	56.73	0.66	10.92	8.71	2.34
Standard deviation	7.67		0.00	12.59	0.04	3.59	1.17
							0.44

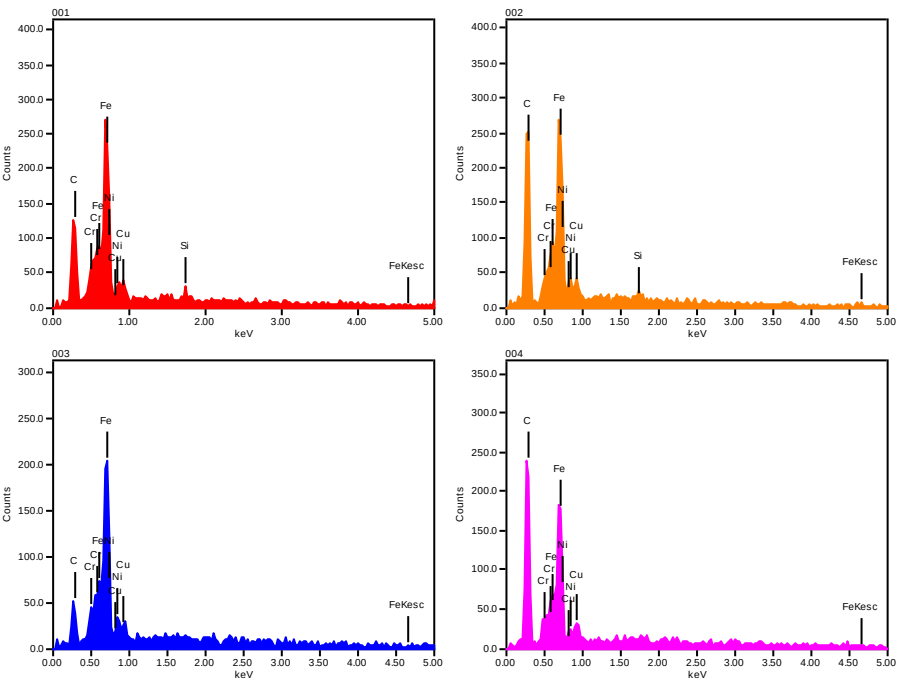
ANEXO U: MATERIAL CON 15 MOLIENDAS



Volt : 10.00 kV
Mag. : x500
Date : 2017/11/20
Pixel : 1280 x 960

10 Micras
5 Micras
< 5 Micras
Polvo Irregular
>15 Micras

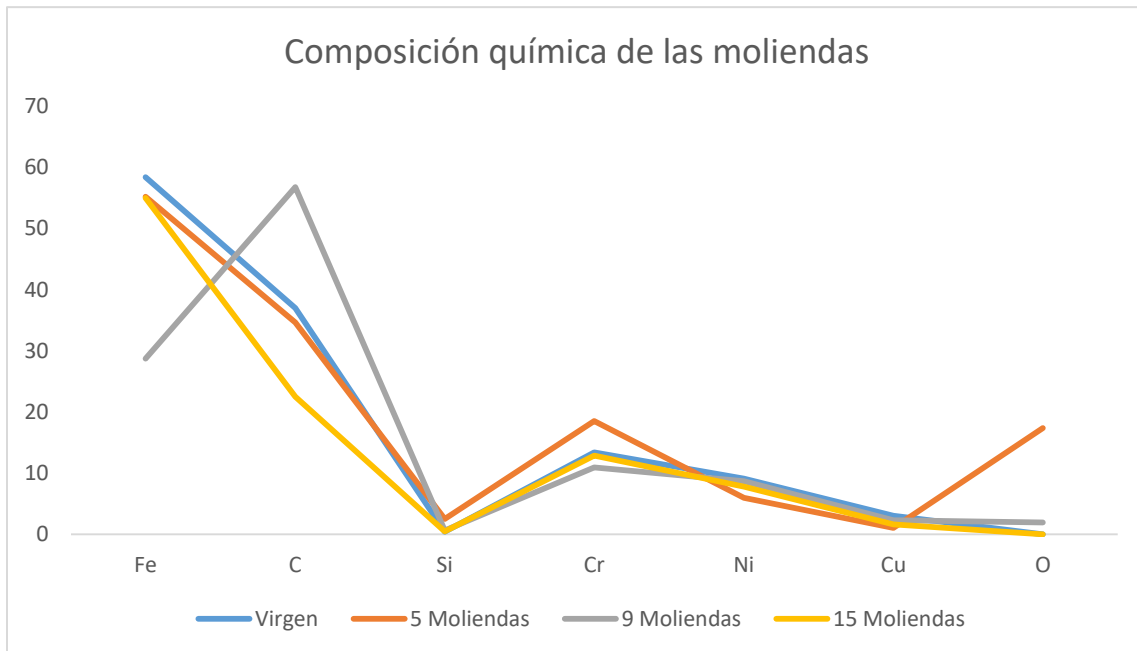
70% Polvo esférico
menor 10 Micras
30% Polvo Irregular
entre 5 a 10 Micras



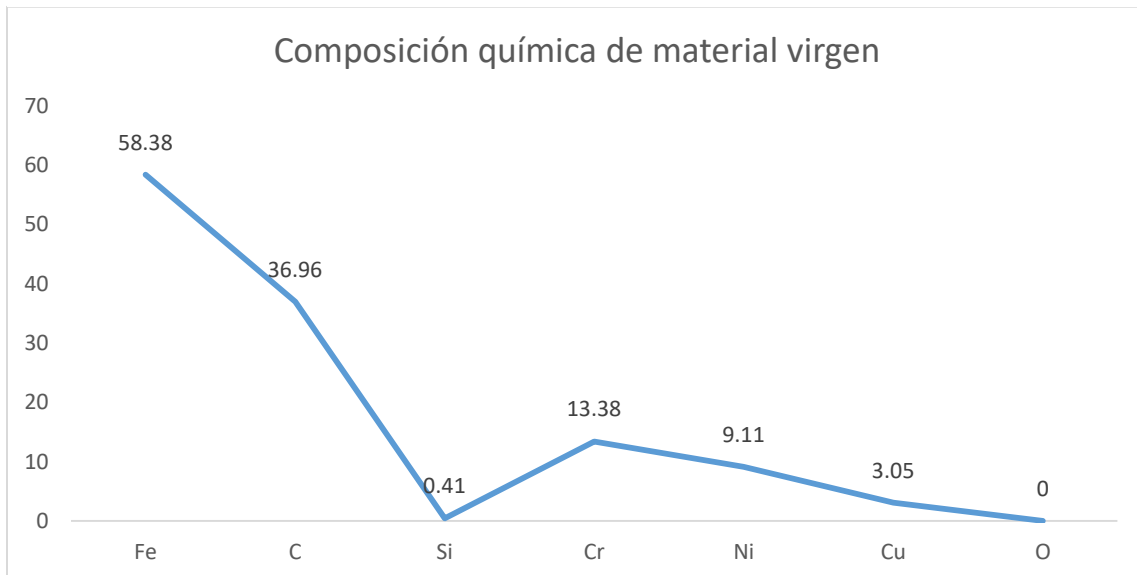
Acquisition Condition
Instrument : 6010LA
Volt : 10.00 kV
Current : ---
Process Time : T4
Live time : 37.38 sec.
Real Time : 37.59 sec.
DeadTime : 0.00 %
Count Rate : 232.00 CPS

	Fe	C	Si	Cr	Ni	Cu
001	61.37	16.45	0.50	13.79	6.45	1.44
002	45.81	33.02	0.45	9.91	9.03	1.76
003	62.37	10.08		15.80	10.09	1.66
004	50.24	30.43		11.92	5.77	1.64
Average	54.95	22.50	0.47	12.86	7.83	1.62
Standard deviation	2.35	3.97	0.02	0.47	1.03	0.01

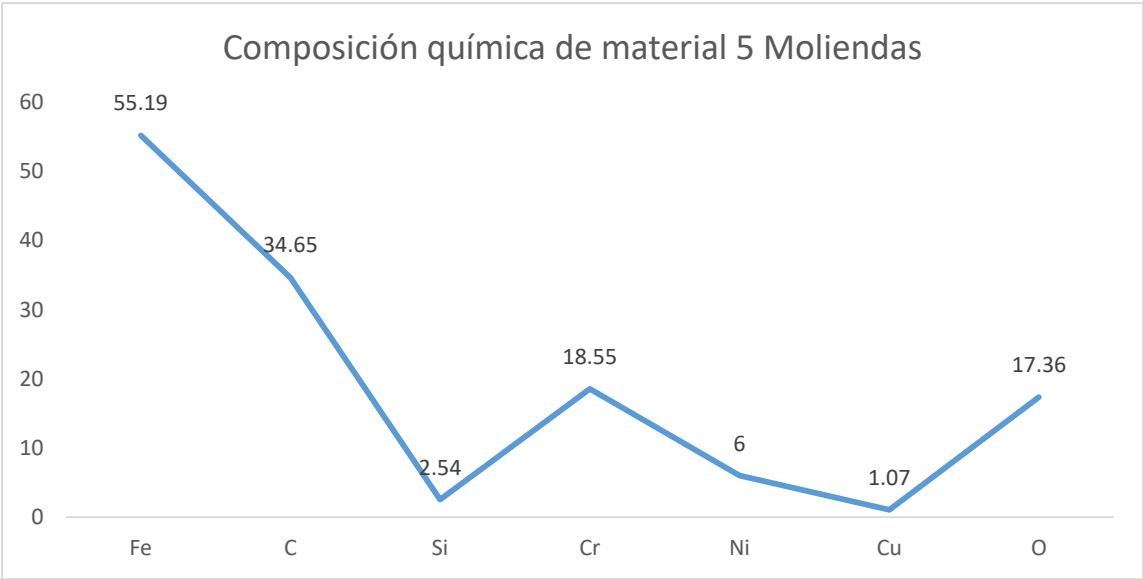
ANEXO V: COMPOSICION QUIMICA DE LAS MOLIENDAS



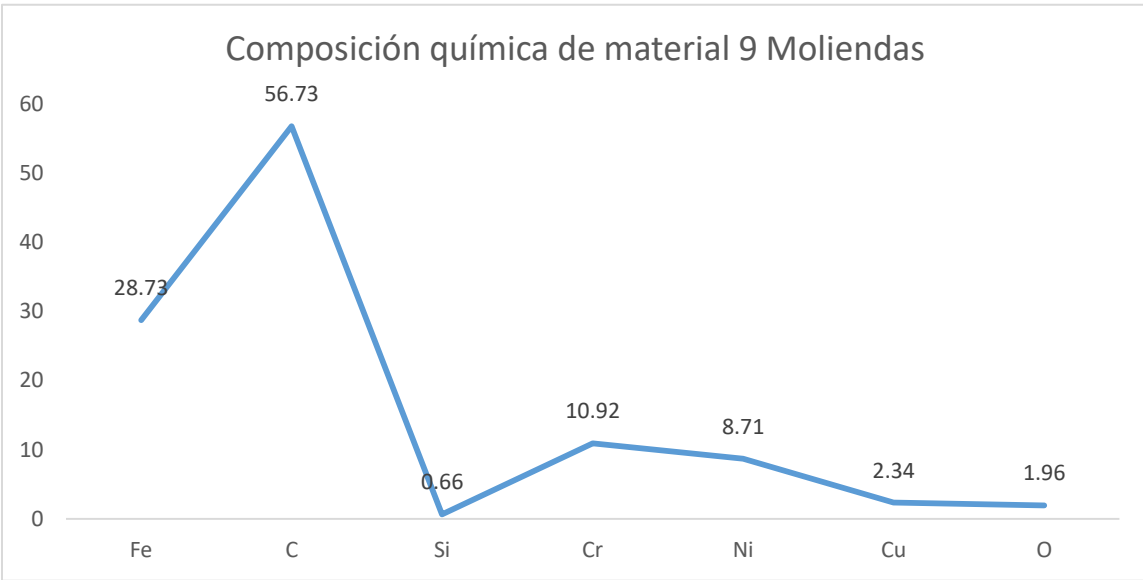
ANEXO W: COMPOSICION QUIMICA DE MATERIAL VIRGEN



ANEXO X: COMPOSICION QUIMICA DE MATERIAL 5 MOLIENDAS

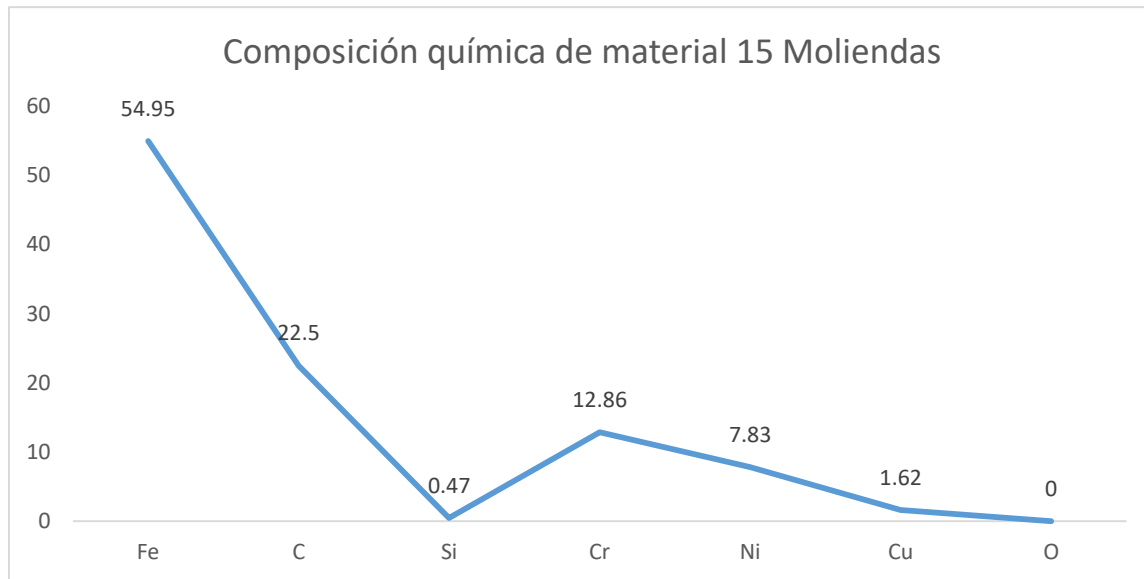


ANEXO Y: COMPOSICION QUIMICA DE MATERIAL 9 MOLIENDAS

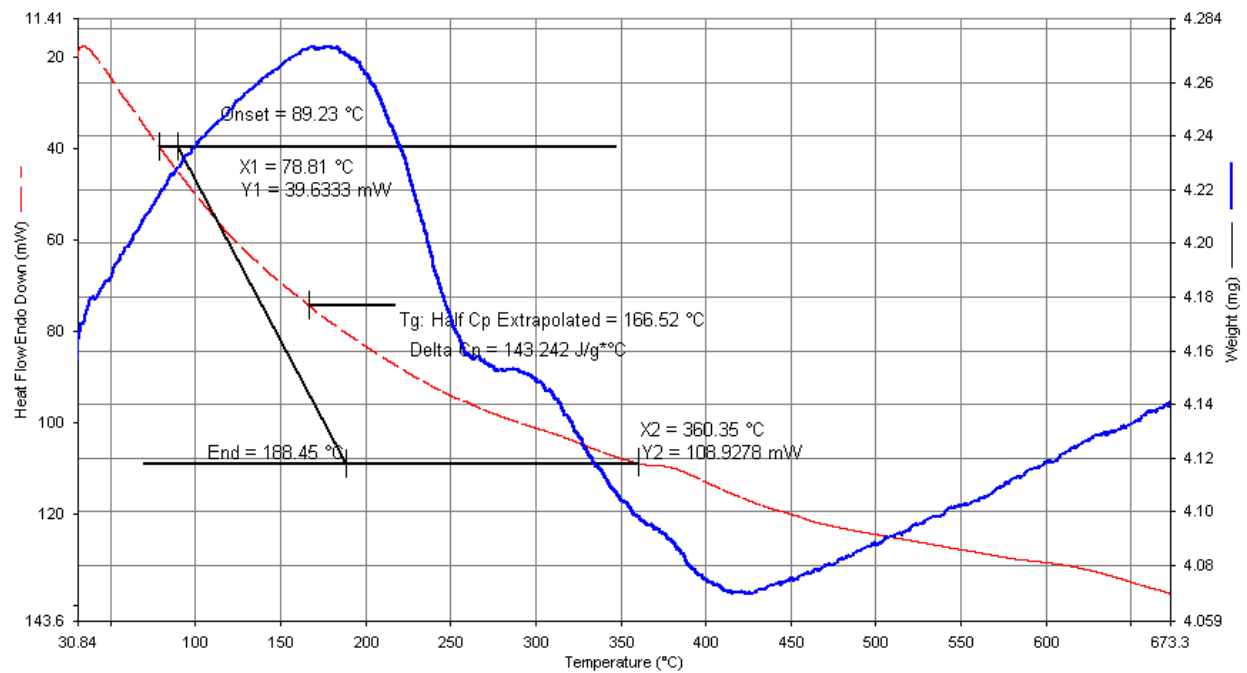


ANEXO Z: COMPOSICION QUIMICA DE MATERIAL 15 MOLIENDAS

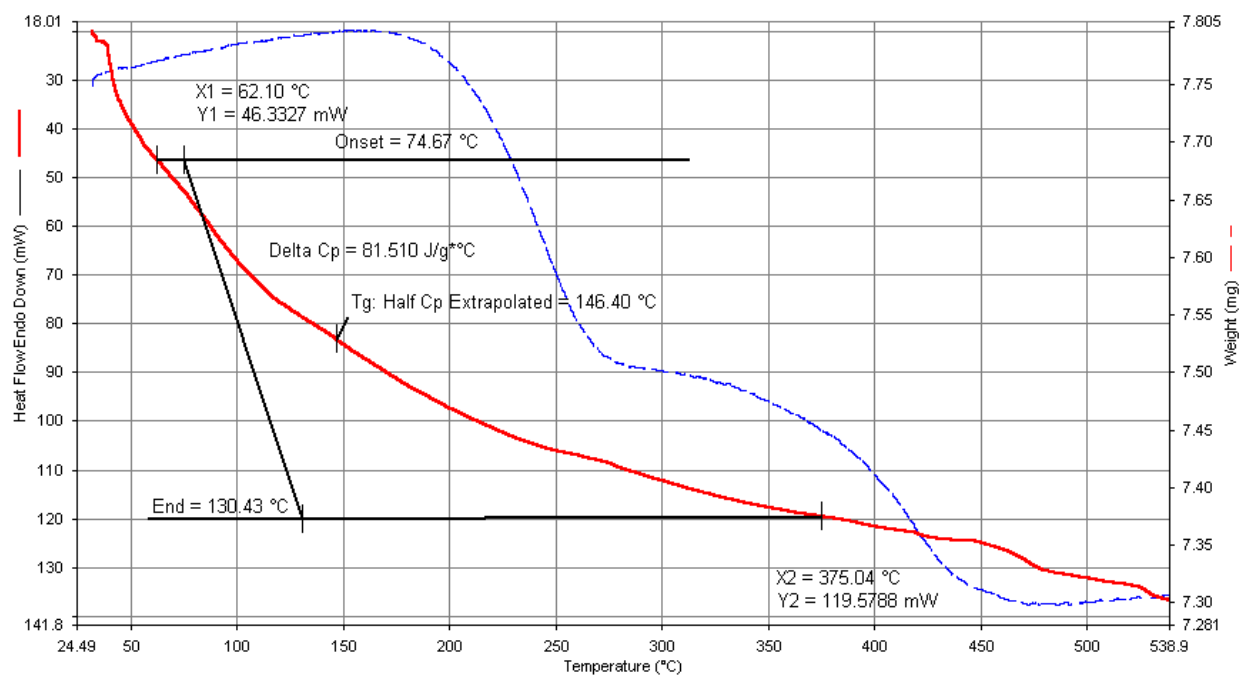
ANEXO Z: COMPOSICION QUIMICA DE MATERIAL 15 MOLIENDAS



ANEXO AA: ANALISIS TGA MATERIAL VIRGEN

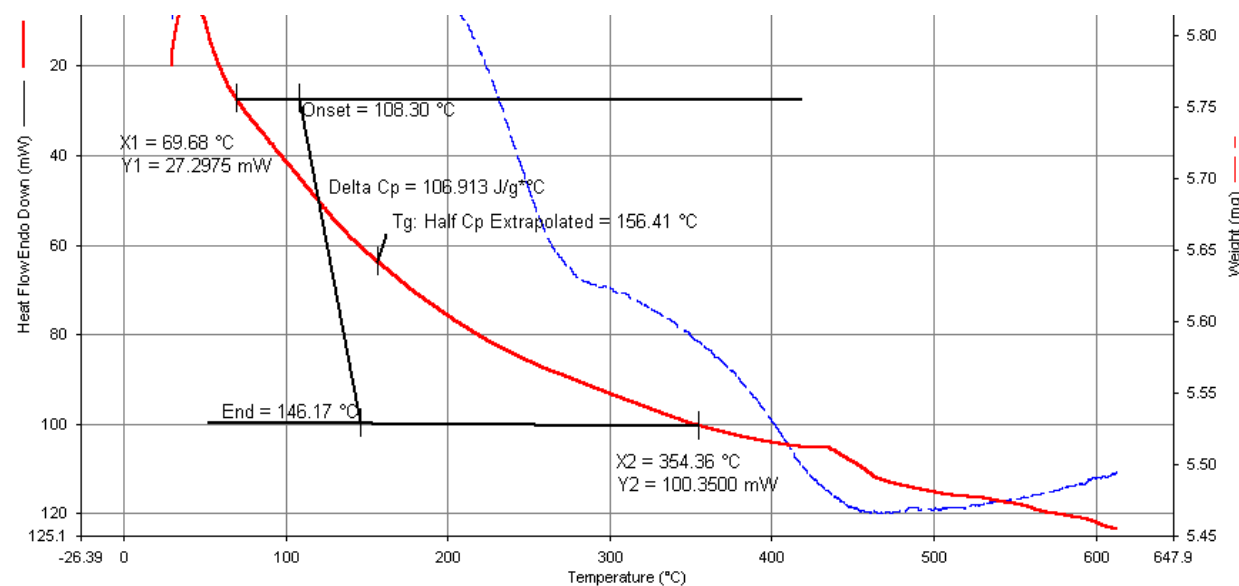


ANEXO CB: ANALISIS TGA MATERIAL 5 MOLIENDAS

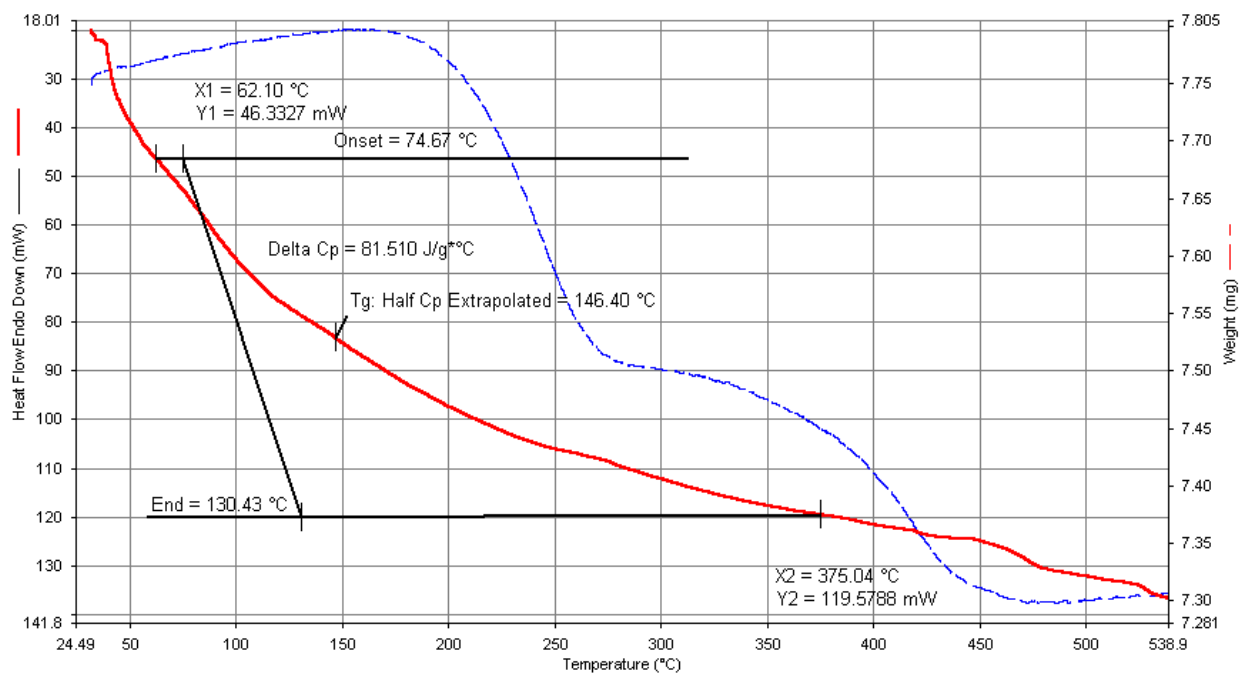


ANEXO AC: ANALISIS TGA MATERIAL 9 MOLIENDAS

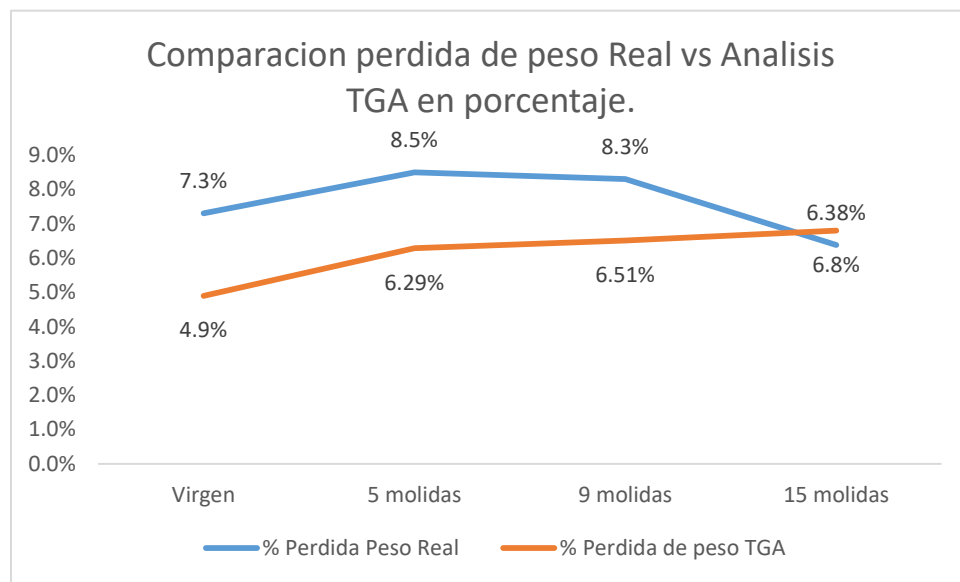
ANEXO BC: ANALISIS TGA MATERIAL 9 MOLIENDAS



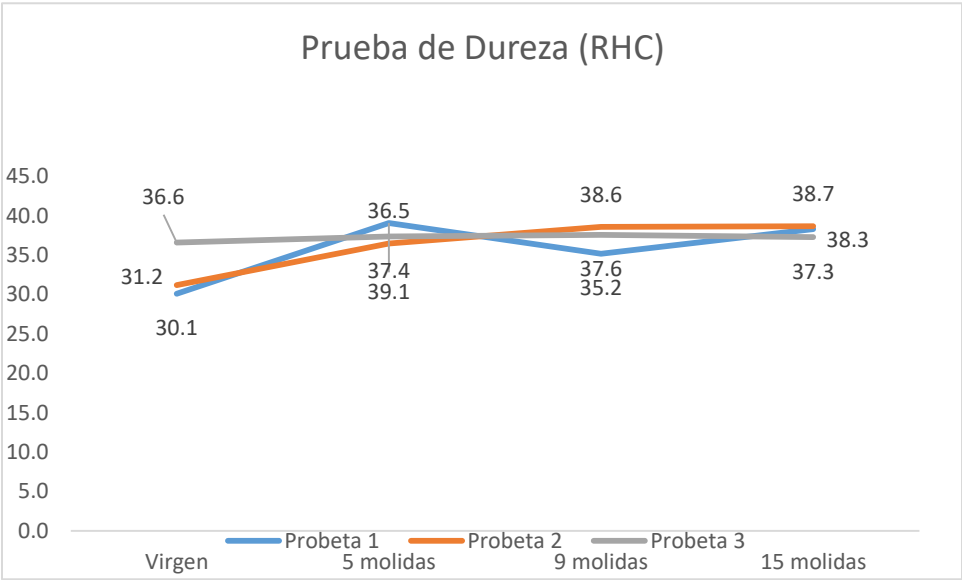
ANEXO AD: ANALISIS TGA MATERIAL 15 MOLIENDAS



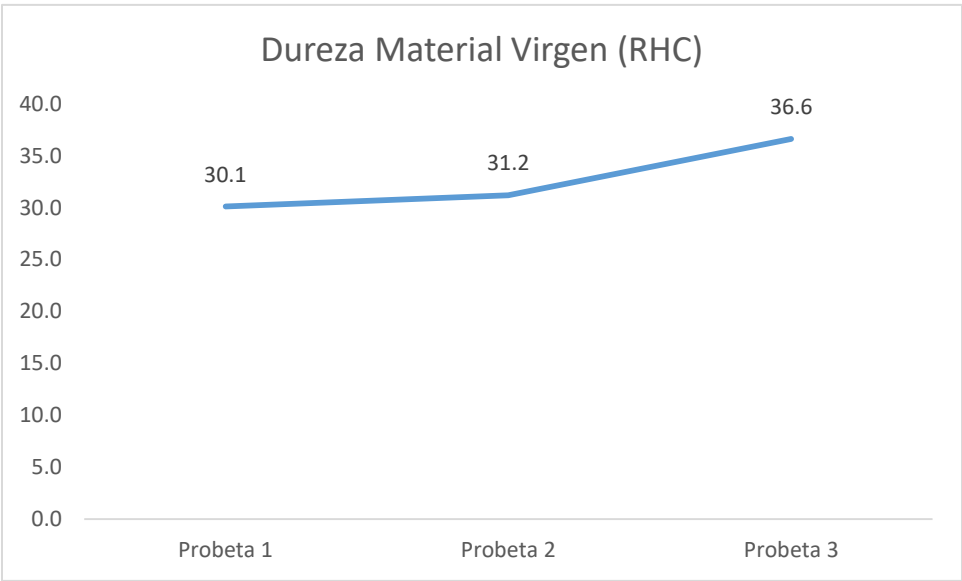
ANEXO AF: COMPARACION PERDIDA DE PESO REAL VS ANALISIS TGA



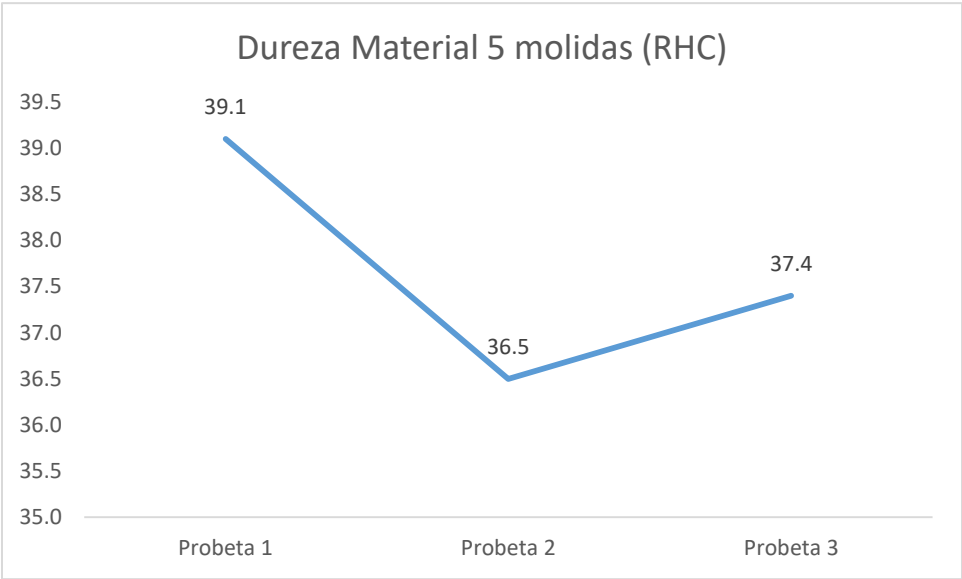
ANEXO AG: PRUEBA DE DUREZA



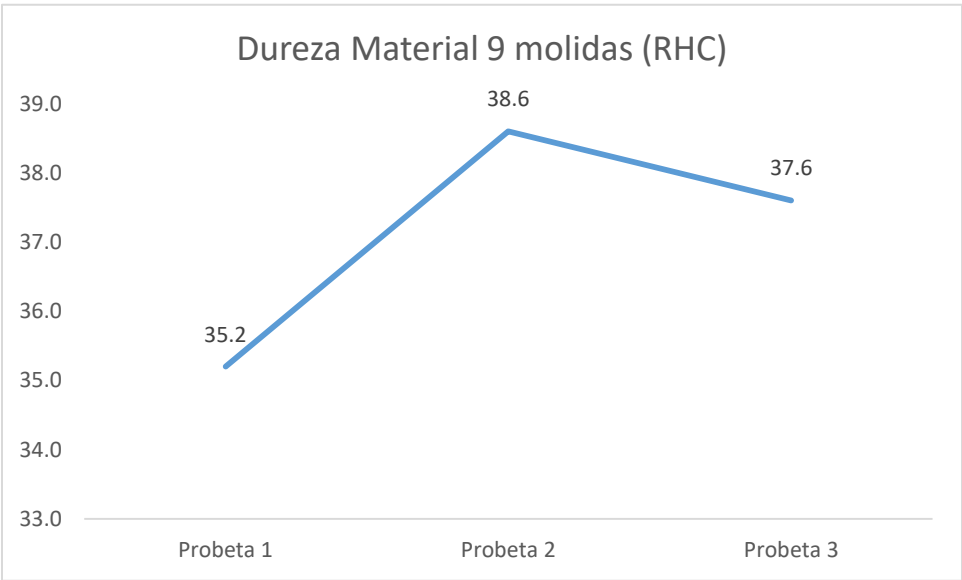
ANEXO AH: DUREZA MATERIAL VIRGEN



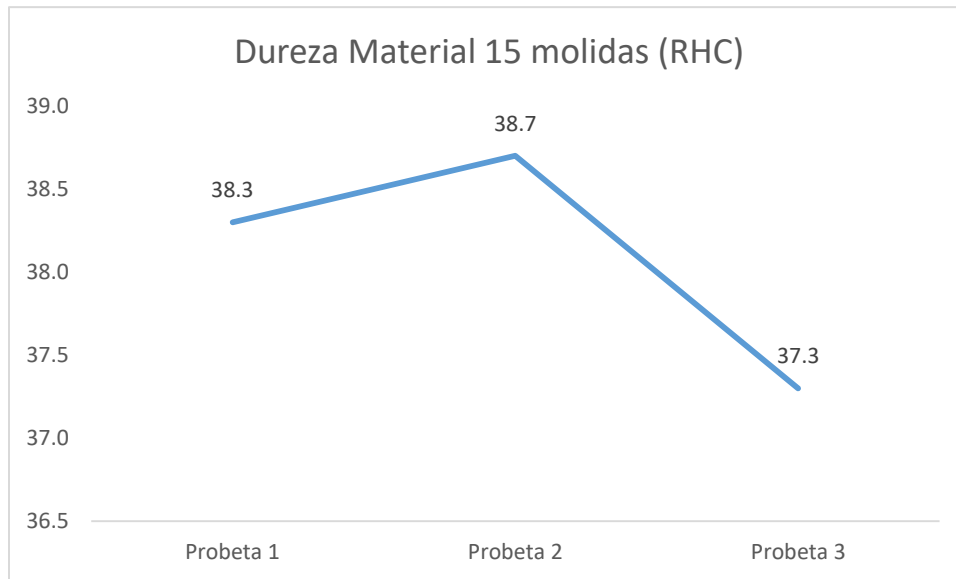
ANEXO AI: DUREZA MATERIAL 5 MOLIENDAS



ANEXO AJ: DUREZA MATERIAL 9 MOLIENDAS



ANEXO AK: DUREZA MATERIAL 15 MOLIENDAS



3.13 Referencia bibliográfica

- [1] R. M. German, *Injection Molding of Metals and Ceramics*. 1997.
- [2] Y. Li, L. Li, and K. A. Khalil, “Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 183, no. 2–3, pp. 432–439, 2007.
- [3] P. R. Beiss P., Dalal K., *International Atlas of Powder Metallurgical Microstructures*. 2002.
- [4] E. W. B. Bose Animesh, *Hot Consolidation of Powders & Particulates*. 2003.
- [5] W. G. W. Leander F. Pease, III, *Powder Metallurgy*. 2002.
- [6] A. Romero and G. Herranz, “Development of feedstocks based on steel matrix composites for metal injection moulding,” *Powder Technol.*, vol. 308, pp. 472–478, 2017.
- [7] A. Páez-Pavón, A. Jiménez-Morales, T. G. Santos, L. Quintino, and J. M. Torralba, “Influence of thermal debinding on the final properties of Fe-Si soft magnetic alloys for metal injection molding (MIM),” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 416, pp. 342–347, 2016.
- [8] K. R. Jamaludin *et al.*, “Temperature influence to the injection molding of fine and coarse ss316l powder with peg, pmma and stearic acid binder system,” *Malaysian Symp. Adv. Powder Metall. Part. Mater.*, no. October 2015, pp. 21–22, 2007.
- [9] P. A. Davies and G. R. Dunstan, “Comparison of Master Alloy and Pre-Alloyed 316L Stainless Steel Powders for Metal Injection Molding (Mim).,” no. Mim.
- [10] European Powder Metallurgy Association, “Metal Injection Moulding: a Manufacturing Process for Precision Engineering Components,” 2013.
- [11] W. Fang, X. B. He, R. J. Zhang, S. Di Yang, and X. H. Qu, “Evolution of stresses in metal injection molding parts during sintering,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 25, no. 2, pp. 552–558, 2015.
- [12] and Q. X. L. Yimin, H. Baiyun, “Improvement of rheological and shape retention properties of wax-based MIM binder by multi-polymer components,” 1999.
- [13] V. Procesnih, P. Brizganja, I. N. Sintranja, N. A. Mehanske, and L. Nerjavnega, “the Influence of Mim and Sintering-Process Parameters on the Mechanical Properties of,” *Mater. Tehnol.*, vol. 40, no. 5, pp. 193–198, 2006.

- [14] M. H. I. Ibrahim, N. Muhamad, A. B. Sulong, and K. R. Jamaludin, "Optimization of Micro Metal Injection Molding with Multiple Performance Characteristics using Grey Relational Grade," *J. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 231–241, 2011.
- [15] P. Zhao, H. Zhou, Y. Li, and D. Li, "Process parameters optimization of injection molding using a fast strip analysis as a surrogate model," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 49, no. 9–12, pp. 949–959, 2010.
- [16] K. R. Jamaludin *et al.*, "Moulding Parameter Optimisation for the Best Sintered Density," *Engineering*, vol. I, no. October 2015, pp. 1–5, 2009.
- [17] M. Aslam *et al.*, "Investigation of Rheological Behavior of Low Pressure Injection Molded Stainless Steel Feedstocks," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, pp. 1–9, 2016.
- [18] G. Fu, N. H. Loh, S. B. Tor, Y. Murakoshi, and R. Maeda, "Effects of injection molding parameters on the production of microstructures by micropowder injection molding," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 20, no. 6, pp. 977–985, 2005.
- [19] M. D’Incau, M. Leoni, and P. Scardi, "High-energy grinding of FeMo powders," *J. Mater. Res.*, vol. 22, no. 6, pp. 1744–1753, 2007.
- [20] S. R. Collins, "Microstructural Characterization of Metal Injection Molded (MIM) AISI 316L," vol. 8, no. May, pp. 1316–1317, 2018.
- [21] J. Whale, N. Fowkes, G. Hocking, and D. Hill, "A model of the injection moulding process," vol. 37, no. April 1994, pp. 1–15, 1995.
- [22] S. Krug, J. R. G. Evans, and J. H. H. Ter Maat, "Packing and solidification in ceramic injection moulding," *J. Mater. Res.*, vol. 16, no. 6, pp. 1829–1837, 2001.
- [23] D. Sanetnik, B. Hausnerova, P. Filip, and E. Hnatkova, "Influence of capillary die geometry on wall slip of highly filled powder injection molding compounds," *Powder Technol.*, vol. 325, pp. 615–619, 2018.
- [24] J. He *et al.*, "Investigation of inhomogeneity in powder injection molding of nano zirconia," *Powder Technol.*, vol. 328, pp. 207–214, 2018.
- [25] D. Yakun, "Effects of Different Thermoplastic Wax-based Binders on Properties of 316L Stainless Steel Injection Molding Parts," *Rare Met. Mater. Eng.*, vol. 46, no. 10, pp. 2775–2780, 2017.

- [26] S. M. Jabir *et al.*, “Analysis of the Rheological Behavior of Copper Metal Injection Molding (MIM) Feedstock,” *Procedia Chem.*, vol. 19, pp. 148–152, 2016.
- [27] O. Ogorodnyk and K. Martinsen, “Monitoring and Control for Thermoplastics Injection Molding A Review,” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 380–385, 2018.
- [28] C. Veeresh Nayak, M. Ramesh, V. Desai, and S. Kumar Samanta, “Fabrication of stainless steel based composite by metal injection moulding,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 6805–6814, 2018.
- [29] M. Sorgato, D. Masato, and G. Lucchetta, “Effects of machined cavity texture on ejection force in micro injection molding,” *Precis. Eng.*, vol. 50, pp. 440–448, 2017.
- [30] G. Tosello, A. Gava, H. N. Hansen, and G. Lucchetta, “Study of process parameters effect on the filling phase of micro-injection moulding using weld lines as flow markers,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1–4, pp. 81–97, 2010.
- [31] L. C. Martínez and J. M. Torralba, “Moldeo por Inyeccion de Metales, Estado Actual,” *Rev. ciencia, Tecnol. y medio Ambient.*, vol. III, 2005.
- [32] Y. Shengjie, Y. C. Lam, S. C. M. Yu, and K. C. Tam, “Two-dimensional simulation of mass transport in polymer removal from a powder injection molding compact by thermal debinding,” *J. Mater. Res.*, vol. 16, no. 8, pp. 2436–2451, 2001.
- [33] J. Takekawa, “Effect of binder composition on debinding and sintering processes of injection molded Fe-8Ni mixed powders,” *J. Mater. Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 1127–1132, 1996.
- [34] G. J. S. and H. J. L. K. S. Hwang, “Solvent debinding behavior of powder injection molded components prepared from powders with different particle sizes,” 2005.
- [35] S. A. Matar, “The effect of porosity development on the removal of organic vehicle from ceramic or metal moldings,” no. May, pp. 617–625, 2018.
- [36] L. Poh, C. Della, S. Ying, C. Goh, and Y. Li, “Powder distribution on powder injection moulding of ceramic green compacts using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry,” *Powder Technol.*, vol. 328, pp. 256–263, 2018.
- [37] K. R. Jamaludin, N. Muhamad, M. N. A. Rahman, S. Y. M. Amin, S. Ahmad, and M. H. I. Ibrahim, “Sintering Parameter Optimisation of the SS316L Metal Injection Molding (MIM) Compacts for Final Density Using Taguchi Method,” no. Mim, pp. 258–262, 2006.

- [38] A. Romero, G. Herranz, and A. L. Morales, “Study of magnetoelastic properties of pure nickel parts produced by metal injection moulding,” *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 438–445, 2015.
- [39] H. Ye, X. Y. Liu, and H. Hong, “Sintering of 17-4PH stainless steel feedstock for metal injection molding,” *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 19, pp. 3334–3336, 2008.
- [40] W. Wang, J. Song, B. Yan, and Y. Yu, “Metal injection molding of tungsten and its alloys,” *Met. Powder Rep.*, vol. 71, no. 6, pp. 441–444, 2016.
- [41] G. Fu, N. H. Loh, S. B. Tor, B. Y. Tay, Y. Murakoshi, and R. Maeda, “Injection molding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 81, no. 3, pp. 495–500, 2005.
- [42] L. Liu, N. H. Loh, B. Y. Tay, S. B. Tor, Y. Murakoshi, and R. Maeda, “Densification and grain growth of stainless steel microsize structures fabricated by μ mIM,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 83, no. 1, pp. 31–36, 2006.
- [43] B. Berginc, Z. Kampus, and B. Sustarsic, “Influence of feedstock characteristics and process parameters on properties of MIM parts made of 316L,” *Powder Metall.*, vol. 50, no. 2, pp. 172–183, 2007.