

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Gerencia de Posgrado



*Desarrollo y manufactura de un inserto como herramienta
de corte por el método de metalurgia de polvos*

TESINA QUE PRESENTA

Ing. Leonel Luz Hernández
Asesores: Dr. Raúl Pérez Bustamante
Dr. José Manuel Mendoza Duarte

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Santiago de Querétaro, Querétaro
noviembre, 2022

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Ciudad, Estado, 7 de noviembre del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del grado y nombre completo del alumno, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Desarrollo y manufactura de un inserto como herramienta de corte por el método de metalurgia de polvos" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Dr. Raúl Pérez Bustamante
Director de tesina

Dr. José Manuel Mendoza Duarte
Codirector de tesina

F31a Revisión: 01-jun-2021

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



San Luis Potosí, SLP, 17 de noviembre del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) C. Leonel Luz Hernández, cuyo título es:

DESARROLLO Y MANUFACTURA DE UN INSERTO COMO HERRAMIENTA DE CORTE POR EL MÉTODO DE METALURGIA DE POLVOS

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. José Antonio Betancourt Cantera

F31b Revisión: 01-Mar-2021



DEDICATORIA

El presente desarrollo tecnológico se logró en conjunto con la empresa Alta Tecnología en Herramientas S. A. de C. V. (1993) fabricante de herramientas especiales de y con carburo de tungsteno de origen Mexicano. La cuál es la responsable en el proceso de manufactura y especialista en el método de metalurgia de polvos metálicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el soporte y apoyo del Lic. José Luis Saldaña como director general de la empresa ATHESA por su confianza depositada en su servidor, de la Ing. Fátima García B. como responsable directo de aseguramiento de calidad y del Ing. José García Arredondo como gerente de producción. Al Sr. Joel Pérez como gerente de ventas y por último al Ing. Hugo Ceja como coordinador de ventas, compañero y amigo.

Agradezco el seguimiento y recomendaciones ofrecidas por la Mtra. Clarisa Sánchez Baca, el Mtro. Geovany Gonzalez Carlos, pertenecientes al cuerpo académico de posgrados del CIATEQ, A. C. a todos los docentes pertenecientes al programa académico Maestría en Manufactura Avanzada, el Mtro. Cesar Corona Patricio y la Mtra. Rosario Valdespino Mejía como compañeros del programa académico y amigos.

Agradezco el acompañamiento de mis padres la Lic. María Elena Solís y el Tec. Leonel Luz y en especial a mi esposa la Mtra. Karla María Rico por su complicidad en fomentar e impulsar a mi formación profesional, académico y personal como mi familia.

* * *

RESUMEN

En algunos procesos de manufactura, se mecanizaron partes metálicas con máquinas-herramientas especiales, por lo tanto requirieron herramientas de corte que cumplan con las especificaciones técnicas en cada operación; estas herramientas de corte se catalogan especiales al presentar características técnicas específicas para el mecanizado de una parte metálica, se presentó el desarrollo y manufactura de un inserto especial de corte aplicando el método de metalurgia de polvos con una mezcla metálica compuesta principalmente por carburo de tungsteno y cobalto, para una aplicación de mecanizado en fresado horizontal para una operación de manufactura.

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, Tecnología metalúrgica, Pulvimetalurgia.

ABSTRACT

Sometimes in manufacturing processes, the metal parts were machining with special machine, they required cutting tools, it must had the technical specifications in each operation; these cutting tools were cataloging special, it were presenting specific technical characteristics for the machining of a metal part, the development and manufacture of a special cutting insert was showing to applying the method of powder metallurgy with a metal mixture composed, it mainly of tungsten carbide and cobalt for a machining application in horizontal milling in manufacturing operation.

Keywords: Engineering and technology, Metallurgical technology, Powder metallurgy.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
GLOSARIO	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. HIPÓTESIS.....	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. METALURGIA DE POLVOS.....	6
2.2. POLVOS METÁLICOS	7
2.3. PROCESOS DE OBTENCIÓN DE POLVOS METÁLICOS.....	8
2.4. ETAPAS DEL PROCESO DE METALURGIA DE POLVOS.....	11
2.5. CONSOLIDACIÓN EN FRÍO	12
2.6. TIPOS DE SINTERIZACIÓN	13
2.7. EL CARBURO DE TUNGSTENO: BREVE HISTORIA	15
2.8 EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA.....	16
2.9 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS PULVIMETALURGICAS	16
2.9.1 Metalurgia del carburo de tungsteno	18
2.9.2 Acabados (mecanizados) en el carburo de tungsteno.....	22
2.9.3 Clasificación de las mezclas pulvimetalúrgicas	23
3. RESULTADOS	24
3.1. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.....	27
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DE CARBURO DE TUNGSTENO	28
3.3. APLICACIÓN DE MECANIZADO.....	35

3.4. HERRAMIENTA DE CORTE	36
CONCLUSIONES	38
RECOMENDACIONES	39
APORTACIÓN DE LA TESINA	40
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESINA	41
REFERENCIAS	42
ANEXO	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gama de fabricación de herramientas especiales	6
Figura 2. Diferentes estados durante la formación de partículas durante la atomización con fluidos.....	8
Figura 3. Operación de una celda electrolítica para la deposición de polvo	9
Figura 4. Molino de bolas attritor vertical	10
Figura 5. Proceso de metalurgia de polvos en ATHESA	11
Figura 6. Prensado isostático en frío	12
Figura 7. Prensado isostático en caliente.....	13
Figura 8. Moldeo por inyección de polvos	14
Figura 9. Laminado de polvos.....	14
Figura 10. Modelo a mecanizar (Dimensión final)	27
Figura 11. Diseño a detalle del inserto de corte (1-26)	28
Figura 12. Medición porcentaje de Cobalto (% Co)	30
Figura 13. Medición de dureza (HRA).....	31
Figura 14. Medición de densidad (gr/cm ³).....	32
Figura 15. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta con aleados (AT9306).....	33
Figura 16. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta con aleados (AT9310).....	33
Figura 17. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta sin aleados (AT9316)	33
Figura 18. Máquina-herramienta especial (aplicación de corte).	36
Figura 19. Inserto de corte (1-26).	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equivalencia de grados para mecanizado de metales	25
Tabla 2. Equivalencia de grados para mecanizado de aceros	25
Tabla 3. Equivalencia de grados resistentes a la abrasión.....	26
Tabla 4. Equivalencia de grados resistentes al impacto	26
Tabla 5. Diagrama de flujo herramientas especiales.....	29
Tabla 6. Especificaciones de grados ATHESA	34
Tabla 7. Reporte de liberación de mezcla	35

GLOSARIO

Inserto: Herramienta de corte, que se emplea generalmente para las máquinas-herramientas.

Máquinas-herramientas: Conjunto de mecanismos que transforma la energía que lo alimenta, en movimientos racionales y restringidos, encausados a desarrollar un trabajo para vencer una resistencia y obtener un beneficio.

Mecanizado: Proceso de transformación mecánica.

Parafina: Es el aglutinante que une los polvos metalúrgicos durante el proceso de prensado.

Preformado: Es el estado de los polvos metalúrgicos posterior a la operación de prensado, donde solamente está aglutinado por la acción de la parafina y compactación de los polvos metalúrgicos.

Prensado: Es la operación donde se comprimen los polvos metalúrgicos de la mezcla por medio de un dado y punzón.

Pulvimetalurgia: es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen partes a partir de polvos metálicos.

Sinterizado: Es la unión de las partículas de los polvos metalúrgicos en una masa dura y rígida la cual se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión de la mezcla metálica.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la transformación en específico el sector que su principal actividad es la operación de mecanizado por arranque de viruta, se requiere en su proceso de manufactura la aplicación de herramientas de corte para operaciones específicas en máquinas-herramientas. La selección del material para el desarrollo de herramientas es crítica, en tiempos modernos para aplicaciones de corte se recomienda en la mayoría de los casos el empleo de carburos sinterizados o metal duro (Serhat, y otros, 2022).

El método de metalurgia de polvos es una tecnología ampliamente utilizada para la fabricación de herramientas con y de carburo de tungsteno; en México solamente la empresa Alta Tecnología En Herramientas S. A. De C. V. aplica esta tecnología de origen en México para el desarrollo de herramientas especiales de y con carburo de tungsteno, creando sus propias mezclas para diferentes aplicaciones en la industria metalmeccánica, automotriz, militar, farmacéutica, alimenticia, etc.

Al ser fabricantes de herramientas especiales de y con carburo de tungsteno, se desarrollaron diferentes mezclas metalúrgicas para la aplicación en diversas operaciones de manufactura. Se presenta el método de desarrollo y manufactura de metalurgia de polvos, para el desarrollo y aplicación de un inserto de corte fabricado con el grado metalúrgico de carburo de tungsteno AT9306 para el mecanizado por arranque de viruta de la pieza 1-126 fabricada por una aleación de aluminio.

1.1. ANTECEDENTES

Para la venta de herramientas especiales con carburo de tungsteno en el mercado nacional, una estrategia es someter a prueba dicho producto (la herramienta especial) bajo rendimiento para demostrar la calidad y superioridad del carburo de tungsteno en comparación con herramientas especiales de acero, esta

situación ocurre cuando se introduce la marca con un nuevo prospecto y cliente reciente. Al ser un producto de fabricación especial se desarrolla con base en la idea conceptual, selección de grado de carburo, aplicación del producto y propuesta de mejora que la fuerza de venta recomienda al realizar un levantamiento de la aplicación en la operación del cliente. Al ser el carburo de tungsteno un producto flexible que se emplea para herramienta de corte como partes contra desgaste.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La herramienta de corte que se empleaba para el mecanizado de un componente de aleación de aluminio, se fabricó con acero D2 especificada en la norma American Society for Testing and Materials (ASTM) con un tratamiento de endurecido, el inserto de corte no tiene una geometría convencional la cual se pueda encontrar en el mercado como una herramienta general que se pueda encontrar en un catálogo, debido a que también es montada en una máquina-herramienta especial, por una sujeción específica, adicionalmente la geometría de corte especifica las dimensiones finales de la pieza para el posterior proceso de ensamble del producto final. Por lo anterior se propuso a la empresa transformadora, el desarrollo y manufactura de una herramienta especial de corte para mecanizado, ya que se tiene el alcance de manufactura para realizar una propuesta de innovación empleando una mezcla de pulvimetalurgia con la ventaja competitiva de incrementar el rendimiento de la herramienta de corte, debido a que ésta sufría desgaste prematuro en la geometría de corte el cual por medio del arranque de viruta obtenía pérdida de dimensiones y tolerancia establecidas.

Alta Tecnología en Herramientas, S. A. de C. V. también dispone de diecisiete grados metalúrgicos, con nomenclaturas propias con las siglas AT9301 al AT9317, las cuales son las mezclas de metalurgia de polvos para diversas aplicaciones tales como lo son:

1. AT9301 PARTES PARA DESGASTE (abrasión, fricción)
2. AT9303 PARTES PARA DESGASTE (abrasión, fricción)
3. AT9306 PARTES PARA DESGASTE (abrasión, fricción)
4. AT9306 CORTE (Fundición y materiales no ferrosos)
5. AT9304 CORTE (Aceros al Carbón)
6. AT9309 PARTES PARA DESGASTE (Alto Impacto)
7. AT9310 PARTES PARA DESGASTE (Mediano Impacto)
8. AT9311 PARTES PARA DESGASTE (Bajo Impacto)

El desgaste prematuro de la herramienta generaba paros regulares en la operación de mecanizado al desmontar la herramienta, inspeccionar y re-afilar la herramienta cuando así lo requería al detectar un acabado superficial inadecuado por tal motivo se recomendó el grado AT9306 como aplicación de corte para el mecanizado de materiales no ferrosos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La empresa Apex Tool Group, al no tener flexibilidad en su celda de manufactura para integrar accesorios periféricos en sus máquinas-herramientas que puedan sustituir la herramienta de corte de acero por herramientas de corte comerciales, se propuso el desarrollo y fabricación de una herramienta especial de corte con el grado metalúrgico AT9306 obteniendo como beneficio no modificar las condiciones de trabajo que se encuentra la operación de mecanizado, generando una ventaja competitiva de no integrar accesorios periféricos en sus máquinas-herramientas especiales además de estandarizar el insumo de la herramienta de corte con un proveedor nacional.

El grado metalúrgico recomendado tiene una gran aplicación para la fabricación de herramientas de corte continuo y para el mecanizado de materiales no ferrosos

con un medio refrigerante. La geometría de corte se desarrollará con base en la geometría y dimensión final del componente para su posterior proceso de ensamble, con ello se llevará un control puntual del rendimiento de la herramienta para su servicio de re-afilado, de esa forma el operador en turno no tendrá la necesidad de parar la operación para realizar el re-afilado de la herramienta en un periodo de tiempo a corto plazo, además de minimizar el problema de la viruta acumulada en máquina, resultando en un ambiente propio de trabajo.

1.4. OBJETIVOS

La comercialización en las herramientas especiales, tiene como valor agregado el cumplimiento de objetivos concretados en el proceso de manufactura de La empresa Apex Tool Group, en este caso concreto en la fabricación de un inserto de corte es fundamental concluir en el menor tiempo posible la entrega directa en planta además de cuidar con políticas de privacidad los datos técnicos de los componentes que se mecanizan y fabrican en la empresa.

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar y fabricar un inserto de corte mediante la técnica de metalurgia de polvos con una geometría específica de acuerdo al componente para el mecanizado por arranque de viruta, obteniendo el transformado de la pieza final para un posterior ensamble del producto terminado, incrementando el rendimiento de la operación de mecanizado.

1.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar la mezcla AT9306 como sustrato en la selección de grado metalúrgico para obtener la medición de porcentaje de cobalto (% Co), dureza, densidad y tamaño de partícula como requisito indispensable en la liberación de la mezcla pulvimetalúrgica en el área de metal dentro de las instalaciones de la empresa.

Aplicar la herramienta de corte en la celda de manufactura y recomendaciones sugeridas para el mecanizado por arranque de viruta para la empresa Apex Tool Group como valor agregado al servicio en las instalaciones del cliente.

1.5. HIPÓTESIS

Los grados metalúrgicos de carburo de tungsteno con mayor porcentaje de aleado de cobalto tienen a soportar mayores fuerzas tangenciales ejercidas en la operación como es el caso de las mezclas AT9311, AT9310, AT9309 y AT9308. A diferencia de los grados con menor porcentaje de aleado de cobalto como las mezclas AT9301, AT9303, AT9304 y AT9306.

La aplicación de la mezcla AT9306 es ideal para aplicación como herramienta de corte y como herramienta de transformado dependiendo el tipo de operación de manufactura, lo que lo hace el grado con mayor versatilidad en el desarrollo de aplicaciones para herramienta de corte.

2. MARCO TEÓRICO

La perseverancia y cercana atención a las necesidades del cliente han caracterizado a Alta Tecnología en Herramientas, S. A. de C. V. desde su fundación en 1993 como una empresa pionera de la metalurgia de polvos aplicado en la fabricación de herramientas especiales con aleaciones de metálicas de carburo de tungsteno-cobalto en México; se presenta la gama de productos fabricados en la figura 1.



Figura 1. Gama de fabricación de herramientas especiales (Athesa, 2022)

2.1. METALURGIA DE POLVOS

El método empleado para la fabricación del inserto de corte es la metalurgia de polvos, que es una técnica de procesamiento en la que se producen partes, piezas o componentes a partir de polvos metálicos, no metálicos o mezcla de los dos. En la secuencia usual de producción, los polvos se comprimen (prensado) para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión de las partículas en una masa dura y rígida (sinterizado), (Kumar, Bharti, Dixit, & Nigam, 2020).

Para aplicar la tecnología de metalurgia de polvos en la fabricación de las herramientas especiales se requiere la preparación de mezclas pulvimetalúrgicas, estas mezclas se denominan grados por presentar diferentes características mecánicas posterior al sinterizado. La diferencia principal en cada grado es la adición de aleados en la mezcla, el principal componente de la mezcla es el Carburo de Tungsteno a diferentes porcentajes, al tratarse de fabricar mezcla metálicas para herramientas especiales, debido a esta diferencia de porcentajes se obtiene diferentes propiedades mecánicas; incrementando la tenacidad y disminuyendo la dureza o viceversa, las cuales por medio del método experimental se han tomado el registro del histórico en la selección de mezclas o grado pulvimetalúrgico para el desarrollo de herramientas especiales en diversas aplicaciones industriales.

2.2. POLVOS METÁLICOS

El fabricante de herramientas especiales de Carburo de Tungsteno recibe del extranjero (en México no se producen) las materias primas, que son:

1. Carburo de Tungsteno en polvo (WC);
2. Cobalto en polvo (Co);
3. Carburos de Titanio, Tántalo y Niobio en polvo (TiC, TaC, NbC).

El Wolframio es extraído de la mina en forma de "piedra", este mineral, también conocido como Tungsteno, es pulverizado a granos muy finos, de 1 a 5 micras de tamaño, por medio de procesos químicos, es combinado con el Carbono con ello se obtiene el Carburo de Tungsteno en polvo, (Brookes, 1983).

Se define que ese polvo, junto con los otros elementos se importa de países como Alemania, Finlandia, Bélgica o Estados Unidos; en el área productiva de ATHESA se inicia un proceso de transformación, basado en un Sistema de Gestión de la Calidad como el ISO 9001-2015, que contempla dos fases de transformación: La Metalurgia de polvos y el mecanizado.

2.3. PROCESOS DE OBTENCIÓN DE POLVOS METÁLICOS

Los métodos principales para producir polvos metálicos en volumen comercial son:

1. Atomización
2. Electrolíticos
3. Métodos Mecánicos
4. Métodos Químicos

Atomización: Efectúa la conversión de un metal fundido en una nube de pequeñas gotas que se solidifican formando polvo, se en la figura 2 los diferentes estados del proceso de atomización para la formación de polvos metálicos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad y aplicable a la mayoría de metales ó aleaciones, (Ozols, 1998).

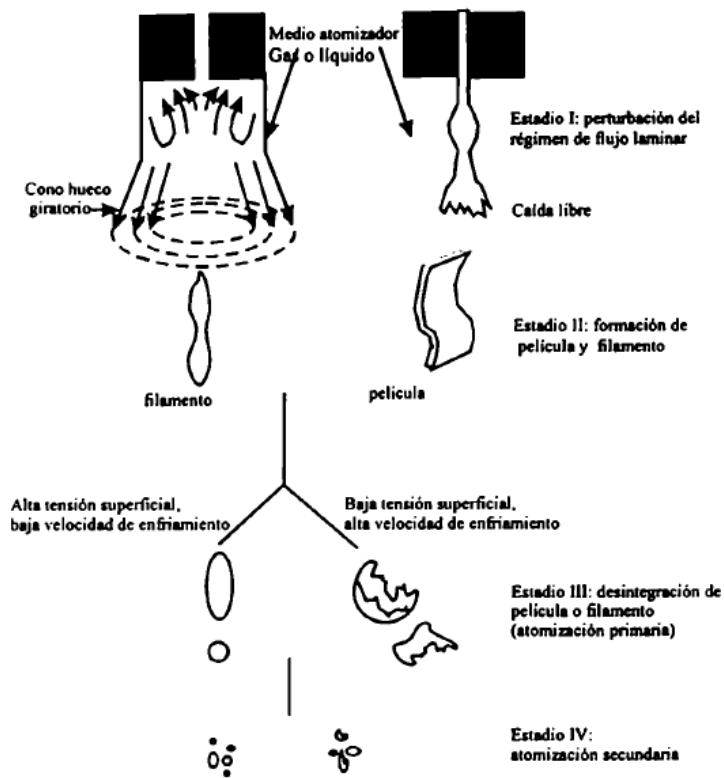


Figura 2. Diferentes estados durante la formación de partículas durante la atomización con fluidos
(American Society for Metals, 1972)

Electrolíticos: En una celda electrolítica en la cual el ánodo (negativo) es el metal a pulverizar. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se desplaza a través del electrolito y se depositan en el cátodo (positivo), se presenta en la figura 2 el concepto de este método. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniendo un polvo metálico. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio (Herrera García, 2011).

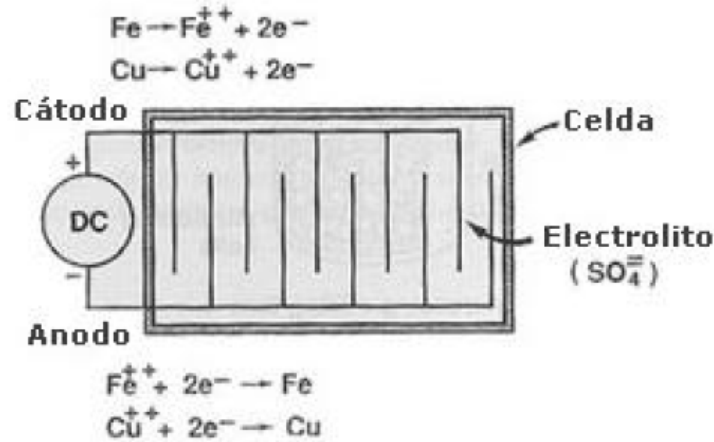


Figura 3. Operación de una celda electrolítica para la deposición de polvo (German, 1984)

Métodos mecánicos: Son métodos de manufactura poco recurrentes con operaciones mecánicas para la obtención de polvos metálicos. La trituración mecánica como se presenta la figura 4, es posible de obtener por operaciones como el impacto, rozamiento, corte y compresión de los aleados metálicos. La formación del polvo es el trabajo en conjunto de estas cuatro operaciones mecánicas, (Jewkes, Sawers, & Stillerman, 1969).

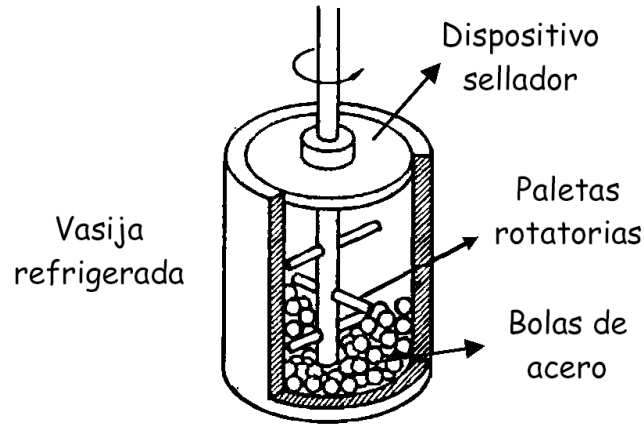


Figura 4. Molino de bolas attritor vertical
(Benjamin, 1970)

Métodos químicos: Reducción química. Implica la reducción de los aleados metálicos a polvos, la aplicación de compuestos con mayor frecuencia son óxidos y otras veces haluros o sales de metal, (Herrera García, 2011) se pueden obtener:

- a. Desde el estado sólido: como la reducción del óxido de hierro con carbono o de óxido de wolframio con hidrógeno.
- b. Desde el estado gaseoso: como la reducción de tetracloruro de titanio gaseoso con magnesio fundido (es decir, el conocido proceso Kroll).
- c. Desde una solución acuosa: como la precipitación de cobre a partir de una solución de sulfato de cobre con hierro o bien como la reducción de una solución salina de níquel amoniacal con hidrógeno bajo presión.

Métodos químicos: Descomposición química de compuestos. Los dos métodos más comunes de producción de polvo en este caso son:

- a. Descomposición de hidruros metálicos
- b. Descomposición de carbonilos metálicos

Cada uno de los cuales implica consumo de energía (relacionada con el incremento del área superficial del metal), (Herrera García, 2011).

2.4. ETAPAS DEL PROCESO DE METALURGIA DE POLVOS

Después de la producción, medición y clasificación de polvos metálicos, la secuencia convencional de la metalurgia de polvos consiste en tres etapas:

1. Combinación y mezclado de polvos.
2. Compactación, en la cual se presan los polvos para obtener la geometría indicada.
3. Sinterizado, conlleva al calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión de cada aleado para generar la unión de partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la geometría indicada.

En ocasiones también emplean operaciones secundarias con el objetivo de mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y otros propósitos con fines de mejorar sus propiedades mecánicas, (Brookes, 1983), en la figura 5 se presenta las operaciones que ATHESA emplea en el proceso de manufactura, esta información se encuentra disponible en el anexo A.



Figura 5. Proceso de metalurgia de polvos en ATHESA (Athesa, 2022)

2.5. CONSOLIDACIÓN EN FRÍO

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un empaclado de los polvos en una configuración con mayor eficiencia, elimina los espacios vacíos que se forman durante el llenado, reduce el espacio entre los poros e incrementa el número de puntos de contacto entre las partículas,

Prensado isostático: en el prensado convencional la presión se aplica en una sola dirección, la operación delimita sobre la geometría del producto dado que los polvos no fluyen fácilmente en la dirección perpendicular de la fuerza ejercida (variaciones en la densidad), en el prensado isostático la dirección se aplica en todas direcciones contra los polvos en un molde, para obtener la compactación se usa presión hidráulica. Se aplica en caliente (HIP) o en frío (CIP), en cualquiera de las dos variantes se logra una densidad más uniforme, (Brookes, 1983).

CIP: Prensado isostático en frío. El molde flexible se sobredimensiona para compensar la contracción se aplica agua o aceite para ejercer la presión hidrostática, se observa en la figura 6 el concepto del método. Las herramientas son de menor costo en corridas cortas de producción, pero se tiene menor precisión dimensional de forma general, (Alting, 1994).

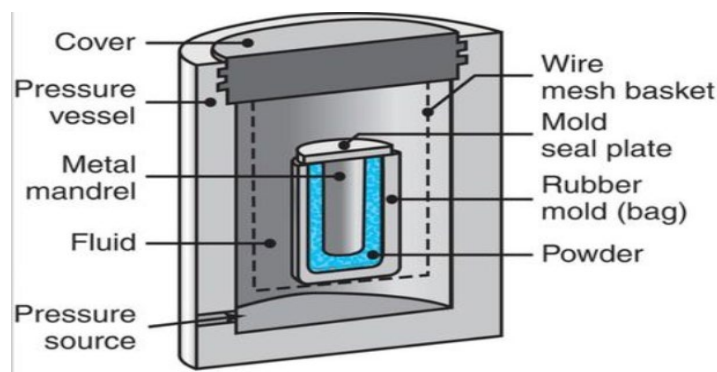


Figura 6. Prensado isostático en frío
(Chang & Yuyuan, 2013)

2.6. TIPOS DE SINTERIZACIÓN

HIP: la compresión es por medio de un gas inerte, la compresión y el sinterizado se realizan en un mismo paso (alta presión y temperatura) como se observa en la figura 7, el molde se hace de lámina, se logran partes de alta densidad (porosidad casi cero), industria aeroespacial, (Furuya, Jitsukawa, & Saito, 2022).

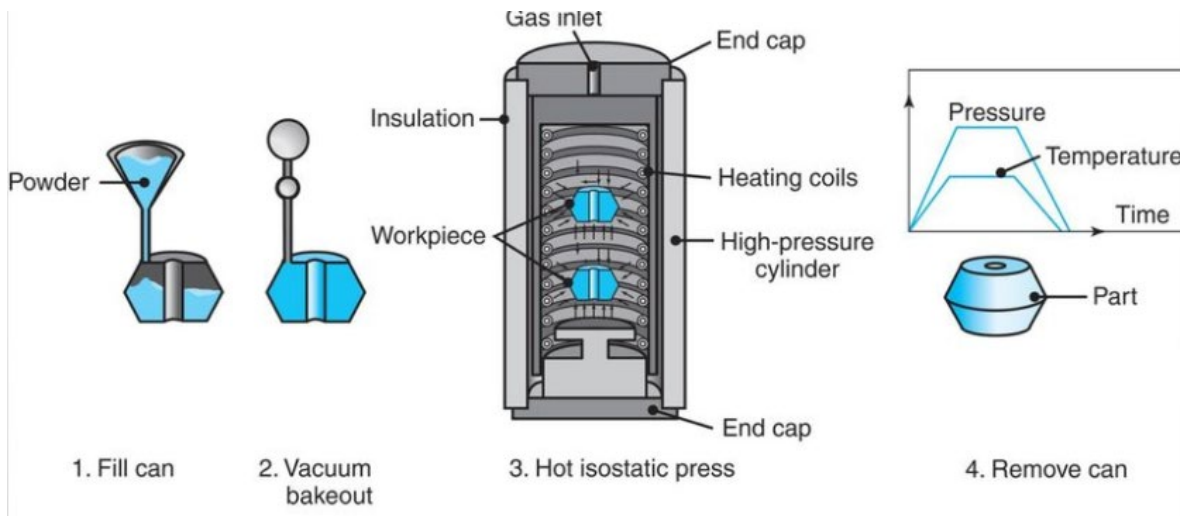


Figura 7. Prensado isostático en caliente (Chang & Yuyuan, 2013)

Moldeo por inyección de polvos: también conocido como “moldeo por inyección metálica” (MIM), en donde el aglomerante es un termoplástico. Este proceso combina la inyección con el sinterizado, este concepto se observa en la figura 8. Permite espesores de pared pequeños y buenas tolerancias, (Wahi, Muhamad, Sulong, & Ahmad, 2015).

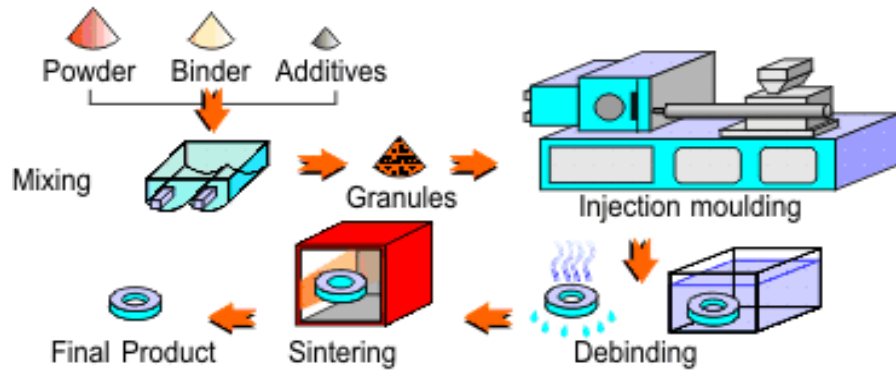


Figura 8. Moldeo por inyección de polvos
(Cambell, 2004)

Laminado de polvos: Los polvos pueden comprimirse en una operación de laminado para formar material metálico en tiras, en la figura 9 se observa el concepto de este método. El proceso se emplea comúnmente para operar de forma continua o intermitente. Los polvos metálicos se compactan entre rodillos para formar una “tira verde” que se alimenta directamente a un horno de sinterizado. Se lamina y se enfría, en algunos casos se hace un re-sinterizado, (Rodríguez, y otros, 2016).

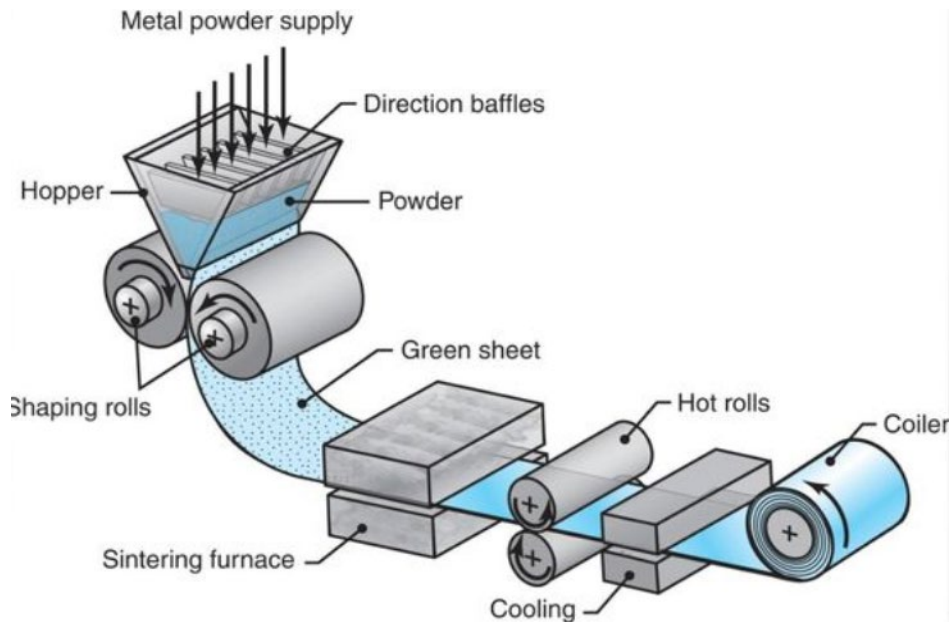


Figura 9. Laminado de polvos
(Chang & Yuyuan, 2013)

2.7. EL CARBURO DE TUNGSTENO: BREVE HISTORIA

A finales del siglo XIX, las herramientas de corte ya se fabricaban con aceros de alta velocidad. Sin embargo a principio del siglo XX, la creciente productividad en los países industrializados, demandó la búsqueda de materiales más duros. Se descubrió que algunos aceros de alta velocidad tenían notable capacidad para maquinados debido a partículas muy duras un tanto atípicas. Fueron de tungsteno o volframio (elemento mineral con símbolo W, número atómico 74, peso atómico 183.85), combinadas con el carbono (C), (Brookes, 1983).

En 1914, el alemán Karl Schröter, (Jewkes, Sawers, & Stillerman, 1969) empezó a desarrollar mezclas de carburo de tungsteno con pequeños porcentajes de níquel o cobalto, compactadas o prensadas en frío, y llevadas a temperaturas cercanas a los 1500° C. El resultado: un metal con baja porosidad, extraordinaria dureza y una considerable tenacidad (referencia). Estaba naciendo lo que mundialmente se conoce como <<cemented carbide>> (carburo cementado), ó simplemente <<hard metal>> (metal duro).

En 1927, investigador alemán, Fried Krupp, (Upadhyaya, 1998) impulsó con el nombre <<WIDIA>> (Wie Diamant), la producción masiva de los <<sintered hardmetals>> (carburos sinterizados) (referencia). Así en 1930, ya se producía en Alemania una tonelada mensual, y para 1944, hasta cuarenta toneladas mensuales.

El desarrollo continuó no solo en Alemania, sino en países como Estados Unidos, Austria, Suecia e Inglaterra. Y se avanzó de tal forma que fueron creándose mezclas diversas, con porcentajes variables de carburo de tungsteno (WC- desde 75% hasta 97%) y de cobalto (Co- desde 3% hasta 25%), (referencia). Cabe mencionar que a la mezcla base WC-Co se le conoce como <<carburo simple>> ó <<carburo básico>> (referencia). Sin embargo, la misma experimentación, surgida de las crecientes necesidades de aplicaciones, trajo como resultado mezclas llamadas <<carburos aleados>>, con la incorporación del Carburo de Titanio <<TiC>>,

Carburo de Tántalo <<TaC>>, y el Carburo de Niobio <<NbC>>, naturalmente, en diversos porcentajes, (Alting, 1994).

2.8 EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

Desde finales de la década de los años 20's, hasta los años 70's, se fue dando un gran desarrollo tecnológico en el mundo del carburo. Procesos como el sinterizado, que se fue perfeccionando con hornos de atmósfera de hidrógeno y hornos al alto vacío, así como el prensado, que de ser totalmente mecánico, paso a ser hidráulico o isostático en caliente, han redundado en carburos con porosidad mínima, con excelentes propiedades como alta resistencia al desgaste, al impacto y a la ruptura transversal.

Todos estos factores, porcentajes en las mezclas, sus consecuentes propiedades y aplicaciones, hicieron necesaria la homogenización de criterios en los distintos fabricantes. Y aunque la secrecía en los desarrollos en los diferentes países y compañías, al principio fue un obstáculo, acabaron estableciéndose normas internacionales. En Europa occidental se origino el sistema ISO, en los Estados Unidos el sistema US <<code>>, y en Gran Bretaña el sistema BHMA, con equivalencias en los porcentajes de los componentes. Por ejemplo: un <<grado>> de carburo adecuado para un inserto de corte para US <<code>> ó 560 para BHMA, pero en todos los casos, el contenido de Carburo de Tungsteno es del 94%, y el contenido de Cobalto es del 6%, (Cambell, 2004).

2.9 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS PULVIMETALURGICAS

Ya se ha mencionado que la característica más relevante del carburo de tungsteno es su extraordinaria dureza, la cual está en un rango de entre 83 HRA a 94.5 HRA (escala Rockwell <<A>>), dependiendo del <<grado>> de la mezcla. Dicha dureza, le proporciona al carburo una de sus principales propiedades: La resistencia al desgaste. Esto es inversamente proporcional al contenido de cobalto, es decir, a menor porcentaje de cobalto en la mezcla, mayor es la resistencia al

desgaste (es un carburo más duro); mientras que para las mezclas con mayor porcentaje de cobalto, menor es la resistencia al desgaste (es un carburo menos duro). Pero aquí ocurre algo: si aumenta la resistencia al desgaste, disminuye la tenacidad, y viceversa, si disminuye la resistencia al desgaste, aumenta la tenacidad. Dependerá del tipo de aplicación en cada herramienta, el <<grado>>, y en consecuencia, un carburo muy duro y resistente al desgaste (con poco cobalto), ó un carburo menos duro pero más tenaz y resistente a la fractura (con más contenido de cobalto), (Correa, Santos, & Klein, 2010).

Aparte del cobalto (que es el elemento que produce el <<cementado>>), el tamaño del grano de la mezcla, así como la eventual adición de Carburo de Titanio (TiC), Carburo de Tántalo (TaC), y/o Carburo de Niobio (NbC), también son factores que inciden directamente en las propiedades del Carburo de Tungsteno, (Kumar & Rai, 2018).

Densidad. Desde 5.5 g/cm³ para mezclas de carburo a base de TiC hasta 15.4 g/cm³ para WC con bajo Cobalto.

Dureza. Ya descrito, con dureza desde 83 HRA (800 HV) para mezclas con alto porcentaje de cobalto, hasta 94.5 HRA (2400 HV) para mezclas con bajo porcentaje de cobalto.

Resistencia al desgaste. También considerada como resistencia a la abrasión. Se mide en unidades arbitrarias, y se toma, que tanto <<dura>>, ó cuanto se ha <<desgastado>> una mezcla con respecto a otra en una condición controlada de mecanizado.

Resistencia a la ruptura transversal. Mide el momento en que una muestra de carburo con una <<carga>> al centro de la pieza colocada en dos soportes, llega

al límite en que presenta fatiga y se <<fractura>>. Está dado por N/mm^2 o kgf/mm^2 ó lbf/in^2 . El rango se encuentra entre 600 y 3000 N/mm^2 .

Resistencia al impacto. También conocida como tenacidad, y se mide en Joule, el instante en que un <<block>> de carburo se <<rompe>> por la acción de un impacto.

Resistencia a la compresión. Se mide en N/mm^2 y está en un rango de entre 3000 a 7000, dependiendo del contenido de cobalto.

Resistencia a la coerción del campo magnético. También es conocida como saturación magnética. Si hay deficiencia de carbono, ó impurezas, la susceptibilidad a la acción de un campo magnético crece. Se mide en A/m. El rango se encuentra entre 6000 y 26000, dependiendo del contenido de Cobalto.

2.9.1 Metalurgia del carburo de tungsteno

La mezcla como parte del proceso, la materia prima primero pasa por una operación de secado-granulado-cribado, para de ahí pasar a dos baterías de molinos, donde se efectúa la molienda. Hay molinos rotatorios, en los cuales la mezcla puede estar hasta siete días; pero también los hay vibratorios, en donde sólo 48 hrs. De molienda pueden ser suficientes (figura referenciada). De ahí se envían muestras al laboratorio, para verificar el Tamaño Promedio de la Partícula o APS (Average Particle Size). Ese tamaño, dependiendo del <<grado>> que se prepare, es variable de 0.25 micras o menos, es un grano ultra fino; de 0.26 a 0.7 micras es un micro grano; de 0.8 a 1.4 micras es un grano fino, de 1.5 a 2 micras es un grano medio, y de 3 a 5 micras es un grano grueso, (Upadhyaya, 1998), (Slokar Benić, Šubić, & Erman, 2020).

Prensado: Para cada lote de cualquier grado de Carburo, se le añade un lubricante, que normalmente es una parafina como el carbón tetracloroide, que

es un solvente volátil. La función del lubricante es aglutinar temporalmente la mezcla, y así poder prensarla. Aquí hay otra acción para el control de la calidad: de cada lote de mezcla terminada, se obtienen en prensa, cinco probetas, las cuales se pre-sinterizan (así se les extrae la parafina), y se envían al Laboratorio para efectuar pruebas, en las cuales se verifica la micro estructura, es decir el tamaño de los cristales de Carburo de Tungsteno; también se obtiene la medición de la densidad, la dureza y la saturación magnética.

Se tendrán que estar en los rangos previamente establecidos en tablas internacionales, dependiendo del <<grado de carburo>> de que se trate la mezcla. Si las mediciones obtenidas, se encuentran dentro de parámetro, el Laboratorio da su Vo. Bo. Para el inicio formal de la orden de producción que previamente se haya generado para la elaboración de la forma base de alguna herramienta.

Durante la operación de prensado, en dónde se aplican presiones con valores de 50 a 150 N/mm², se utilizan dados de diversas formas, durante esta etapa de proceso de manufactura se obtiene una preforma de la herramienta y posteriormente se continúa con la etapa de sinterizado donde se obtiene su extraordinaria dureza del material.

Preformado: En la manufactura de algunas piezas, una vez que éstas han sido prensadas, pasan directamente a etapa de sinterizado; sin embargo, en algunos casos, dada la geometría final, se requiere, <<preformado en blando>>; este concepto se refiere que la pieza en verde al salir de la prensa, tiene los elementos metalúrgicos, que proporcionarán las cualidades de <<metal duro>>, solamente está aglutinado por la acción de la parafina, por lo que tiene una densidad maleable sin esfuerzos, lo que puede quebrarse o romperse tan solo con la acción de las manos. En el proceso de Sinterizado las piezas salen totalmente <<duras>>, y aunque es posible mecanizarlas, en la etapa de preformado, es más sencillo proporcionarles precisamente una geometría aproximada a su configuración final.

Para acceder a esta operación, las piezas en proceso, una vez que han sido prensadas, se llevan al horno de sinterizado, pero sólo a efectuarles una <<pre-sinterización>>, es decir, se someten a una temperatura máxima de 850 °C, suficiente para eliminar la parafina que mantenía una relativa cohesión del Carburo de Tungsteno con el Cobalto, la cual ahora existe gracias a la acción de la misma temperatura. En esas condiciones, y no exentos de cuidados para evitar rupturas, las piezas pueden ser mecanizadas por arranque de viruta con cierta facilidad, (Cambell, 2004).

Sinterizado. Esta etapa es la más crítica en el proceso de manufactura de los Carburos Cementados. Es un proceso complejo, ya que durante el mismo, las piezas se contraen linealmente entre el 18% y el 26%; entre 45% y el 60% en volumen total de la pieza preformada. El sinterizado, es la acción de calentar a temperaturas preestablecidas, las piezas previamente prensadas, y en su caso, preformadas. Dichas temperaturas varían, dependiendo del <<grado>> que se encuentre en proceso de sinterizado, esto es, de los porcentajes de Carburo de Tungsteno (WC) y de Cobalto (Co) para los Carburos Simples; de los porcentajes de Carburo de Tungsteno (WC), Cobalto (Co) y Carburo de Titanio (TiC), Carburo de Tántalo (TaC), y Carburo de Niobio (NbC), para los Carburos Aleados. Cabe mencionar que en algunos "grados", se incorpora Carburo de Cromo (CrC) en pequeños porcentajes.

También es oportuno mencionar las propiedades que se ven incrementadas en el caso de los Carburos Aleados, cuando se les han incorporado precisamente los otros componentes:

- a. Carburo de Titanio (TiC). Provee un bajo coeficiente de fricción.
- b. Carburo de Tántalo (TaC). Aumenta la resistencia a la deformación por causa del calor.
- c. Carburo de Niobio (NbC). Contribuye también a incrementar la resistencia a deformaciones llamadas <<craterización>>, igualmente por efecto del calor.
- d. Carburo de Cromo (CrC). Proporciona una mayor resistencia a la corrosión.

Los tipos de hornos utilizados en el sinterizado son variados. Para el caso de los Carburos Simples se usan el Horno de Resistencia en Caliente (Resistance Heated Furnace), el Horno de Atmósfera de Hidrogeno (Hydrogen Atmosphere Furnace), o en el Horno de Tubo Semi-Continuo (Semi-Continuos Tube Furnace). Para el caso de los Carburos Aleados se usan el Horno de Inducción en Caliente (Induction Heated Furnace) o el Horno de Vacío (Vacuum Furnace), (Brookes, 1983).

El proceso de sinterizado consiste en ir elevando la temperatura gradualmente, desde temperatura ambiente hasta la temperatura máxima de sinterizado, que como temperatura promedio es 1500 °C. Esto se logra en un tiempo estándar de 10-11 horas. En ese período, en cuanto se alcanza una temperatura de 1350 °C, ocurre el siguiente fenómeno: el Cobalto empieza a diluirse, y con ello, inicia la acción de <<cementado>>, en otras palabras, comienza a <<permear>> molecularmente, y con ello, a cohesionar los cristales de Carburo de Tungsteno. Este efecto llega a su punto óptimo justamente cuando la temperatura nominal de sinterizado ha sido alcanzado. En ese momento la fusión Carburo de Tungsteno-Cobalto (y en su caso, los otros aleados), ya es insoluble. A medida que la temperatura ha ido en aumento, los <<huecos>> entre cristales, a lo cual se le conoce como <<porosidad>>, van desapareciendo, así como algunas posibles impurezas que todavía hubieran podido contener las piezas prensadas (esto último es la razón por lo que en el sinterizado las piezas se <<encogen>> en la proporción mencionada anteriormente).

Una vez que se llegó a la temperatura de sinterizado, permanece constante la temperatura del horno durante 60-90 minutos; para de ahí, también de una manera paulatina, desciende la temperatura para normalizar a temperatura ambiente. Esto se lleva a cabo en 2.5-3 horas. Al salir del horno, las piezas son de auténtico <<metal duro>>.

Continúa el proceso, iniciando con una etapa en el Sistema de Calidad. Dependiendo de la carga en el horno (con capacidad de 30 kilogramos o de 100

kilogramos), se toman algunas muestras y son llevadas al laboratorio para efectuarles dos pruebas, una de dureza y la otra correspondiente a la porosidad:

Dureza, Se realiza una prueba convencional con un durómetro, en escala Rockwell "A". Dependiendo del <<grado>> del producto que se tome medida, este deberá estar en el rango correcto.

Porosidad. Con un microscopio, de cuando menos 1500 aumentos, se observan los <<huecos>> que pudieron haber quedado entre los cristales; estos se observan como marcas más oscuras de diferentes tamaños. Por norma hay tres tipos de porosidad: Tipo "C", que es causada por exceso de Carbono o una <<sobre-sinterización>>, y se sub-clasifican en CO2, CO4, CO6 y CO8, según correspondan al tamaño en cualquier caso todas son rechazadas. Tipo "B", que es causada por impurezas no eliminadas, se sub-clasifican en BO2, BO4, BO6 y BO8, según su tamaño (las tipo "B" son menos grandes que las tipo "C", pero también son todas rechazadas). Por último las tipo "A", que son el tipo de porosidad más pequeño y se sub-clasifican en AO2 (Excelente), AO4 (Buena), AO6 (Regular) y AO8 (Mala). De estas, solo la AO8 es rechazada.

2.9.2 Acabados (mecanizados) en el carburo de tungsteno

El área de acabado es amplia en el proceso de manufactura y con flexibilidad en los procesos de mecanizado, contienen operaciones convencionales como los son el lapeado, el rectificado, el torneado, el fresado, entre las principales. Dada la naturaleza dura del Carburo de Tungsteno en estado sinterizado, se emplean piedras de diamante perfiladas para proporcionar las geometrías requeridas especificadas en el diseño del producto, así como pastas de diamante para la aplicación de pulido en superficies especificadas, (Dieter, 1998).

2.9.3 Clasificación de las mezclas pulvimetalúrgicas

Existe un concepto en el argot técnico en las mezclas de Carburo de Tungsteno, y ese es el <<grado>>, consiste fundamentalmente en el balance estequiométrico de los componentes de la mezcla que lo confirma, correspondiente al porcentaje de Carburo de Tungsteno, porcentaje de Cobalto, y sus porcentajes de aleados como lo son el Carburo de Titanio, Carburo de Tántalo o Carburo de Niobio, (Secotools, 2005).

El desarrollo tecnológico ha permitido la estandarización de criterios en cuanto a la relación de grado y aplicación, lo cual se establece bajo normativas internacionales como lo es ISO y ANSI, sin embargo, no restringen la precisión de los porcentajes que conforma las mezclas. Un ejemplo es el grado C2 bajo la norma ANSI, contiene un 94% de Carburo de Tungsteno y 6% de Cobalto, es considerado una mezcla simple; cada fabricante varía en décimas o incluso centésimas, dichos porcentajes, lo cual no quiere decir que se encuentren fuera de especificación, genera una apertura de patente de hasta tres grados bajo la misma norma.

3. RESULTADOS

Las normas internacionales para la fabricación de mezclas pulvimetalúrgicas son ISO y ANSI. Se muestra a continuación información resumida de las normas, porcentajes de aleados y propiedades mecánicas (dureza, densidad y esfuerzo a la ruptura transversal) empleados por los principales fabricantes de herramientas en el mercado mexicano de la industria. Se presenta una tabla comparativa bajo las normas ISO/ANSI en función de las aplicaciones y mecanizados. Se reitera que no existe una equivalencia exacta en los grados de los diferentes fabricantes, esta información es referencial, (Secotools, 2005).

Las aplicaciones en los diferentes sectores de la industria son muy variadas, y aun que en términos generales todas las mezclas pulvimetalúrgicas son <<duros>>, la diferencia que existe en los distintos grados en este concepto (dureza en Rockwell "A", Rockwell "C", Brindell, etc.), marca precisamente los usos y aplicaciones en donde tendrán la máxima rentabilidad. A continuación, se describen las diferencias entre familias de grados de Carburo en base a ese criterio, considerando la norma ANSI, y la descripción particular de ALTA TECNOLOGÍA EN HERRAMIENTAS, S. A. DE C. V. (ATHESA):

Herramientas de corte:

Aquí hay una referencia muy definida a la industria metalmecánica, en donde los mecanizados con mayores esfuerzos tangenciales y menores fuerzas cortantes en operaciones típicas por arranque de viruta como lo son la operación de torneado, fresado, barrenado, rimado, roscado, entre las principales en modo convencional o por control numérico, demanda eficiencia y productividad. Los grados de carburo de tungsteno utilizados en herramientas de corte, están sub-clasificados, se muestra abajo en la tabla 1 y tabla 2, dependiendo el material en donde se requiere la operación de mecanizado.

Tabla 1. Equivalencia de grados para mecanizado de metales

Grados de Carburo para el mecanizado de hierro colado y materiales no ferrosos	
ANSIS	ATHESA
C1	AT9310
C2	AT9306
C3	AT9317
C4	AT9303

Elaboración propia

Tabla 2. Equivalencia de grados para mecanizado de aceros

Grados de Carburo para el mecanizado de aceros al carbono	
ANSIS	ATHESA
C5	AT9304
C6	AT9304
C7	AT9305
C8	AT9302

Elaboración propia

Herramientas resistentes a la abrasión

Las herramientas manufacturadas como partes contra desgaste son las herramientas que contienen secciones de carburo sólido con la propiedad mecánica de adsorber fuerzas cortantes y disiparlas de tal forma que en operaciones como el prensado, la extrusión, el trefilado, el reducido, etc. Dónde la fricción y la abrasión se manifiestan en su máxima expresión. Los grados de carburo de tungsteno utilizados en herramientas resistentes a la abrasión, están subclasificados, se muestra abajo en la tabla 3; típica aplicación de este grado de carburo es proceso de manufactura de alambres, agujas, lijas, piedras ó discos de abrasivos, entre otros.

Tabla 3. Equivalencia de grados resistentes a la abrasión

Grados de Carburo resistentes a la abrasión	
ANSIS	ATHESA
C9	No disponible en ATHESA
C10	AT9301
C11	AT9311

Elaboración propia

Herramientas resistentes al impacto

Las herramientas manufacturadas como partes contra desgaste también tiene la particularidad que, en operaciones como el estampado, corte por impacto o forjado, donde precisamente los impactos de diferentes magnitudes son la parte fundamental del proceso productivo. Los grados de carburo de tungsteno utilizados en herramientas resistentes al impacto, están sub-clasificados, se muestra abajo en la tabla 4. En la fabricación de botes y tapas metálicas, así como tornillería, remaches y clavos, o cartuchos para bala, o pernos para pistón, son utilizados dados, matrices y punzones con la selección de estas mezclas pulvimetalúrgicas.

Tabla 4. Equivalencia de grados resistentes al impacto

Grados de Carburo resistentes al impacto	
ANSIS	ATHESA
C12	AT9310
C13	AT9309
C14	AT9318

Elaboración propia

Las aplicaciones en la industria son múltiples y se han descrito en forma genérica; las más representativas, sin embargo, hay otros sectores como la minería, la construcción, la industria maderera, entre otras, que utilizar herramientas de/con Carburo de Tungsteno en sus procesos de manufactura. El desarrollo y fabricación del inserto como herramienta de corte especial, comenzó con el diseño

conceptual de la herramienta, se analizó la aplicación que esta herramienta ejercida en el proceso de manufactura del cliente, se seleccionó el grado de carburo de tungsteno que se recomienda para la operación de mecanizado en metales no ferrosos sin corte interrumpido y refrigerado de forma externa con soluble acuosos semi-sintético.

3.1. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

El concepto de la herramienta de corte especial se asemeja a un diseño de herramienta estacionaria para torno como máquina-herramienta, se considera el mismo principio de diseño mecánico, el inserto debe contener un ángulo de filo, ángulo de ataque y ángulo de incidencia; el cuál se determina por el tipo de material a mecanizar, al tratarse de un material no ferroso, siendo una aleación de aluminio aunado se toma de referencia la pieza física y dibujo del modelo a mecanizar de la cual se establece la longitud de la operación, chaflán de ángulo de 45° a partir de esas dimensiones se desarrolló una geometría de corte especial, se presenta en la figura 10 una sección del dibujo del modelo.

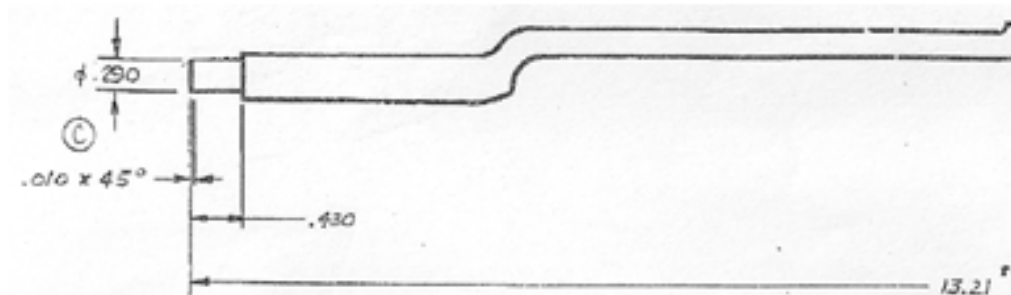


Figura 10. Modelo a mecanizar (Dimensión final)
(Apextool Group Manufacturing, 2022)

Como procedimiento interno de la marca ATHESA, se revisó en conjunto con el usuario final el diseño a detalle del inserto de corte para confirmar el concepto de la herramienta y tolerancias dimensionales para su fabricación; debido a que se considera una fabricación de único modelo se realiza este procedimiento con

cada nuevo proyecto y es la última instancia para realizar modificaciones al diseño mecánico, se observa en la figura 11.

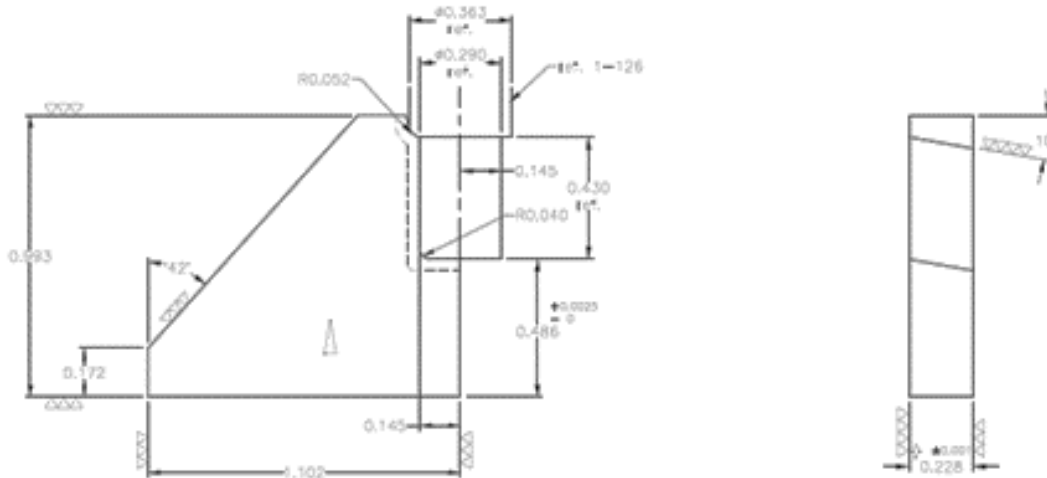


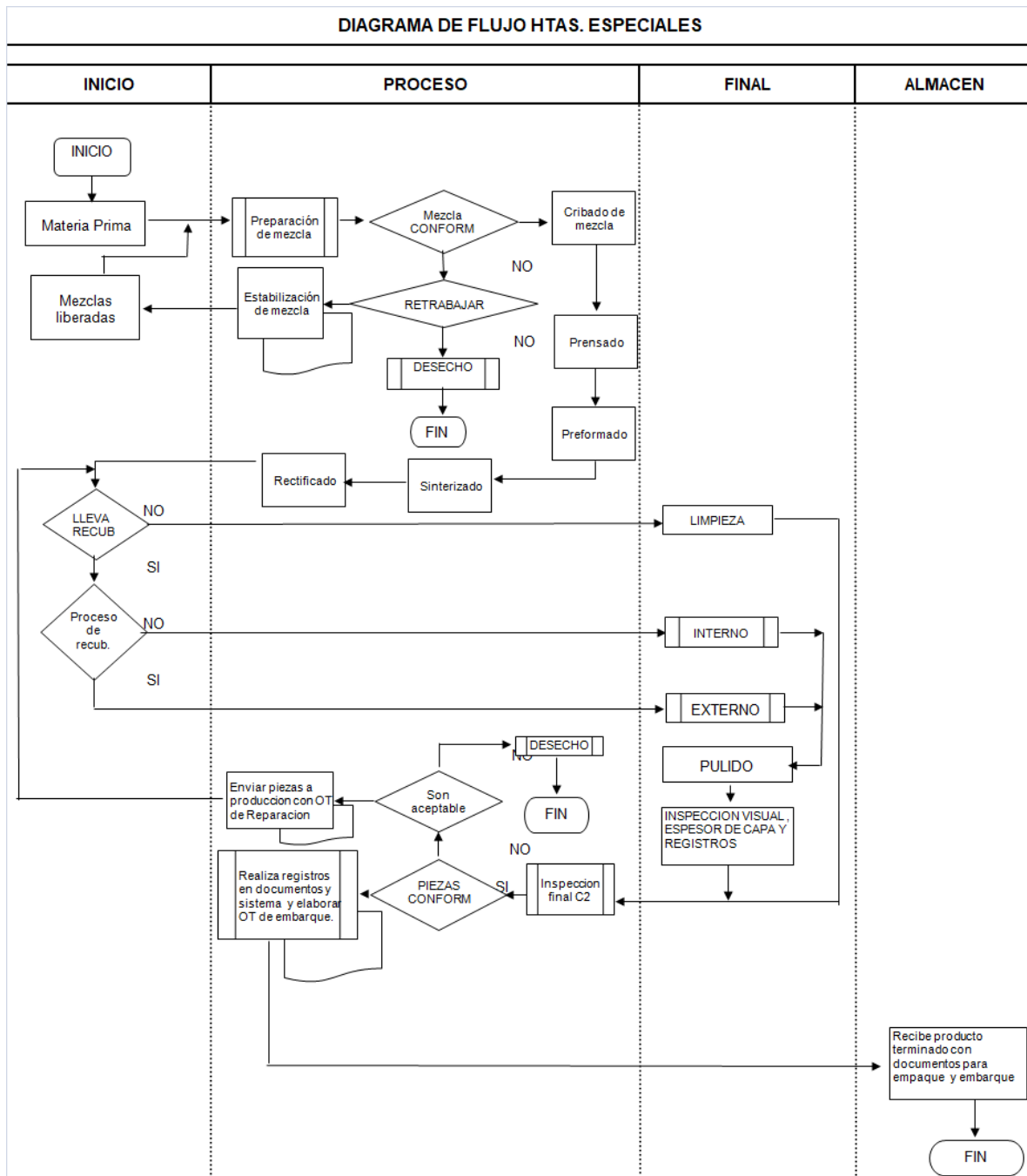
Figura 11. Diseño a detalle del inserto de corte (1-26)
(Athesa, 2022)

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DE CARBURO DE TUNGSTENO

Una vez que se hace una inspección en el laboratorio de muestras de las materias primas recibidas; son validadas, se procede a preparar los grados metalúrgicos con características específicas, el cobalto se usa como material aglutinante, es decir, es el agente cementante que liga las partículas de Carburo Tungsteno.

EL grado metalúrgico consistió en la mezcla de carburo de tungsteno y cobalto en conjunto con otros aleados, en el proceso de preparación de la mezcla se considera el proceso de molienda y secado asegurando la integración de los componentes, se muestra una tabla con el proceso de flujo para la fabricación de herramientas especiales, ver tabla 5.

Tabla 5. Diagrama de flujo herramientas especiales



Elaboración propia

Por cada lote de mezcla terminada, se obtienen en el proceso de prensado, cinco probetas, las cuales se pre-sinterizan (así se les extrae la parafina) para obtener un polvo seco y homogéneo.

Los grados metalúrgicos de carburo de tungsteno con mayor porcentaje de aleado de cobalto tienen a soportar mayores esfuerzos tangenciales ejercidas en la operación como es el caso de las mezclas AT9316 y AT9310. A diferencia de los grados con menor porcentaje de aleado de cobalto como la mezcla AT9306. En la figura 12 presenta el porcentaje del aleado cobalto determinada a partir de los diferentes tipos de grados o mezclas pulvimetalúrgicas fabricadas por ATHESA.

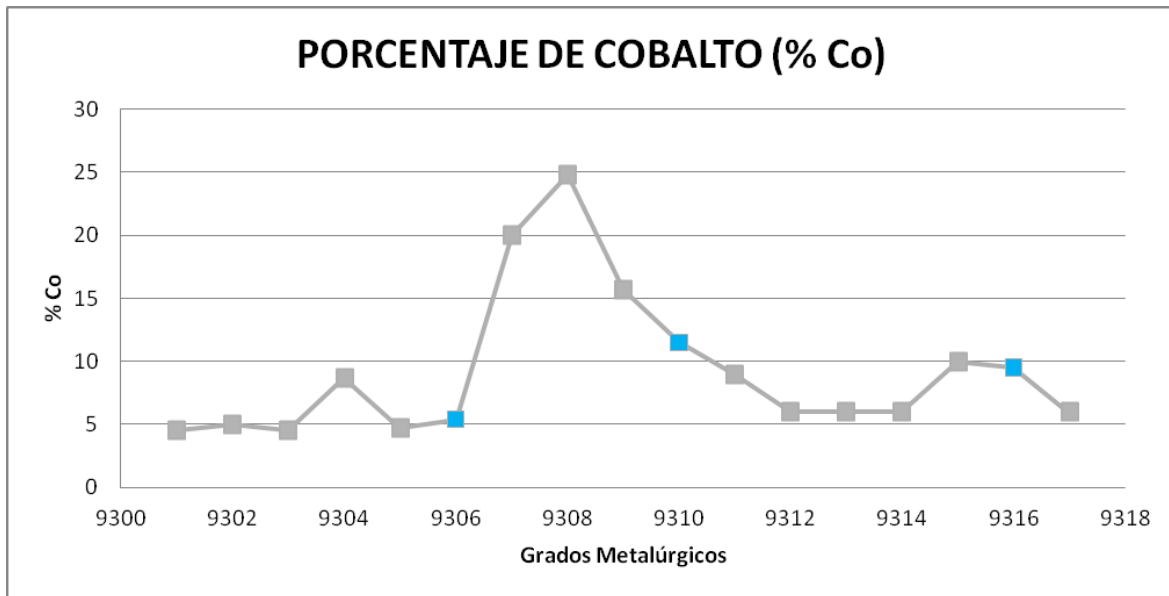


Figura 12. Medición porcentaje de Cobalto (% Co)
Elaboración propia

La dureza y la tenacidad dependen del tamaño de partícula del carburo de tungsteno en conjunto con el contenido de cobalto decreciendo con el aumento del contenido en la mezcla. El comportamiento del gráfico, se presenta en la figura 13 el notable incremento en la dureza por el decremento de porcentaje de aleado de cobalto como en la mezcla AT9306 a diferencia de las mezclas AT9310 y AT9316.

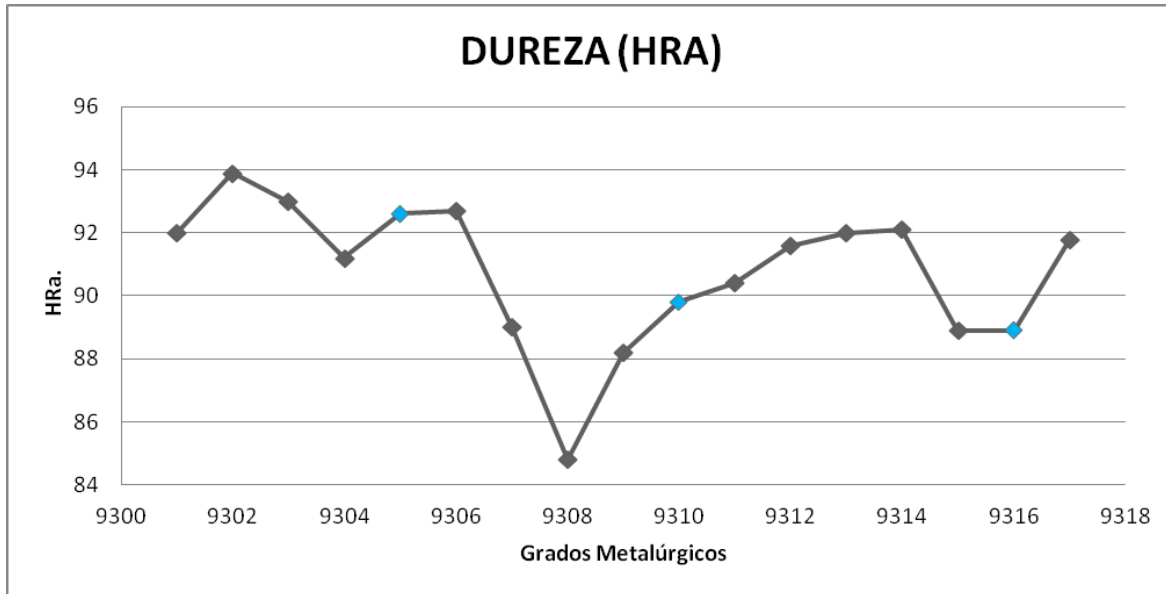


Figura 13. Medición de dureza (HRA)
Elaboración propia

La densidad determinada de los grados pulvimetalurgicos muestra una variación a partir de los diferentes componentes agregados a la mezcla, esto dependiendo el lote de fabricación a liberar en el proceso de manufactura, debido a políticas de privacidad no se mostrará la estructura de las mezclas con los componentes aleados incluidos para grado; sin embargo se muestra de forma general el incremento de densidad conforme al porcentaje de cobalto incluido en la mezcla se presenta este comportamiento en la figura 14.

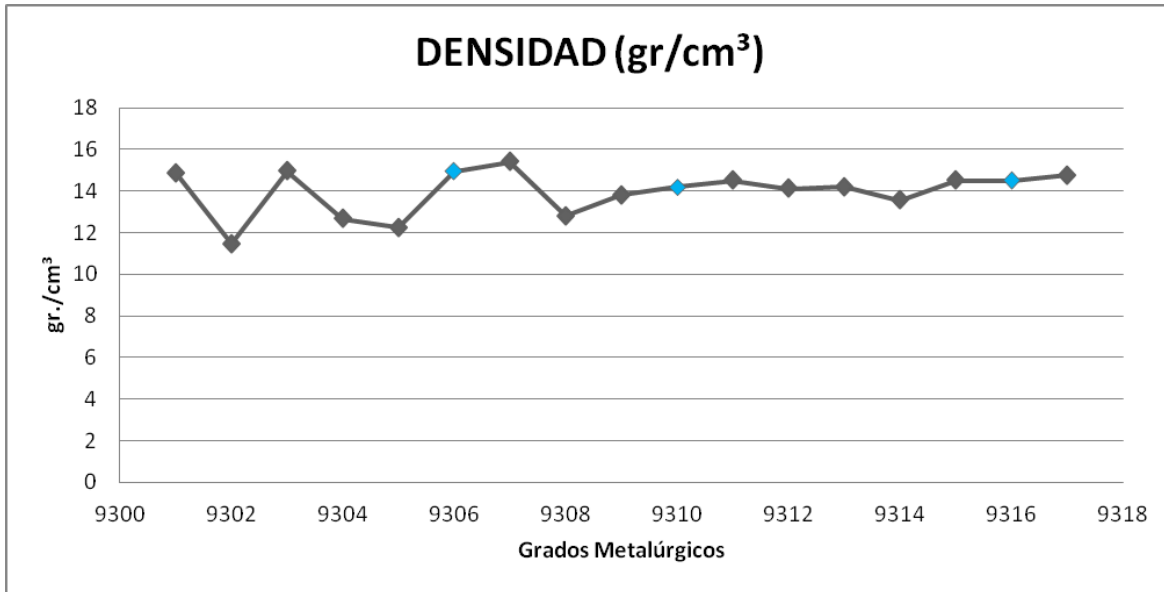


Figura 14. Medición de densidad (gr/cm³)
Elaboración propia

Para obtener durezas elevadas se utilizan polvos de carburo de tungsteno de grano muy fino, del orden de $0.5\mu\text{m}$ a $1.0\mu\text{m}$ y contenidos bajos de Cobalto de entre 4% y 6%; se puede observar en la figura 15, la micro-estructura del grado AT9306, el grano de polvo de los aleados, son los elementos observados más oscuros presentan el orden previamente mencionado.

Para grados de menor dureza se utilizan tipos de grano de WC de mayor granulometría, del orden de $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ y porcentajes mayores de Cobalto; se puede observar en la figura 16, dónde la micro-estructura del grado AT9310, presenta el tamaño de grano con el orden previamente mencionado en conclusión al aumentar la dureza, disminuye la tenacidad y aumenta la fragilidad y viceversa.

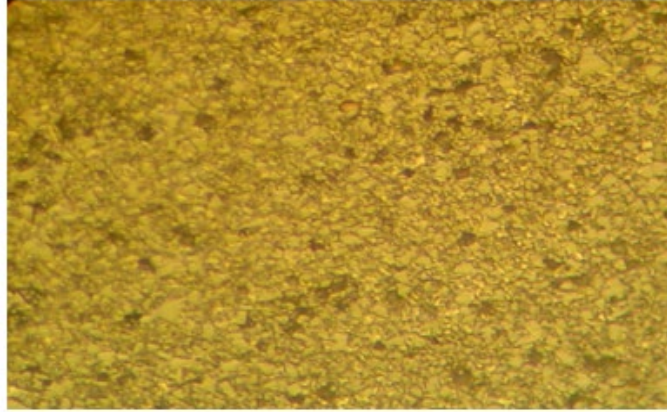


Figura 15. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta con aleados (AT9306)
(Athesa, 2022)

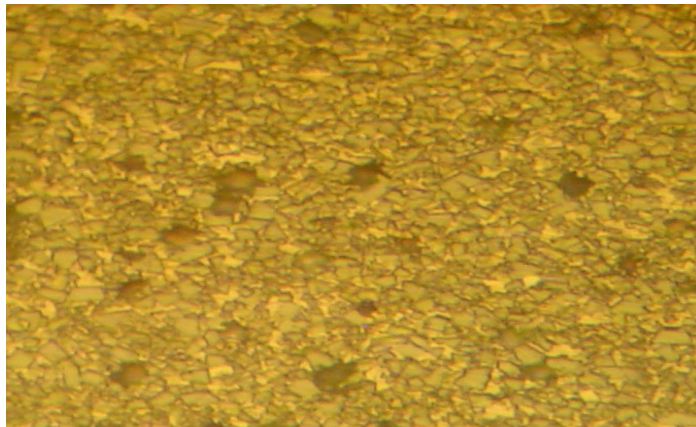


Figura 16. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta con aleados (AT9310)
(Athesa, 2022)

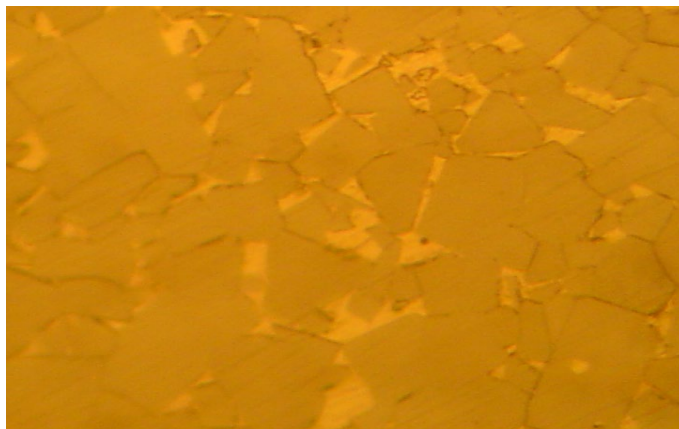


Figura 17. Micro-estructura 10X MO, de la mezcla compuesta sin aleados (AT9316)
(Athesa, 2022)

Las composiciones metalográficas de cada mezcla, lo hace apropiado para cada aplicación en específico en el grado AT9306, (ver figura 15); es recomendado para fabricar herramientas de corte. No obstante, si bien se tiene definido un parámetro y rango en la composición de los distintos grados, la aplicación particular en cada caso implica un análisis de campo, en donde muy diversos factores coadyuvarán a decidir la selección pertinente para la operación de manufactura, (ver tabla 6). En el caso del grado AT9310, (ver figura 16) es recomendado para aplicaciones de fabricación de partes contra-desgaste y el grado AT9316 (ver figura 17), para la fabricación de herramientas para el sector minero.

Tabla 6. Especificaciones de grados ATHESA

GRADO ATHESA	DUREZA HRA	ESTRUCTURA EN MICRAS (μ)	PORCENTAJE DE COBALTO (% Co)	DENSIDAD EN gr/cm³
AT – 9301	91.8 – 92.4	1 – 6	4.2 – 4.9	14.70 – 15.00
AT – 9302	93.5 – 94.3	1 – 5	4.7 – 5.3	11.25 – 11.65
AT – 9303	92.3 – 93.8	1 – 3 máx. 4	4.2 – 4.8	14.70 – 15.20
AT – 9304	91.0 – 91.5	1 – 6	8.3 – 9.0	12.40 – 12.90
AT – 9305	92.3 – 92.9	1 – 8	4.4 – 5.0	12.10 – 12.40
AT – 9306	92.4 – 93.0	1 – 4	5.0 – 5.9	14.80 – 15.10
AT – 9307	84.0 – 94.5	1 – 3 máx. 11	2.3 – 25.3	11.25 – 15.50
AT – 9308	84.3 – 85.3	1 – 6	24.3 – 25.3	12.60 – 13.00
AT – 9309	87.7 – 88.8	1 – 6	15.2 – 16.2	13.60 – 14.00
AT – 9310	89.4 – 90.2	1 – 6	11.0 – 12.0	14.00 – 14.40
AT – 9311	90.1 – 90.7	1 – 6	8.7 – 9.2	14.30 – 14.70
AT – 9312	91.3 – 91.9	1 – 8	5.7 – 6.3	13.95 – 14.25
AT – 9313	91.7 – 92.3	1 – 6	5.7 – 6.3	14.05 – 14.35
AT – 9314	91.8 – 92.5	1 – 6	5.8 – 6.2	13.40 – 13.70
AT – 9315	88.6 – 89.2	1 – 11	9.6 – 10.4	14.40 – 14.60
AT – 9316	88.4 – 89.4	1 – 8	9.2 – 9.8	14.30 – 14.70
AT – 9317	91.4 – 92.2	1 – 6	5.5 – 6.4	14.60 – 14.90

Elaboración ATHESA

Al culminar la inspección de los grados metalúrgicos de carburo de tungsteno su revisión consta que sus mediciones obtenidas se encuentren dentro de un rango de valores establecido en el sistema de gestión de calidad de ATHESA, (tabla 7); se libera las mezclas para un proceso posterior de manufactura para la fabricación de herramientas especiales para la industrial de la transformación.

Tabla 7. Reporte de liberación de mezcla

Nº DE LOTE	GRADO	TEMP/TI EMPO	RA	SM	%SM	DENS	%LUBE	APS	PESO KGS	RESULTADOS OBTENIDOS
MV 317	9306	1500°C / 30'	92.6	7.70	94.36	14.85	2.25	----	102.000	Ok, conforme para producción
KILOS APROBADOS :		102.000		ACUMULADO DEL MES :			207.350		TOTAL AL AÑO : 378.500	

Elaboración ATHESA

La aplicación de la mezcla AT9306 es ideal para aplicación como herramienta de corte y como herramienta de transformado dependiendo el tipo de operación de manufactura, lo que lo hace el grado con mayor versatilidad en las aplicaciones de corte.

3.3. APLICACIÓN DE MECANIZADO

Se considera operación de fresado debido a que la pieza a transformar se encuentra fija y es la herramienta de corte que tiene un movimiento rotatorio para realizar el arranque de viruta, el eje del giro de la herramienta se encuentra horizontal, el porta insertos se encuentra directo al servomotor de la máquina-herramienta lo que transmite de forma directa la potencia para la operación de fresado, incluye un sistema de refrigeración externa con soluble semi-sintético, recomendado para el mecanizado de aleaciones metálicas, se presenta la máquina-herramienta en la figura 18.

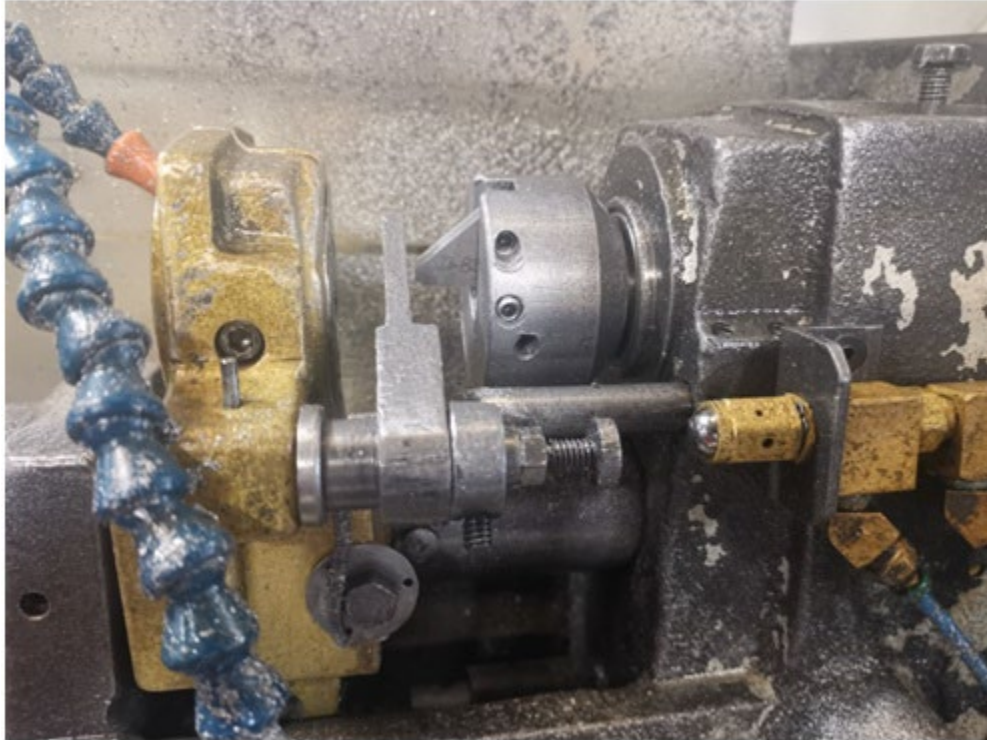


Figura 18. Máquina-herramienta especial (aplicación de corte).
Elaboración propia

3.4. HERRAMIENTA DE CORTE

La herramienta de corte mostrada en la figura 19 es la culminación del proceso de fabricación. El comportamiento de trabajo del inserto de corte en condiciones normales de trabajo fue satisfactorio al realizar el mecanizado, adicionalmente se dio un servicio de soporte técnico para monitoreo y cálculo de condiciones de corte tal como la velocidad de corte, velocidad de avance y RPM como se menciona en SECOTOOLS (2005) como valor agregado al servicio.



Figura 19. Inserto de corte (1-26).
Elaboración propia

CONCLUSIONES

Con base en lo presentado con anterioridad, se concluyó que el empleo de la metalurgia de polvos, para la fabricación de herramientas especiales tiene como ventaja tener el alcance de manufactura para fabricar diferentes tipos de mezclas pulvimetalúrgicas de acuerdo a cada aplicación de mecanizado en materiales en específico, generando una amplia la gama de variantes de mezclas.

Se logró además el objetivo de incrementar el rendimiento de la herramienta de corte al seleccionar el grado AT9306, mezcla recomendada para la fabricación de herramientas de corte para mecanizar materiales no ferrosos como la aleación de aluminio del modelo presentado a mecanizar. El número de piezas fabricadas y entregadas al usuario final consta de dos unidades, lo cual no comprometieron al usuario adquirir un mayor volumen de herramientas de corte, solo el mínimo necesario para satisfacer la demanda de producción de por lo menos un año entero. La correcta selección de grado de mezcla de pulvimetalúrgica para el desarrollo del inserto de corte, fue fundamental para obtener un resultado positivo para así concretar el cierre de proyecto con el cliente.

RECOMENDACIONES

Para la aplicación de las herramientas especiales de corte en los procesos de manufactura se puede aprovechar para generar casos de estudio como mejoras de diseño de geometría de corte para herramientas de corte, análisis de fallas mecánicas en el inserto de corte, crear un área de investigación en la empresa para la fabricación y desarrollo de nuevos grados o mezclas pulvimetalúrgicas.

APORTACIÓN DE LA TESINA

La aportación de esta tesina es la presentación del proceso de manufactura de herramientas especiales de corte a nivel industrial y su comercialización. Partiendo con la recopilación de datos en las instalaciones del cliente, conocer el proceso de manufactura, la pieza a mecanizar, evaluando el método de mecanizado y el material de fabricación de la pieza. Se empleó la metalurgia de polvos como método de manufactura para la fabricación de la herramienta de corte especial, al proponer aplicar el grado AT9306 como mezcla pulvimetalurgica como propuesta comercial de la empresa Alta Tecnología en Herramientas, S. A. de C. V. La mezcla pulvimetalurgica consta principalmente de metales no ferrosos aleados como el carburo de tungsteno con cobalto principalmente.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESINA

Promover y divulgar el método de fabricación de la metalurgia de polvos en herramientas metálicas especiales introduciendo a los estudiantes y profesionales del sector industrial a la aplicación de las mezclas que fabrica Alta Tecnología en Herramientas, S. A. de C. V. Se presentó como evidencia un caso concreto de desarrollo y manufactura de inserto de corte especial, la selección de la mezcla pulvimetalurgica es fundamental para el tipo de trabajo que desempeña la herramienta, al tratarse de una herramienta especial, es única en el mercado nacional por lo que la integración de conocer los conceptos y bases de la metalurgia de polvos genera un eficaz desarrollo de herramienta especial que solucione la problemática de un proceso de manufactura industrial.

REFERENCIAS

- Alting, L. (1994). *Manufacturing engineering processes*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- American Society for Metals. (1972). Microstructure of wrought heat resisting alloys. En American Society for Metals, *Metals handbook* (8 ed., Vol. Powder Metallurgy, pág. 175). Ohio: ASM International.
- Apextool Group Manufacturing. (23 de Noviembre de 2022). *Manufacturers of professional hand and power tools in the world, serving the industrial, vehicle service and assembly, aerospace, electronics, construction and serious DIY markets*. Obtenido de Apex Tool Group Manufacturing México S. de R.L. de C.V.: <https://www.apextoolgroup.com/>
- Athesa. (15 de Noviembre de 2022). *Excelencia en carburo de tungsteno*. Obtenido de Alta Tecnología en Herramientas, S. A. de C. V.: <http://www.athesa.com.mx/>
- Benjamin, J. S. (1970). Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions B*(1), 2943-2951.
- Brookes, K. J. (1983). *Cemented carbides for engineers and tool users*. Hertfordshire: International Carbide Data.
- Cambell, F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier.
- Chang, I., & Yuyuan, Z. (2013). *Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications*. Cambridge: Wood Publishing.
- Correa, E. O., Santos, J. N., & Klein, A. N. (2010). Microstructure and mechanical properties of WC Ni-Si based cemented carbides developed by powder metallurgy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 572-575.
- Dieter, G. (1998). *Mechanical metallurgy*. New York: McGraw-Hill.
- Furuya, K., Jitsukawa, S., & Saito, T. (2022). Application of the sinter-HIP method to manufacture Cr–Mo–W–V–Co high-speed steel via powder metallurgy. *Advanced Materials for Societal Implementation*, 15. doi:<https://doi.org/10.3390/ma15062300>
- German, R. M. (1984). *Powder Metallurgy Science*. Minnesota: Metal Powder Industries Federation.
- Herrera García, M. (15 de Noviembre de 2011). *Formación de dispersoides en molindas de AL empleando atmósferas combinadas de vacío y flujo de amoníaco (Proyecto Fin de Carrera)*. España: Universidad de Sevilla.

Departamento de Ingeniería Mecánica de los Materiales. Obtenido de e-REdING:
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4913/fichero/Memoria+Proyecto.pdf>

- Jewkes, J., Sawers, D., & Stillerman, R. (1969). Tungsten carbide. En *The sources of invention* (págs. 319-321). London: Palgrave Macmillan.
- Kumar, A., & Rai, R. N. (2018). Fabrication, microstructure and mechanical properties of boron carbide (B₄Cp) reinforced aluminum metal matrix composite—a review. *IOP conference series: Materials science and engineering*. 377. IOP Publishing.
- Kumar, N., Bharti, A., Dixit, M., & Nigam, A. (27 de November de 2020). Effect of powder metallurgy process and its parameters on the mechanical and electrical properties of copper-based materials: literature review. *Poroshkova Metallurgiya*, 59(7-8), 57-68.
- Ozols, A. (1998). *Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido*. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Rodríguez, E., González, L., Ordóñez, D., Gotor, F., Bermejo, R., & Torres, Y. (2016). Diseño, procesamiento y caracterización de laminados de tipo CERMET/WC-CO y WC-CO/WC-CO para aplicaciones de herramientas. *III Jornada de investigación y postgrado: Libro de actas*. 1, págs. 121-130. Sevilla: Área de Innovación y Desarrollo,S.L.
- Secotools. (2005). *Manual técnico SECO - carboloy*. Fagersta: Global Metalworking Synergy.
- Serhat, Ş., Mustafa, K., Wojciechowski, S., Piemenov, D. Y., Giasin, K., Usca, Ü. A., & Uzun, M. (2022). Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu–B–CrC based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Reserch and Technology*, 16(January-February), 1243-1259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.063>
- Slokar Benić, L., Šubić, J., & Erman, Ž. (2020). Effect of boron and tungsten carbides on the properties of TiC-reinforced tool steel matrix composite produced by powder metallurgy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 539-547.
- Upadhyaya, G. S. (1998). *Cemented tungsten carbides: production, properties and testing*. New Jersey: Noyes Publications.
- Wahi, A., Muhamad, N., Sulong, A. B., & Ahmad, R. N. (2015). Effect of sintering temperature on density, hardness and strength of MIM Co₃₀Cr₆Mo biomedical alloy. *Abstracts of Contributed Papers of APMA*, 63(7), 434-437.

ANEXO

ANEXO A



Mezclas y Grados

Introducción

El Carburo de Tungsteno (WC), se forma de la unión de tungsteno y carbono, el cual se combina con un aglutinante metálico (Co), logrando una alta dureza y tenacidad que no se pueden obtener con otros materiales.

Dentro de sus propiedades podemos encontrar: dureza alta, tenacidad, resistencia a la abrasión y desgaste, además de su versatilidad y utilización a altas temperaturas.

La fabricación de aleaciones de este material, es la mezcla del carburo de tungsteno, cobalto y además de otros componentes adicionales como Tantalio (Ta), Titanio (Ti) y Niobio (Nb), esto en relación a las diferentes necesidades de aplicación en los procesos industriales.

Microestructura de las mezclas de Carburo de Tungsteno y componentes:

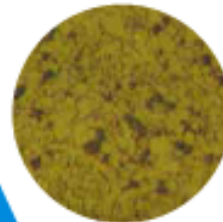
Fabricación de grados de Carburo de Tungsteno:

El proceso de fabricación se elabora de una manera controlada, cuidando de forma rigurosa el cumplimiento de las especificaciones establecidas, para ofrecer productos de calidad que se ajusten a las necesidades de cada aplicación.

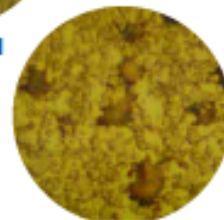
La fabricación de aleaciones, consiste en la mezcla del carburo de tungsteno y cobalto además otros componentes, su molienda y secado aseguran la integración de los componentes, obteniendo como resultado un polvo seco y homogéneo al cual se le realizan diferentes pruebas tales como como:

- Análisis químico
- Análisis Metalográfico
- Medición de dureza
- Medición de la Saturación Magnética
- Medición del Tamaño de partícula
- Medición de la Densidad

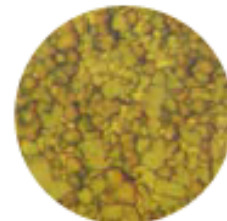
Terminada su revisión dentro de especificaciones, se libera el polvo y pasa a producción para la fabricación de herramientas para la industria en diferentes sectores como la industria militar, minera, nuclear, joyería, automotriz, farmacéutica, alimenticia etc.



AT-9301



AT-9304

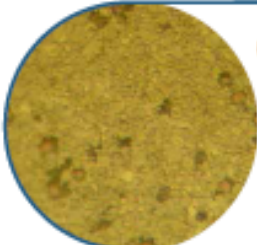


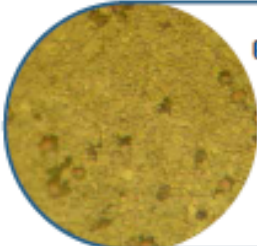
AT-9308

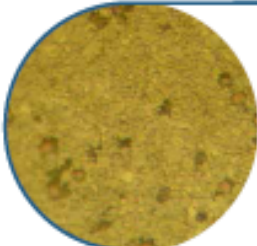


AT-9316



	GRADOS PARA EL MAQUINADO DE HIERRO COLADO Y MATERIALES NO FERROSOS	APLICACIONES	GRADO	% de COBALTO	DENSIDAD gr/cm ³	DUREZA Ra	ESTRUCTURA
		DESBASTES USO GENERAL ACABADOS	AT-9317	5.9	14.75	918	1• 6 μ
			AT-9306	5.4	14.95	92.7	1• 4 μ
			AT-9301	4.5	14.85	92.1	1• 6 μ
			AT-9303	4.5	14.95	93	1• 3 μ MAX 4

	GRADOS PARA EL MAQUINADO DE ACEROS EN ESTADO RECOCIDO	APLICACIONES	GRADO	% de COBALTO	DENSIDAD gr/cm ³	DUREZA Ra	ESTRUCTURA
		DESBASTES TRABAJOS PESADOS Y USOS GENERALES	AT-9304	8.6	12.65	91.2	1• 6 μ

	GRADOS RESISTENTES A LA ABRASION	APLICACIONES	GRADO	% de COBALTO	DENSIDAD gr/cm ³	DUREZA Ra	ESTRUCTURA
		IMPACTO LIGERO	AT-9301	4.5	14.85	92.1	1• 6 μ
		IMPACTO FUERTE	AT-9311	8.95	14.5	90.4	1• 6 μ

	GRADOS RESISTENTES AL IMPACTO	APLICACIONES	GRADO	% de COBALTO	DENSIDAD gr/cm ³	DUREZA Ra	ESTRUCTURA
		LIGERO MEDIO FUERTE	AT-9310	11.5	14.2	89.8	1• 6 μ
			AT-9309	15.7	13.8	88.2	1• 4 μ
			AT-9308	24.8	12.8	84.8	1• 6 μ



Mezclas y Grados

Proceso de Fabricación

03 Secado



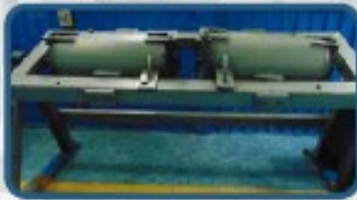
04 Cribado



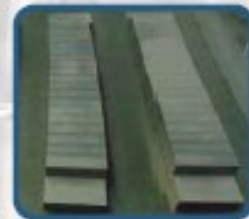
05 Prensado



02 Molienda



06 Preformado



01 Materia prima
(WC+ Co, Ta, Ti, Nb)



07 Sinterizado



08 Piezas sinterizadas

