



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

T E S I S

**“DESARROLLO DE UNA PIEZA DE FUNDICIÓN PARA EL METRO DE
LA CIUDAD DE MÉXICO (INGENIERÍA INVERSA)”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA

EDITH NÚÑEZ LEÓN



CDMX

AÑO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: José Alejandro García Hinojosa.

VOCAL: Profesor: Balbina Ojeda Ramirez.

SECRETARIO: Profesor: Maria Gabriela González Flores.

1er. SUPLENTE: Profesor: Hector Israel Quiroga Herrera.

2° SUPLENTE: Profesor: Clara Saraid Flores Rosas.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, UNAM.

CIUDAD DE MÉXICO.

ASESOR DEL TEMA:

José Alejandro García Hinojosa.

SUSTENTANTE (S):

Edith Núñez León.

ÍNDICE

Resumen

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Antecedentes
- 1.2 Concepto de ingeniería inversa en metalurgia
- 1.3 Planteamiento del problema
- 1.4 Objetivo

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

- 2.1 Técnicas metalúrgicas aplicadas a la ingeniería inversa
- 2.2 Ensayo de dureza
- 2.3 Ensayo de tensión
- 2.4 Análisis metalográfico
- 2.5 Análisis químico
- 2.6 Procesos de fabricación de componentes de aluminio

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE INGENIERÍA INVERSA AL COMPONENTE ORIGINAL

- 3.1 Pieza de estudio (pieza original) y selección del proceso de fabricación
 - 3.1.1 Evaluación de la composición química
 - 3.1.2 Evaluación de la dureza y propiedades de la aleación original
 - 3.1.3 Evaluación metalográfica
- 3.2 Proceso de fabricación de la pieza original

CAPÍTULO 4. PROPUESTA Y FABRICACIÓN DEL COMPONENTE SUSTITUTO

4.1 Consideraciones para la fabricación del componente sustituto

4.2 Fabricación del componente sustituto

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMEN

La idea de cambiar los tranvías por un sistema de transporte moderno, rápido, seguro y de mayor capacidad nace en los años 50 y en base a esto el 4 de septiembre de 1969 la primera línea del transporte colectivo “metro” es inaugurada.

Al día de hoy el metro de la Ciudad de México es el sistema de transporte colectivo con mayor afluencia de pasajeros y el más barato. Debido a esta situación, su antigüedad y la baja inversión del gobierno, se está tratando de reducir los costos de las refacciones de los carros del tren, produciendo las piezas con proveedores nacionales que cumplan con los requisitos solicitados, ya que la mayoría de las empresas líderes en el ramo ferroviario se encuentra en Alemania, Francia, España, Japón, entre otros.

Los carros del tren están conformados por diferentes piezas y materiales: partes eléctricas, piezas metálicas, semiconductores, refrigerantes, etcétera; siendo la mayoría componentes de importación. Sin embargo, la mayoría de las piezas que se refaccionan, son piezas que están descontinuadas debido a la antigüedad del metro de la Ciudad de México.

Las piezas metálicas son las que en su mayoría se encuentran descontinuadas. Una forma rápida y sencilla para poder suplir estas piezas es realizar pruebas o ensayos que nos indique las propiedades mecánicas, composición química y la microestructura, esta última para determinar si se aplicó un tratamiento térmico y/o identificar el proceso de manufactura del componente, es decir, aplicar “ingeniería inversa”.

Con esta información, el potencial fabricante puede determinar si puede replicar la pieza tal cual, o puede realizar incluso una mejora, una sustitución de material o un cambio en el diseño de la misma. Cabe mencionar que muchas veces los cambios, modificaciones o decisiones que se toman para la fabricación de las piezas, están basadas mayormente en el tiempo y costo que implique el desarrollo, así como su funcionalidad.

Este trabajo describe las etapas del proceso realizado para poder suplir una pieza fabricada en aluminio denominada “Base Punta de Arco”, aplicando ingeniería inversa, con el propósito de sugerir y aplicar un proceso alternativo de fabricación considerando la reducción del costo.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Concepto de ingeniería inversa en metalurgia

1.2 Planteamiento del problema

1.3 Objetivo

1.1 Concepto de ingeniería inversa en metalurgia

El proceso del diseño generalmente parte del concepto al objeto real o subjetivo. A este tipo de proceso se le puede llamar “Ingeniería del diseño directo”. Pero si el proceso del diseño va del objeto al concepto, entonces a dicho proceso se le llamará “Ingeniería del diseño inverso” o tradicionalmente “Ingeniería Inversa” (1)

Por ello, es posible afirmar que la ingeniería directa utiliza el método deductivo, es decir, va de lo general (las ideas) a lo particular (el objeto), en tanto la ingeniería inversa usa el método sintético o inductivo, es decir, parte de lo particular (el objeto) y llega al concepto, a lo general (las ideas).

En otras palabras, la ingeniería directa es deductiva, es en consecuencia analítica. En tanto la ingeniería inversa es inductiva y, en consecuencia, sintética. Sin embargo, los métodos del diseño se cruzan, se enlazan, pues no puede existir el análisis sin la síntesis y la síntesis sin el análisis, según [2,3,4]. Así, la ingeniería directa combina análisis y síntesis y la ingeniería inversa también. La Ingeniería Inversa es sintética en cuanto a su definición, pero analítica en cuanto a su proceder, pues uno de sus objetivos es obtener ciertas propiedades de los objetos de estudio y en ese sentido es analítica. Pero también es sintética puesto que debe obtener un modelo aproximado, una copia equivalente de los objetos; esto es, debe restituir el análisis representado por las formas y las propiedades químicas y físicas de los objetos.

En base a lo anterior la “Ingeniería Inversa” se puede definir como el proceso que involucra caracterizar un material y mediante un razonamiento abducido conducir a una hipótesis explicativa de su proceso de fabricación original (figura 1), aportando

los elementos para diseñar o adaptar un material a la misma aplicación u otros usos con características similares o mejoradas.



Figura 1. Esquema de la metalurgia inversa

La base de este proceso lo representa el tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales (figura 2), donde la relación entre los vértices estructura, propiedad, comportamiento y procesamiento, proporcionan los elementos para el diseño y desarrollo de los materiales metálicos en términos generales, donde la caracterización es muy importante como elemento de conexión.

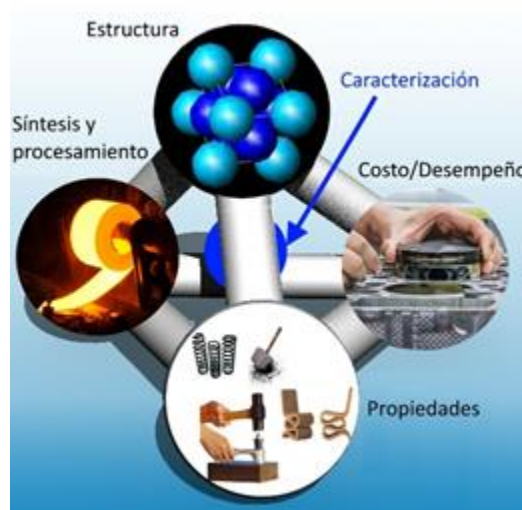


Figura 2. Tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales.

La aplicación de la metalurgia inversa como un método para fabricar componentes metálicos, se realiza con más frecuencia como tarea cotidiana para muchas industrias ya que el diseño de componentes metálicos no se desarrolla únicamente a partir de ideas nuevas, lo que se hace la mayoría de las veces es realizar la investigación usando como base un producto ya existente.

Para la caracterización intervienen variadas técnicas que permiten comprender los aspectos microestructurales y de composición química, que en relación con las condiciones de procesamiento definen propiedades que influyen en el comportamiento mecánico del material acorde a su uso final.

Para realizar la ingeniería inversa metalúrgica se deben contar con diferentes técnicas metalúrgicas como: espectrometrías para el análisis químico, metalográfica, de propiedades mecánicas y procesos de tratamiento térmico, para tener el soporte necesario para realizar la Metalurgia Inversa, como se muestra en la figura 3.

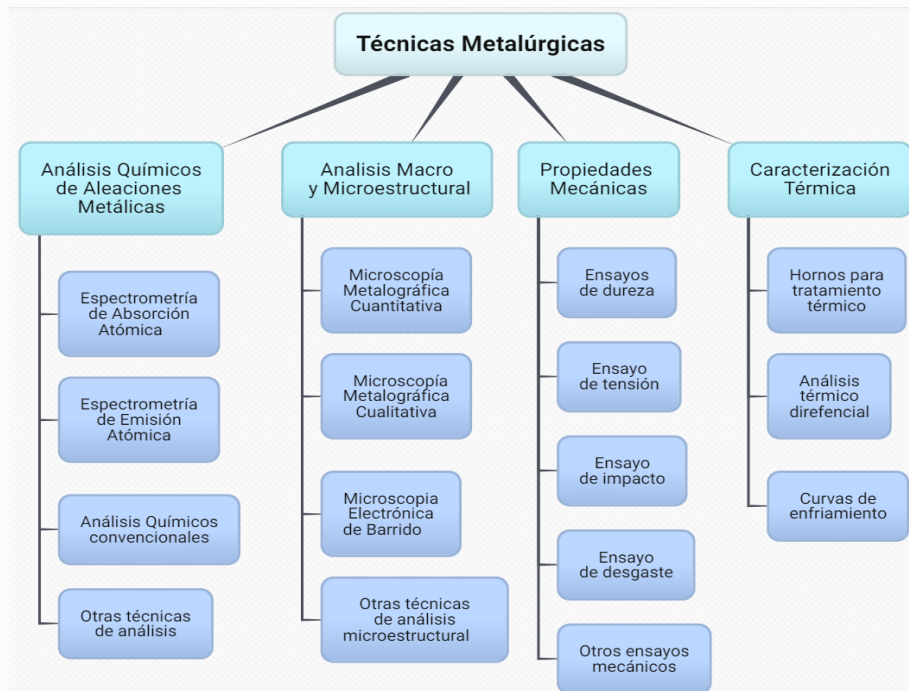


Figura 3. Cuadro de técnicas metalúrgicas para la caracterización de componentes metálicos.

La ingeniería inversa adquiere relevancia e importancia para el diseño y la manufactura puesto que en ambos procesos se requiere de información. En general, la información obtenida en el proceso de la ingeniería inversa se puede clasificar en: [2]

- 1) Información geométrica y dimensional.
- 2) Información de manufactura; en especial de materiales y procesos.
- 3) Información de funcionalidad de las partes y de sistemas.
- 4) Información de propiedades físicas.

La información obtenida debe ser orientada fundamentalmente a las características de pieza metálica. Por otro lado, la información obtenida a través del proceso de ingeniería inversa direccionada al diseño y la manufactura por procesos metalúrgicos, ya sean procesos metalmecánicos o procesos de fundición puede usarse para diversos propósitos, por ejemplo: [4]

- 1) Para reproducir componentes.
- 2) Para innovar productos.
- 3) Para generar bases de datos.
- 4) Para mejorar y rediseñar componentes.
- 5) Para corregir fallas en los diseños.

1.2 Planteamiento del problema

Muchos componentes de aplicación industrial comúnmente llamados refacciones de piezas metálicas para aplicaciones específicas son importadas a México a un elevado costo. Por lo que la ingeniería inversa aplicada a los componentes originales y apoyados en los fundamentos metalúrgicos correctos, como la caracterización microestructural, composición química y la evaluación de las

propiedades mecánicas, es posible identificar el proceso de manufactura, e incluso el tratamiento térmico aplicado, y con la información generada sugerir el método de producción para un proveedor nacional.

1.3 Objetivo

Describir y explicar las etapas para la fabricación de una pieza industrial de aluminio, aplicando los conceptos ingeniería inversa en metalurgia.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

2.1 Técnicas metalúrgicas aplicadas a la ingeniería inversa

2.2 Ensayo de dureza

2.3 Ensayo de tensión

2.4 Análisis químico

2.5 Análisis metalográfico

2.6 Procesos de fabricación de componentes de aluminio

2.1 Técnicas metalúrgicas aplicadas a la ingeniería inversa

Como se mencionó en párrafos anteriores las técnicas metalúrgicas que se deben aplicar a una pieza original para caracterizarla y ser producida por ingeniería inversa son: análisis químico, análisis microestructural y propiedades mecánicas, y como técnica complementaria el análisis térmico. En este capítulo se describirán los principales tres métodos aplicados a piezas de aluminio.

2.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza es una de las técnicas más comunes aplicados a componentes metálicos, para piezas de aluminio se aplica el ensayo de dureza Brinell, cuyas condiciones estándar incluyen una bola de carburo de tungsteno (WC) con un diámetro de 10 mm, carga de 1000 Kg o carga de 500 Kg. En la figura3 se muestra en ensayo Brinell. La huella que deja el indentador es medida mediante un microscopio calibrado que se sustituye en la fórmula siguiente:

$$HB = \frac{2P}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Dónde: P carga en Kg, D diámetro del indentador, d diámetro de la huella

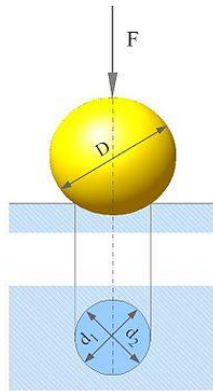


Figura 3. Ensayo Brinell

Otra forma de calcular la dureza es mediante el uso de tablas en las que se relaciona el diámetro de la huella, con el diámetro del indentador y la carga aplicada. La norma para realizar el ensayo es la ASTM E10(3).

2.3 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión es quizá la prueba más importante para determinar propiedades de las aleaciones de aluminio y de la mayoría de las aleaciones metálicas. Se realiza de acuerdo con la norma ASTM B557.

Consiste en someter una probeta estandarizada a una carga uniaxial hasta que la probeta falla. Los datos de carga y alargamiento de la muestra son registrados para realizar una curva de tensión (MPa o Ksi) contra deformación (mm o plg/plg), de la cual se obtiene la resistencia a la tensión, la resistencia a la cedencia (punto de fluencia), el % de elongación y el módulo de Young o módulo de rigidez de material.

La figura 4, muestra un esquema del ensayo de tensión y la figura 5 una curva típica tensión contra deformación para aleaciones de aluminio



Figura 4. Esquema del ensayo de tensión

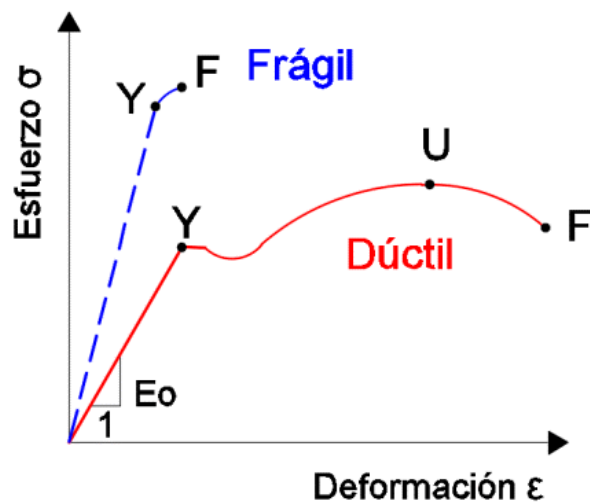


Figura 5. Curva tensión deformación para aleaciones de aluminio. Donde: Y Punto de fluencia, U Resistencia a la tensión, F Punto de ruptura, E_o módulo de Young.

2.4 Análisis químico

Los métodos más comunes para conocer la composición química de aleaciones de aluminio son el de espectrometría de emisión atómica (EEA) y el de espectrometría de absorción atómica (EAA). El primer método es el más utilizado, tiene las ventajas

de ser rápido, precisión, se realiza directamente sobre la muestra sólida, solo es necesaria una pequeña área para realizar el análisis. Se le conoce también como análisis por chispa.

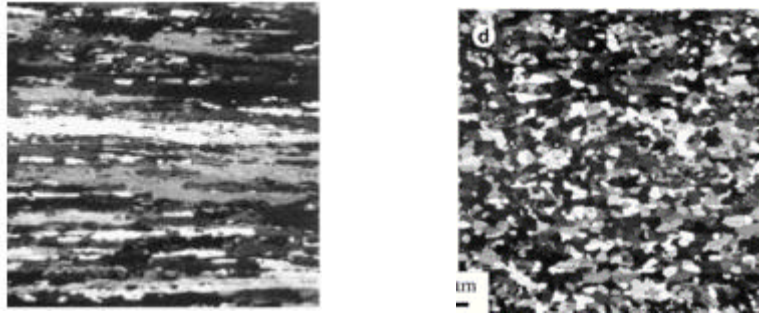
El segundo método detecta una mayor cantidad de elementos en la aleación peso se lleva mayor tiempo en su realización, debido que una muestra pequeña debe disolverse previamente al análisis, en un reactivo adecuado, en otras palabras, el análisis se hace en una disolución que contiene la muestra. Para este trabajo se aplicó el método de espectrometría de emisión atómica.



Figura 6. Espectro de emisión atómica

2.5 Análisis metalográfico

El análisis metalográfico es una herramienta muy útil para la ingeniería inversa, ya que mediante la interpretación metalográfica se pueden conocer en primer lugar el proceso de manufactura del componente (metalmecánico o fundición), así como si fue sometida o no a tratamiento térmico. Las características microestructurales indican si a pieza tiene un trabajado en frío o un trabajado en caliente en función de la forma y orientación de los granos. También esta puede ser relacionada con las condiciones de tratamiento térmico. La figura 7 muestra las estructurad de dos aleaciones de aluminio, una con trabajado metalmecánico en frío y otra con trabajado en caliente.



(a)

(b)

Figura 7. Aleaciones de aluminio (a) Con trabajado en frío y (b) con trabajado en caliente

En el caso de piezas de fundición estas presentan estructuras dendríticas a nivel microestructural, como la mostrada para la aleación A356, figura 8. También pueden ser sometidas a tratamiento de refinación de grano durante el proceso de fusión de la aleación, la figura 9, muestra una pieza sin y con tratamiento de refinación de grano.

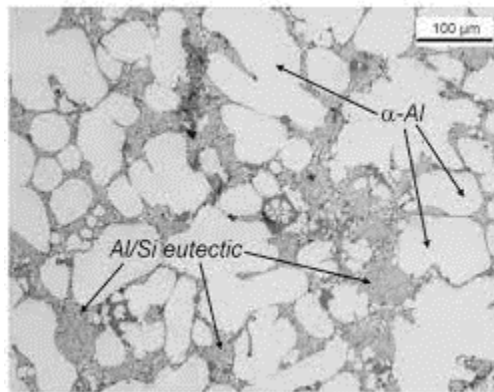


Figura 8. Microestructura de la aleación A356, fabricada por proceso de fundición en molde de arena



Figura 9. Macroestructura de una aleación de aluminio sin y con tratamiento de refinación de grano

2.6 Procesos de fabricación de componentes de aluminio

Las piezas de aluminio se fabrican por dos procesos de manufactura, los metalmecánico y los de fundición, de acuerdo con la geometría de la pieza bajo estudio los procesos más probables de fabricación de la pieza son forja, maquinado o fundición, estos tres procesos se describen brevemente a en los párrafos siguientes.

Proceso de forja

El proceso de forja de piezas de aluminio consiste en someter un componente de geometría simple a cargas que provoquen su deformación permanente, para ello el componente simple se coloca en una prensa, que consta de dos matrices o dados, una superior y otra inferior, la matriz tiene una cavidad que es la forma de la pieza a fabricar, estas matrices aplican la fuerza necesaria para darle forma al componente, la figura 10, muestra las etapas del proceso de forja de piezas de aluminio. Las aleaciones que se forjan usualmente son del grupo de aleaciones metalmecánicas, las cuales se muestran en la tabla 1. En general la mayoría de estas aleaciones pueden ser sometidas al proceso de forja.

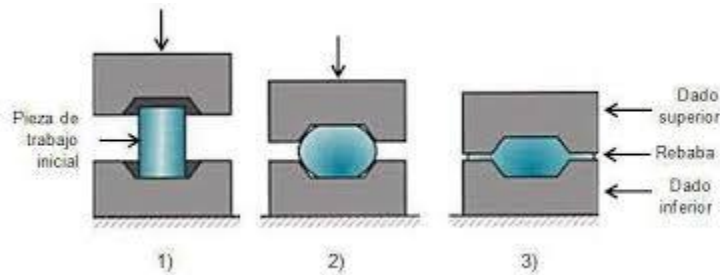


Figura 10. Etapas del proceso de forja de piezas de aluminio

Tabla 1. Aleaciones de aluminio para procesos metalmecánicos

Designación	Aleante principal
1xxx	Mínimo 99 % Al
2xxx	Aleado con Cobre
3xxx	Aleado con Manganeso
4xxx	Aleado con Silicio
5xxx	Aleado con Magnesio
6xxx	Aleado con Magnesio y Silicio
7xxx	Aleado con Zinc
8xxx	Aleado con otros elementos
8xxx	Aleaciones fuera de uso

Proceso de maquinado

En el proceso de maquinado un componente simple de aluminio, es sometido a eliminación de material para darle la forma de la pieza final. Los métodos de maquinado actuales son muy variados y pueden ir desde los tradicionales mediante el uso de tornos y fresadoras, hasta los modernos equipos de maquinado CNC. Para ambos casos se parte del plano de la pieza para dar las dimensiones requeridas por el componente. En el caso de los centros de maquinado actuales, el plano se programa en el equipo y este realiza automáticamente todo el maquinado para obtener la pieza en su forma final.

La figura 11 muestra los equipos convencionales para maquinado, que usualmente se usan para baja producción, mientras que a figura 12 muestra un centro de maquinado de última generación para altas velocidades de producción.

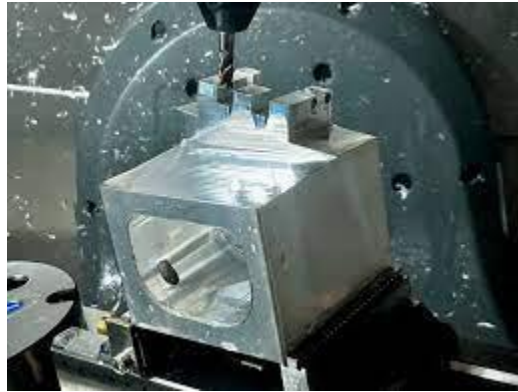


Figura 11. Equipos para maquinado tradicional



Figura 12. Centro de maquinado CNC

Proceso de fundición

La fabricación de piezas de fundición de aluminio incluye muy diversos procesos dependiendo del tipo de molde en el que se obtenga la pieza, los más importantes son el proceso de fundición en área, el proceso de fundición en molde permanente y el proceso de fundición por colada a alta presión.

Considerando la geometría de la pieza problema y los espesores de las secciones, se induce que el proceso más factible para fabricarla es el proceso de fundición en molde de arena, por lo que es el que se detallara en este trabajo.

El proceso de fundición en molde de arena para fabricar piezas de aluminio, llamada generalmente en inglés “casting”, consiste en diversas etapas que se describen a continuación.

Fabricación del modelo de fundición

En esta etapa se fabrica una réplica de la pieza a fabricar, para ello se parte de la pieza original y el plano correspondiente. La réplica se llama modelo de fundición y para su fabricación en madera y/o plástico se deben dar sobredimensiones al modelo llamadas tolerancias, las principales son las tolerancias por contracción, las tolerancias por maquinado y las tolerancias por ángulo de salida. Estas tolerancias son específicas para las piezas de aluminio coladas en molde permanente, en general la de contracción es de 1mm/m, las de maquinado de 1.6 mm y las de ángulo de salida de 2 a 3°, la figura 13 muestra un modelo de fundición para el proceso de moldeo en arena en verde.

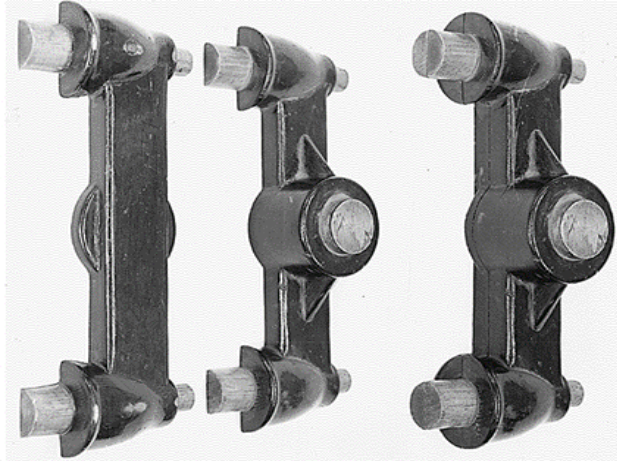


Figura 13. Modelo de fundición

Elaboración de la mezcla de moldeo

En el proceso de moldeo en verde se usa arena sílice (SiO_2) de granulometría que especifica la AFS (American Foundryman Society) a la que le da un número específico, para el caso de piezas de aluminio esta entre 80 y 100 AFS, mientras el número es más grande el grano de la arena es más fino y mejor es el acabado superficial.

La mezcla de arena en verde está formada por arena sílice, bentonita y agua, la bentonita con el agua promueven condiciones para que la arena tenga cohesión entre granos y se pueda reproducir la geometría del modelo de fundición. Los tres componentes mencionados en cantidades controladas se mezclan en molinos de mezclado para obtener una mezcla homogénea y con ciertas propiedades específicas. El control de la mezcla de moldeo incluye pruebas mecánicas y como la resistencia a la compresión en verde, la dureza de molde, así como algunas físicas como la permeabilidad, la maleabilidad, el análisis granulométrico, el % de finos entre otras, así mismo incluye algunas de tipo químico como la bentonita activa. En el proceso de fundición en moldes de arena en verde es muy importante el control de las propiedades para lograr piezas de buena calidad. La figura 14 muestra un esquema típico de un molde de arena en verde

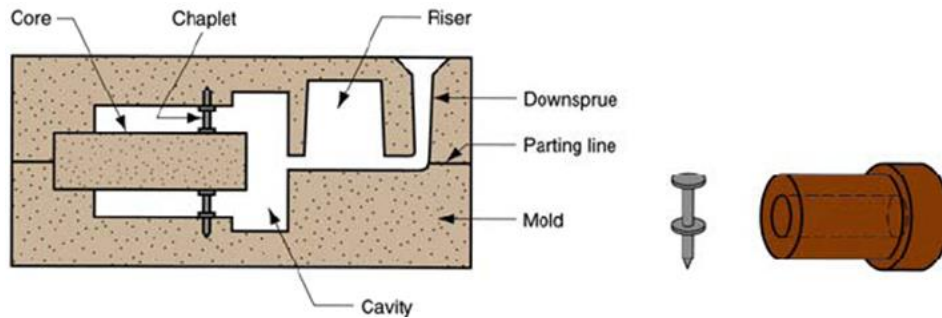


Figura 14. Esquema de un molde de arena en verde

Fabricación de corazones

Los corazones son componentes del molde que generan huecos dentro de la pieza, estos se colocan previo al cierre del molde. Hay diferentes métodos para su fabricación como lo son en arena Shell o cáscara, con aglutinantes químicos y con silicato de sodio. En este trabajo no se profundizará sobre este tema.

Etapa de fusión de aluminio

En esta etapa lingotes de aluminio con certificado de composición química, son colocados en un horno de crisol, que utiliza como combustible de calentamiento gas natural. El crisol usualmente es de SiC. La carga de aluminio se lleva hasta la temperatura de fusión (temperatura de liquidus) y se le da un sobrecalentamiento para asegurar que el aluminio líquido tenga la adecuada fluidez para llenar el molde de arena en verde. Previo al llenado del molde el aluminio se somete a tratamiento de escorificación para eliminar la escoria que se forma en la superficie del baño metálico, dependiendo de la aleación se puede aplicar tratamiento de refinación de grano mediante la adición de pequeñas cantidades de titanio (0.20 %), mediante aleaciones maestras Al-Ti. Una vez realizado este tratamiento al aluminio líquido se mide la temperatura y se procesa al llenado de los moldes.

Finalmente una vez solidificada la pieza, se extrae del molde se retira el exceso de arena, posteriormente esta es maquinada de acuerdo con las dimensiones establecidas en el plano original.

Las aleaciones de aluminio para fundición se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Aleaciones de aluminio para fundición, indicando el aleante principal por familia de aleaciones

Elementos aleantes en lingotes y piezas de fundición	
Aleación	Designación
Aluminio 99 % pureza o mayor	1XX.X
Cobre	2XX.X
Silicio (con cobre o manganeso)	3XX.X
Silicio	4XX.X
Magnesio	5XX.X
Zinc	7XX.X
Estaño	8XX.X
Otros elementos	9XX.X
Aleaciones fuera de uso	6XX.X

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE INGENIERÍA INVERSA A COMPONENTE ORIGINAL

3.1 Pieza de estudio (pieza original) y selección del proceso de fabricación

3.1.1 Evaluación de la composición química

3.1.2 Evaluación de la dureza y propiedades de a aleación original (norma)

3.1.3 Evaluación metalográfica

3.2 Proceso de fabricación de la pieza original

3.1 Pieza de estudio (pieza original)

La pieza a la que se realizaron los estudios de ingeniería inversa se presenta en la figura 14, de acuerdo con la geometría y el espesor de las secciones de la pieza, el proceso de fabricación, como se mencionó en párrafos anteriores puede ser por forja o maquinado o fundición, siendo el proceso de fundición el más económico para fabricar la pieza bajo estudio



Figura 14. Pieza original llamada “base punta de arco”

3.1.1 Evaluación de la composición química

La composición química de la pieza original se determinó por espectrometría de emisión atómica mediante un equipo Spectrolab modelo X20, localizado en el laboratorio de fundición del Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, su composición química es: 0.10 %Zn, 5.05%Cu, 0.50% Mg, 0.74%Mn, 0.93%Si, 0.27%Fe, 0.05%Cr, 0.018%Ti, Al Balance. La composición química se asemeja a la aleación 2011, en la que el aleante principal es el cobre.

La composición de la aleación 2011, indicada en la norma AA, es la siguiente: 0.4 %Si, 0.7 %Fe, 5.0-6.0 %Cu, 0.2-0.6 %Pb, 0.2-0.6 Bi, 0.3 Zn al balance.

3.1.2 Evaluación de la dureza y propiedades de a aleación 2011

Se realizó mediante el ensayo Brinell con una carga de 500 y un diámetro de indentador de 10 mm, obteniéndose un valor de 114.1 HBN. Las propiedades mecánicas de la aleación 2011 de acuerdo a las normas AA (Aluminum Association) se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de la aleación 2011 en diferentes condiciones

Condición	UTS MPa (Ksi)	YS MPa (Ksi)	%E	HB
O	275	125	14	95
T6	310	230	8	110

Dónde: UTS Resistencia a la tensión, YS Resistencia la cedencia, %E % de elongación, HB dureza Brinell.

3.1.3 Evaluación microestructural

Un segmento de la pieza original fue preparado metalográficamente para su observación al microscopio, imágenes de la microestructura se muestran en la figura 15. La muestra fue atacada con solución fresca de HF al 0.5 % en volumen. Las imágenes están a tomadas a 100 y 200x respectivamente.

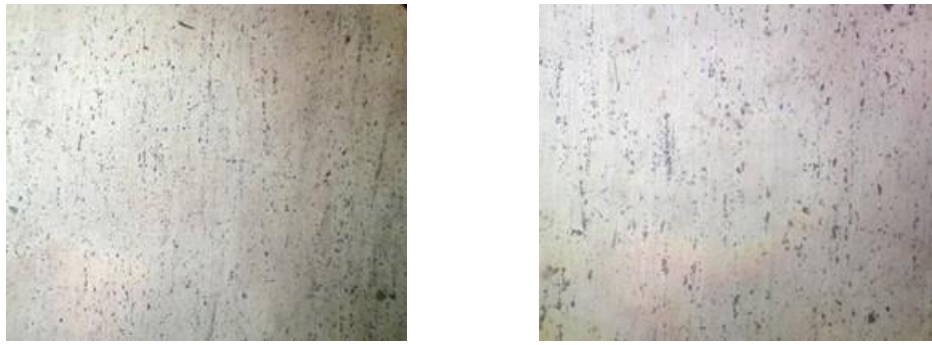


Figura 15. Microestructura de la pieza original a 100 y 200X

La microestructura muestra finas partículas distribuidas en la matriz de aluminio, asociado al % de Cu obtenido en el análisis químico, se concluye que son partículas pequeñas de la fase CuAl_2 , que presentan las aleaciones de cobre con menos del 5.67 % de Cu, de la serie 2XXX y que se aplican a la fabricación de componentes metalmecánicos

3.2 Proceso de fabricación de la pieza original

De acuerdo a los estudios metalúrgicos de ingeniería inversa aplicados a la pieza original, esta se fabricó por proceso de forja o por proceso de maquinado, después de ser fabricado el componente fue sometido a un proceso de tratamiento térmico con el propósito de incrementar sus propiedades mecánicas, de acuerdo a la tabla 3, el tratamiento consistió en solubilizado y envejecimiento natural (T6) que coincide con la dureza obtenida experimentalmente en la pieza original.

La resistencia a la tensión, resistencia la cedencia y el % de elongación no se determinó debido al tamaño y geometría de la pieza, por lo que el criterio usado fue el de dureza Brinell.

4. PROPUESTA Y FABRICACIÓN DEL COMPONENTE SUSTITUTO

4.1 Consideraciones para fabricación del componente sustituto

Considerando que la pieza bajo estudio puede ser sustituida por otra aleación y cambiar el proceso de manufactura para reducir el costo, se seleccionó una aleación que tuviera altas propiedades y que se fabricara por el proceso de fundición, esta fue la aleación 7075, en la que el aleante principal es el Zn.

La composición de la aleación de acuerdo a norma AA (Aluminum Association) es: 5.1-6.1 %Zn; 1.2-2 %Cu; 2.1-2.9 %Mg; 0.30 %Mn (max); 0.40 %Si (max); 0.5 %Fe (max); 0.18-0.28 %Cr, 0.20 %Ti (max); Otros 0.05-0.15; Al Balance.

Las propiedades mecánicas que puede alcanzar esta aleación se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de la aleación 7075 en condiciones de recocido (temper O) y de solubilizado y envejecido artificialmente (temper T6)

Condición (temper)	UTS MPa (Ksi)	YS MPa (Ksi)	%E	HB
O	230 (33)	105 (15)	16- 17	60
T6	470 (83)	505 (73)	11	150

Dónde: UTS Resistencia a la tensión, YS Resistencia la cedencia, %E % de elongación, HB dureza Brinell.

4.2 Fabricación del componente sustituto por proceso de fundición en arena en verde

En esta parte del trabajo se describe la fabricación de la pieza sustituta por el proceso de fundición en arena en verde.

Modelo de fundición

En base a las dimensiones originales de las piezas se aplicaron las tolerancias (contracción, maquinado y ángulo de salida) para el diseño del modelo de fundición, este fue un modelo suelto, figura 16, que se colocó en una placa modelo, para incrementar la producción y reducir el costo se colocaron cuatro modelos por placa modelo, figura 17.



Figura 16. Modelo de fundición individual suelto



Figura 17. Placa modelo con cuatro modelos

Mezcla de moldeo

Consistió en una mezcla de 3% de humedad (agua), 10 % de bentonita y el resto de arena sílice granulometría 90 AFS, que fue preparada en un molino chileno como el que se muestra en la figura 18.



Figura 18. Preparación de la mezcla de moldeo en molino chileno

Elaboración de los corazones

Para fabricar la pieza fue necesario el uso de corazones, que se fabricaron por el proceso Shell (cáscara), los cuales se muestran en la figura 19.



Figura 19. Corazones fabricados por el proceso Shell (cáscara)

Fabricación del molde

Se realizó con la mezcla de arena en verde antes mencionada, utilizando el proceso tradicional de apisonado manual, de base (drag) y tapa (cope), como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Molde de arena fabricado con cuatro impresiones, con los corazones respectivos.

Fusión de la aleación y control de temperatura

La aleación seleccionada se colocó en un horno de crisol calentado por gas, un ves fundida la carga, se procedió a escorificar y tomar la temperatura para realizar la colada a los moldes, figura 21.



Figura 21. Horno de crisol y medición de la temperatura con termopar tipo K

Llenado de los moldes

Se realizó mediante cuchareo, previa fabricación de varios moldes, y aprovechar el total de aleación líquida en el horno, la figura 22 muestra los moldes fabricados y la figura 23 el llenado de los moldes.



Figura 22. Moldes fabricados, cerrados y antes del cierre



Figura 23. Llenado de moldes

Desmoldeo de la pieza

Una vez solidificada la pieza es desmoldeada y se cortan la colada y los alimentadores, la figura 24 muestra las cuatro piezas obtenidas por molde.



Figura 24. Etapa de desmoldeo y piezas obtenidas por molde

Finalmente, las piezas fueron maquinadas para dejarlas en dimensiones similares a la pieza original.

La composición química de la pieza sustituta en condiciones de colada fue: 5.50 %Zn, 1.41 %Cu, 2.25 %Mg, 0.05 %Mn, 0.12 %Si, 0.25 %Fe, 0.18 %Cr, 0.02 %Ti, Al Balance.

La única propiedad que se evaluó fue la dureza de la aleación en condiciones de colada que fue 69 HBN, la cual puede incrementarse hasta 150 HBN con un tratamiento térmico T6, de acuerdo con lo que indica la norma AA.

La estructura en condiciones de colada se muestra en la figura 25.



Figura 25. Microestructura de la pieza sustituta en condiciones de colada.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo descrito en este trabajo se concluye lo siguiente:

- La ingeniería inversa es un método muy útil para determinar el proceso de fabricación de piezas específicas de aleaciones base aluminio.
- La aplicación de las herramientas metalúrgicas en las que se basa la ingeniería inversa es fundamental para obtener el origen de manufactura y las características de la pieza.
- En el caso de este estudio la aplicación de las etapas de ingeniería inversa llevo a la fabricación de un componente sustituto de aleación de aluminio de una aleación 2011 por una aleación 7075 por un proceso de fabricación más económico y con el correspondiente tratamiento térmico puede superar las propiedades de la pieza original.

- En este trabajo solo se llegó a la etapa de fabricación de la pieza y no se incluye la etapa de tratamiento térmico de la pieza fabricada por proceso de fundición en arena en verde.

Referencias Bibliográficas

1. <http://sidor.com/noticias-sidor/noticias/104-noticiencias/859-metalurgia-inversa-en-el-diseno-y-desarrollo-de-aceros>
2. Montoya Quezada Manuel N., Algunas Consideraciones Sobre La Integración De La Ingeniería Inversa, el CAD y los Prototipos Rápidos, Tesis Maestría, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, 2013
3. Arboleda Ortiz Luis D. y Mora Nieto Álvaro A., Rediseño mediante ingeniería inversa al componente “driver arm” aplicable sistema compuerta del tren de nariz aeronave C-130. Fundación Universitaria los Libertadores, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Aeronáutica, Bogotá, Colombia, 2017
4. Procesos de Manufactura En ingeniería industrial, Omar Eraso Guerrero, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, 1/02/2008
5. Reversing. Ingeniería Inversa. Teoría y aplicación, Rubén Garrote García, Ediciones U, 2015
6. Mario Betancur Rodríguez, Ingeniería Inversa Aplicada: Metodología y Aplicaciones Industriales, Universidad EAFIT Escuela de Ingeniería Especialización en Diseño Mecánico Medellín 2011
7. Martín E. Monroy, José L. Arciniegas y Julio C. Rodríguez, Caracterización de Herramientas de Ingeniería Inversa, Información Tecnológica Vol. 23(6), 31-42 (2012)