



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería**  
**Campus Zacatecas**

**INGENIERÍA METALÚRGICA**

**“FABRICACIÓN DE ALEACIONES DE  
ZINALCO REFORZADAS CON  
NANOFIBRAS DE CARBONO”**

Trabajo Curricular

**Presentan**

Mildreth Carbajal Melgarejo  
Juan Pablo Ramírez Monroy

**Asesor de proyecto**

Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez

Dra. Seydy Lizbeth Olvera Vázquez



JUNIO 2022, ZACATECAS



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional  
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Unidad Profesional Interdisciplinaria  
de Ingeniería Zacatecas

2022, Año de Ricardo Flores Magón

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

50 Aniversario de la UPIICSA

50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"

25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Folio

UPIIZ/ESA/470/2022

Asunto

DESIGNACIÓN DE ASESORES

Zacatecas, Zac., a 20 de octubre de 2022

**C. JUAN PABLO RAMÍREZ MONROY**

**C. MILDRED CARBAJAL MELGAREJO**

INGENIERÍA METALÚRGICA

BOLETA: 2019670020

GENERACIÓN: 2018-2022

**PRESENTE**

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez**, y la **Dra. Seydy Lizbeth Olvera Vázquez** sean sus **Asesores**, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación **CURRICULAR**, con el título y contenido siguiente:

**"Fabricación de aleaciones de Zinalco reforzadas con nanofibras de carbono".**

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA  
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS  
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN  
SEGUIMIENTO ACADÉMICO

L.C. María Monserrat Saldaña Noriega  
Jefa del Departamento de Evaluación  
y Seguimiento Académico

ATENTAMENTE  
"La Técnica al Servicio de la Patria"



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA  
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS  
DIRECCIÓN

DR. Fernando Flores Mejía  
Director de la UPIIZ



Folio  
UPIIZ/ESA/474/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón  
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura  
50 Aniversario de la UPIICSA  
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"  
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**C. JUAN PABLO RAMÍREZ MONROY**  
C. MILDRED CARBAJAL MELGAREJO

INGENIERÍA METALÚRGICA  
BOLETA: 2019670020  
GENERACIÓN: 2018-2022  
PRESENTE

Zacatecas, Zac., a 21 de octubre de 2022

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

**"Fabricación de aleaciones de Zinalco reforzadas con nanofibras de carbono".**

Se determinó que el citado Trabajo de Titulación, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.



DR. VÍCTOR HUGO GUTIÉRREZ PÉREZ



DRA. SEYDY LIZBETH OLVERA VÁZQUEZ

## ÍNDICE

### Contenido

RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	8
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 INDUSTRIA DEL ZINC.....	11
2.1.1 LATONES.....	12
2.1.2 BRONCES.....	13
2.1.3 GALVANIZADO .....	14
2.2 ELEMENTOS ALEANTES.....	15
2.2.1 INDUSTRIA DEL ALUMINIO.....	15
2.2.2 INDUSTRIA DEL COBRE .....	16
2.3 ZINALCO.....	17
2.3.1 INCURSIÓN EN LAS ALEACIONES Zn-Al .....	17
2.3.2 ORIGEN DEL ZINALCO .....	19
2.3.3 MICROESTRUCTURA DEL ZINALCO .....	20
2.4 REFUERZOS NANOESTRUCTURALES CON CARBÓN .....	22
2.4.1 NANOTUBOS.....	23
2.4.2 NANO-FIBRAS .....	24
CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE .....	26
CAPITULO 4. PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	27
4.1 PROBLEMA DE PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL ZINC .....	27
4.2. JUSTIFICACIÓN .....	29
4.3. HIPÓTESIS.....	29
CAPITULO 5. OBJETIVOS.....	30
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	30
5.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	30
CAPITULO 6. METODOLOGÍA .....	31
6.1 MATERIALES UTILIZADOS DURANTE EL PROCESO.....	31



Autorización de uso de obra

Autorización de uso de obra  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
Presente

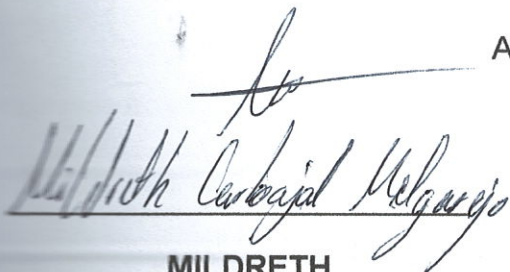
Bajo protesta de decir verdad los que suscriben Carbajal Melgarejo Mildreth y Ramírez Monroy Juan Pablo, estudiantes del programa de Ingeniería Metalúrgica, con número de boletas 2019670052 y 2019670020 respectivamente, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Fabricación de aleaciones de Zinalco reforzadas con nanofibras de carbono" en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el "IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo indefinido contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al "IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, el "IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

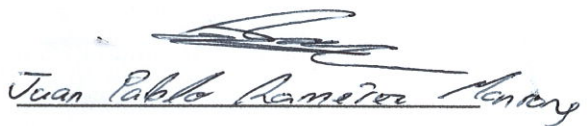
Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad al "IPN" en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 28 de junio del 2022

Atentamente



MILDRETH  
CARBAJAL  
MELGAREJO



JUAN PABLO  
RAMÍREZ MONROY

6. 2 ETAPA 1: MODELOS Y HERRAMIENTAS PREVIAS .....	32
6.2.1 MODELOS.....	32
6.2.2 CORTE Y PESADO DE MATERIALES DE CARGA .....	33
6.3 ETAPA 2: FUSIÓN .....	34
6.3.1 CÁLCULOS DE CARGA .....	34
6.3.2 ALEACIÓN DE ZINCALCO .....	34
6.3.3 ALEACIONES DE ZINCALCO REFORZADAS CON 0.1% WT Y 0.25% WT.....	35
6.3.4 ADICIÓN DE NANOFIBRAS DE CARBONO .....	35
6.4 ETAPA 3: PRUEBAS MECÁNICAS.....	36
6.4.1 ENSAYO DE TENSIÓN .....	36
6.4.2 ENSAYO DE DUREZA .....	37
6.5 ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN.....	38
6.5.1 METALOGRAFÍAS .....	38
CAPITULO 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	40
7.1 ENSAYOS DE TENSIÓN .....	40
7.1.1 ANALISIS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN .....	40
7.1.2 ANÁLISIS DE FRACTURA .....	43
7.2 ENSAYOS DE DUREZA .....	45
7.3 COMPARACIÓN CON OTRAS ALEACIONES.....	48
7.4 ANÁLISIS METALOGRÁFICOS .....	49
CAPITULO 8. CONCLUSIONES.....	54
CAPITULO 9. RECOMENDACIONES .....	55
CAPITULO 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
CAPITULO 11. ANEXOS .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES DEL ZINC [10].....	11
TABLA 2. PROPIEDADES DEL ALUMINIO [10].....	15
TABLA 3. PROPIEDADES DEL COBRE [10] .....	16
TABLA 4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO [6]. .....	21
TABLA 5. PESO DE CARGA OBTENIDO PARA CADA FUSIÓN REFORZADA .....	34
TABLA 6. MEDIDAS DE LAS PROBETAS ANTES DEL ENSAYO.....	36
TABLA 7. RESULTADOS DE PRUEBA DE TENSIÓN .....	40
TABLA 8. RESULTADOS DE PRUEBA DE TENSIÓN .....	41
TABLA 9. PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN PROMEDIO EN PROBETAS .....	43
TABLA 10. RESULTADOS ANALÍTICOS PRUEBA DE DUREZA .....	45
TABLA 11. COMPARACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ZINALCO REFORZADO CON ALUMINIOS DE LA SERIE 6XXX Y 5XXX [23] [24] [25]]. .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. USO DEL ZINC EN EL MUNDO [2]. .....	12
FIGURA 2. MEDICIÓN DE DENSIDAD DE NANO FIBRAS DE CARBONO .....	23
FIGURA 3. COMPARATIVA ENTRE NANOESTRUCTURAS DE CARBÓN .....	25
FIGURA 4. MINAS DE ZINC EN MÉXICO. [20].....	27
FIGURA 5. MINAS DE ZINC Y OTROS ELEMENTOS EN MÉXICO. [21] .....	28
FIGURA 6. DIAGRAMA DEL PROCESO.....	31
FIGURA 7. DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIÓN.....	33
FIGURA 8. MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL PARA ENSAYOS DE TENSIÓN.....	37
FIGURAS 9.1, 9.2. PROBETAS METALOGRAFICAS .....	38
FIGURA 10. PREPARACIÓN DE PROBETAS METALOGRAFICAS.....	38
FIGURA 11. PULIDO DE PROBETAS METALOGRAFICAS.....	38
FIGURA 12. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE ZINALCO REFORZADO CON 0.1 % WT VS BLANCO DE ZINALCO .....	42
FIGURA 13. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE ZINALCO REFORZADO CON 0.25 % WT VS BLANCO DE ZINALCO .....	42
FIGURA 14. FRACTURA FRÁGIL DE PROBETA REFORZADA .....	43
FIGURA 15. CLÚSTER DE NANO FIBRAS EN PROBETA B 0.1%.....	44
FIGURA 16. SUPERFICIE FRACTURADA DE PROBETA X CON 0.25% WT.....	44

FIGURA 17(A)(B)(C). CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE ZINALCO REFORZADO CON 0.1%WT DE NANO FIBRAS DE CARBONO..... 46

FIGURA 18. (X)(Y)(Z). CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE ZINALCO REFORZADO CON 0.25%WT DE NANO FIBRAS DE CARBONO ..... 47

FIGURA 19. CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE ZINALCO EN BLANCO ..... 47

FIGURA 20. MICROGRAFÍAS A 50X EN MICROSCOPIO TRAS ATAQUE QUÍMICO..... 50

FIGURA 21. MICROGRAFÍAS A 100X EN MICROSCOPIO TRAS ATAQUE QUÍMICO ..... 51

FIGURA 22. MICROGRAFÍAS A 400X TRAS ATAQUE QUÍMICO ..... 51

FIGURA 23. ACERCAMIENTO DE CLÚSTER DE NANO-FIBRAS DE CARBONO A 400X ..... 52

FIGURA 24. MICROGRAFÍAS COMPARATIVAS A DISTINTOS AUMENTOS DE ALEACIÓN DE ZINALCO EN BLANCO..... 52

## SIMBOLOGÍA

Símbolo	Descripción
$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
% wt	Por ciento peso
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
GPa	Giga pascales
$\text{g}/\text{cm}^3$	Gramos sobre centímetro cúbico
HB	Dureza Brinell
mL	Mililitros
MPa	Mega pascales
$\text{N}/\text{mm}^2$	Newton sobre milímetro cuadrado
$\text{n}\Omega \cdot \text{m}$	Resistividad eléctrica
$\mu\text{m}$	Micrómetro



## RESUMEN

Las aleaciones de zinc cuentan con propiedades favorables para la industria automotriz; sin embargo, su uso se ve limitado por su carente dureza y/o resistencia a la tensión, propiedades que pueden ser incrementadas por medio de refuerzos a base de carbono, elegidos debido a su increíble energía superficial; característica que si bien posibilita una buena interacción con la matriz, también es capaz de generar atracción entre las partículas de su misma especie, provocando aglomeraciones y evitando la formación de enlaces sólidos.

El método presentado en este trabajo consiste en adicionar un refuerzo de nano fibras de carbono a una matriz de Zinalco, durante su proceso de fusión. Para evaluar el procedimiento, se elaboraron tres probetas con una adición de 0.1% de refuerzo, tres con 0.25%, y una sin refuerzo.

Se realizaron ensayos de dureza y tensión, observando en los resultados una mejoría de hasta el 49.27% en la resistencia a la tensión del material reforzado con 0.1% de refuerzo, dando a entender que una adición del 0.25% de refuerzo excede la cantidad eficiente para una matriz de Zinalco. Además, fue realizado un análisis metalográfico y de superficie de fractura revelando clústers intergranulares de carbono, el crecimiento dendrítico y las fases presentes.

**Palabras clave:** Energía superficial, nano fibras de carbono, refuerzo, Zinalco.

## ABSTRACT

Zinc alloys have properties that are favorable for the automotive industry; however, its use is limited by its low hardness and/or tensile strength, properties that can be increased by carbon-based reinforcements, selected because of their incredible surface energy; characteristic that can enable a good interaction with the metal matrix, but it also can generate attraction between the particles of the same kind, causing agglomerations and avoiding the formation of solid bonds.

The method presented in this work consists of adding a reinforcement of carbon nanofibers to a Zinalco matrix during its fusion process. To evaluate the procedure. Three specimens were made with an addition of 0.1% of reinforcement, three with 0.25%, and one more without reinforcement.

Hardness and tension tests were made observing in the results an improvement of up to 49.27% in tensile strength of the material reinforced with 0.1% of reinforcements, implying that an addition of 0.25% of reinforcement exceeds the efficient amount for a matrix of Zinalco. In addition, a metallographic and fracture surface analysis were performed, revealing intergranular clusters of carbon, the dendritic grow, and the present phases.

**Keywords:** surface energy, carbon nanofiber, reinforcement, zinalco,

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el aprovechamiento de zinc en México se encuentra en niveles bajos por debajo de otras materias primas como lo es la plata, el cobre y el plomo [1], esto a pesar de ser utilizado ampliamente en el galvanizado (recubrimiento de Zn), este siendo la aplicación principal de este metal en la actualidad [2]; esto se debe a que para diversas aplicaciones, las aleaciones de Zinc no cumplen con ciertas exigencias mecánicas requeridas como lo son la resistencia a la tensión o la exigencia a altas durezas; por lo que se ha visto desaprovechada la riqueza de Zinc en nuestro país aún contado con las ventajas de sus aleaciones como menor energía de procesamiento y gran colabilidad [3]. Sin embargo, gracias a los avances en ciencias de materiales se han encontrado distintos procedimientos para reforzar diversos materiales, entre los cuales se encuentra este metal [4]. Algunos de estos métodos se encuentran basados en el carbono y sus distintas formas alotrópicas microestructurales, como lo son las nano-fibras de carbono (forma de carbono que se utilizó en este proceso), las cuales aún representan un reto para los investigadores para insertarse en las aleaciones de matriz metálica. Entre los materiales aptos para recibir refuerzos se encuentra el Zinalco, aleación base zinc con porcentajes del 15-30% de aluminio y 2-4% de cobre, de creación mexicana por la UNAM en 1977 [5].

El Zinalco se deriva de aleaciones previas de Zn-Al, las cuales son usadas principalmente para la fundición por inyección debido al bajo punto de fusión del zinc. El Zinalco cuenta con la misma propiedad de poder ser utilizada en fundiciones por inyección, y además suma diferentes características extra a las aleaciones Zn-Al como lo son una mayor resistencia a la tensión, y una mejor conformabilidad ya que no reduce su resistencia a la corrosión después de ser deformada en procesos de extrusión [6].

Si bien esta combinación entre el Zinalco y las nano fibras de carbono genera poderosos refuerzos, tiene una alta insolubilidad con el carbono, dónde pueden formarse aglomerados debido a la energía superficial de los refuerzos, resultando en una complicada homogeneización durante su fase líquida [5]. Sumado a estos factores se encuentra su gran diferencia de densidades con respecto a los elementos de aleación, la cual causa que una parte del refuerzo tiende a irse a la escoria rápidamente después de su adición a la matriz metálica.

La razón por la cual no todos los refuerzos son aptos para alear es que, en ocasiones, según sea la cantidad adicionada, el refuerzo podría llegar a ser

perjudiciales para el material, provocando esfuerzos residuales y el decrecimiento de propiedades mecánicas, por lo que debe encontrarse un valor eficiente de adición y el método correcto para llevar a cabo la introducción de éste al metal. Ciertos procedimientos [7], como la adición de nano-fibras de carbono durante la última etapa de fusión en aleaciones de Zinalco, mezclando con hélices giratorias antes de escorificar, han demostrado una correcta homogeneidad en el material, aunque existen distintas variables que afectan el proceso, como la cantidad y velocidad de adición del nano refuerzo, el tiempo transcurrido entre la adición y la solidificación, la correcta desgasificación del material, el método de mezcla, etc.

Para medir el efecto de las nano-fibras de carbono se realizaron 2 piezas durante cada fundición, y se repitieron 3 veces estas piezas con la finalidad de corroborar la repetibilidad de los datos obtenidos. Una de las piezas está enfocada a ensayos de resistencia de tensión y otra está enfocada a ensayos de dureza. Estas piezas se fundieron por medio del moldeo en verde en cargas de aproximadamente 700g.

Se prospecta, según investigaciones previas [1] [6] [8] y el conocimiento acumulado a lo largo de este trabajo que la adición de las nano fibras de carbono como refuerzo para las aleaciones de Zinalco le otorgue una mejora significativa en las propiedades mecánicas de estas aleaciones, colocando así a esta aleación como un sustituto viable en el mercado, compitiendo principalmente con aleaciones de aluminio de la serie 5XXX y serie 6XXX enfocadas en aplicaciones de construcción y transporte [9], y por consiguiente aprovechar aún más la riqueza de este mineral de México. El Zinalco se enfoca principalmente en estas industrias debido a sus propiedades, específicamente su resistencia a la tensión, resistencia a la corrosión y ligereza; factores claves para inducirse en dichas industrias.

Adicionado a las mejores propiedades mecánicas que esta aleación pueda obtener con respecto a otras aleaciones de aluminio, el Zinalco presenta propiedades sobresalientes que le permiten resaltar en la industria como un bajo punto de fusión, que generaría una disminución en los costes de fabricación, y una factibilidad de poder ser fundida por inyección [3].

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 INDUSTRIA DEL ZINC

El zinc es un metal de tono lustroso con color blanco azulado, es quebradizo a temperaturas ordinarias, pero se convierte en un material maleable al alcanzar la temperatura de 100-150°C. De igual forma este material es un buen conductor de electricidad y puede llegar a presentar superplasticidad en ciertos casos.

*Tabla 1. Propiedades del zinc [10]*

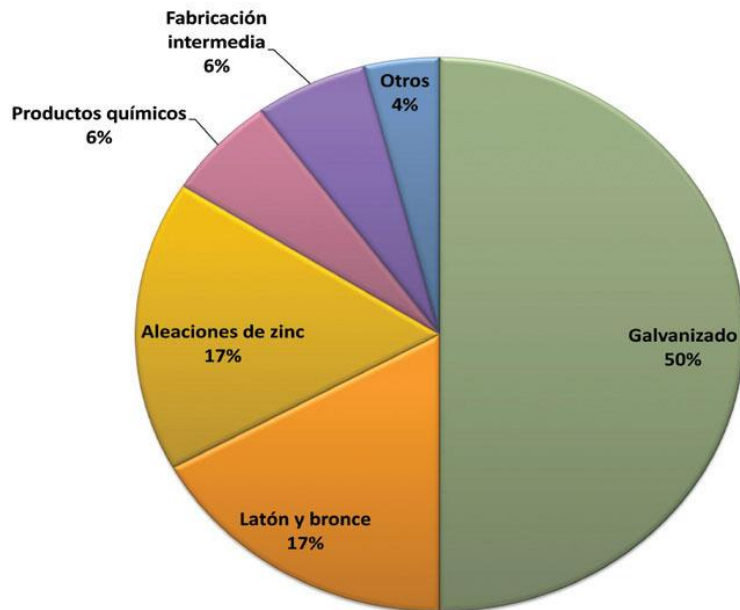
Número atómico	30
Símbolo atómico	Zn
Peso atómico	65.38
Punto de fusión	419.5°C
Punto de ebullición	907°C
Estados de oxidación	2

El zinc es el cuarto metal más usado en la industria (aparte del hierro, aluminio y cobre), el cual es usado principalmente en el galvanizado de láminas y ánodos para la protección del hierro y el acero de la corrosión.

En el 2010 se produjeron en el mundo más de 11 millones de toneladas de zinc. Como se logra apreciar en la Figura 1, que nos muestra un gráfico de pastel referente a las industrias en las cuales se utiliza el zinc, casi el 50% se utiliza para galvanizado de acero, es decir, para protegerlo frente a la corrosión por medio de una capa delgada de Zinc, cuyo principal propósito es oxidarse. En torno al 17% se utiliza para producir latón y otro 17% para la producción de aleaciones de base zinc, principalmente en el sector de moldeado por presión. Por último, también se utilizan cantidades significativas en compuestos, como por ejemplo en óxido de zinc y sulfato de zinc, así como en planchas de zinc, utilizadas en tejados, canalones y bajantes. [11]

Su punto de fusión es relativamente bajo (419.5°C), lo cual facilita su refinamiento por volatilización, y su conversión en productos útiles. La alta fluidez del líquido contribuye a su buena colabilidad, lo que permite la colada de componentes de pared delgada. El zinc forjado y las aleaciones de zinc son posibles de formar en laminadas planas, trefiladas, extruidas y forjadas gracias a dichas propiedades.





*Figura 1. Uso del zinc en el mundo [2].*

De igual forma el zinc y sus aleaciones muestran excelentes propiedades de rodamiento y desgaste debido a sus características superficiales auto lubricantes que dan como resultado un bajo coeficiente de fricción por deslizamiento y resistencia a la excoiación. El zinc también ofrece buena resistencia a las chispas y buenas características de mecanizado. Sus excelentes propiedades de amortiguación de vibraciones y sonido, que aumentan con la temperatura, son similares a las de los hierros fundidos.

En la actualidad el uso del zinc y sus aleaciones fundidas se encuentra principalmente en las industrias automotriz, de ferretería, de electrodomésticos y de componentes eléctricos.

### 2.1.1 LATONES

Los latones son aleaciones base cobre con una adición de zinc. La maquinabilidad de esta aleación se puede mejorar por medio de la adición de plomo, pero esto reduce su trabajo en caliente, ya que el plomo se localiza en las fronteras de grano y vuelve poco maleable el material.

La mayoría de los latones no se pueden endurecer por los métodos de tratamientos térmicos convencionales, por lo cual se utilizan diversos métodos de endurecimiento en cambio para estas aleaciones, como lo pueden ser.

- Endurecimiento por solución sólida
- Endurecimiento por precipitación
- Endurecimiento por deformación en frío

Actualmente los latones 70%Cu y 30% Zn son empleados en la fabricación de los cascos de cartuchos militares debido a su ductilidad y maleabilidad que presentan durante el embutido profundo llevado a cabo en el proceso de fabricación. Además, esta aleación forma una capa de óxido estable en su superficie que no permite que este reaccione químicamente con los componentes activos de las pólvoras de propulsión usadas en la milicia. [12]

Una aleación altamente usada de igual forma es el metal Muntz o latón de forja es una aleación de latón cuyo uso se extendió rápidamente en el siglo XIX al ser mucho más económico que el cobre y ofrecía prestaciones similares. Contiene entre el 51% y 61% de cobre y entre el 39% y el 45% de zinc, además de un pequeño porcentaje de hierro, y es una de las aleaciones más empleadas en todo tipo de industrias. Por su ligereza y durabilidad está muy presente en la del transporte, pero también es común en sistemas de agua caliente al resistir muy bien la corrosión. El metal Muntz se conoció también como "Yellow Metal" (metal amarillo).

### **2.1.2 BRONCES**

El bronce es una aleación base cobre con una adición de diversos elementos, de los cuales principalmente es el estaño.

Esta aleación es utilizada hoy en día para diversas piezas como lo son engranajes, cojinetes, entre otras, donde se requiere buena resistencia y una alta resistencia al desgaste.

Las aleaciones de bronce forjado están disponibles en cuatro tipos:

- Bronce fosforado: Aleación de cobre-estaño-fósforo.
- Bronce fosforado al plomo: Aleación de cobre-estaño-plomo-fósforo
- Bronce al aluminio: Aleación de cobre y aluminio
- Bronce al silicio: Aleación de cobre y silicio

Las aleaciones de bronce fundido tienen cuatro tipos principales:

- Bronce al estaño: Aleación de cobre-estaño
- Bronce al estaño con plomo: Aleación de cobre-estaño-plomo
- Bronce al níquel y estaño: Aleación de cobre-estaño-níquel
- Bronce al aluminio: Aleación de cobre-aluminio [13]

### 2.1.3 GALVANIZADO

Debido a su posición altamente anódica (segunda después del magnesio) en la serie electromotriz de los metales, el zinc se usa ampliamente como ánodo de sacrificio para la protección del hierro y los aceros como recubrimientos galvanizados. Los componentes estructurales de zinc tienen buena resistencia a la corrosión siempre que no se excedan los límites de impurezas y siempre que el componente sea independiente o esté diseñado correctamente para evitar la corrosión galvánica por contacto con otros metales. [9]

Para este proceso se pueden seguir 2 métodos diferentes los cuales siguen el mismo objetivo, recubrir con zinc el metal a proteger. Estos 2 métodos son:

**Galvanizado en caliente:** Es un procedimiento para recubrir metales de hierro/acero mediante su inmersión en un crisol de zinc fundido a 450 °C, con el objetivo evitar la oxidación y corrosión que el medio ambiente puede ocasionar sobre el hierro. Esta actividad desde hace más de 150 años se ha ido afianzando como el procedimiento más fiable y económico de protección del hierro contra la corrosión. Al retirar el acero del baño, se han formado varias capas superficiales de aleación zinc-hierro en las que el zinc se ha solidificado. Estas diferentes capas de aleación son más duras que la base de acero y tienen un contenido de zinc cada vez mayor a medida que se aproximan a la superficie del recubrimiento.

Las ventajas de este proceso son que es más rápido que el galvanizado electrolítico, es más simple y no requiere de químicos.

**galvanizado electrolítico:** Este proceso consiste en la electrodeposición de zinc mediante el uso de corriente eléctrica continua sobre una superficie metálica (cátodo de hierro o acero). El proceso de electrodeposición ocurre a un voltaje bajo (10-40

V), en el cual los iones de zinc pasan por un electrolito ácido o alcalino, que puede llegar hasta las 30 micras.

Este proceso no presenta capas intermedias, pero presenta ventajas como lo son un mayor control del espesor de la capa protectora, es más económico que otros procesos de recubrimiento, y el acabado en general es más estético ya que no deja impurezas en el recubrimiento.

## 2.2 ELEMENTOS ALEANTES

### 2.2.1 INDUSTRIA DEL ALUMINIO

El aluminio es un material de color blanco-plateado el cual posee varias características que son afines a diversas industrias en la actualidad. Sus aleaciones destacan principalmente por su baja densidad ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $1/3$  en relación con la del acero) y su resistencia a la corrosión, aunque también pueden usarse en componentes eléctricos debido a su alta conductividad eléctrica (resistividad eléctrica:  $28/60 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ )

*Tabla 2. Propiedades del aluminio [10]*

Número atómico	13
Símbolo atómico	Al
Peso atómico	26.981
Punto de fusión	$660.32^\circ\text{C}$
Punto de ebullición	$2519^\circ\text{C}$
Estados de oxidación	3

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y el más abundante de los metales, y hoy en día es uno de los metales más utilizados en la industria.

Entre sus propiedades mecánicas destacan su resistencia a la tracción a temperatura ambiente (150-450 MPa), su límite elástico (100-300 MPa) y su módulo de elasticidad (69-73 GPa). De igual forma el aluminio puede contar con una amplia variedad de durezas relativamente bajas (Al-comercial 20 HB, Grupo Al-Zn: 150

HB), su resistencia a la fatiga es aceptable (sin un límite de fatiga definido) y la resiliencia es normalmente elevada, excepto en los aluminios más resistentes (grupos Al-Cu y Al-Zn). [14]

Estas cualidades, junto con la gran aptitud para el conformado (deformación en frío, forja, moldeo, extrusión, mecanizado), han convertido las aleaciones de aluminio en el segundo grupo de materiales metálicos más usados después de los férricos, aunque su obtención industrial no se inició hasta finales del siglo XIX.

En la vida moderna, el aluminio tiene múltiples aplicaciones, tanto en su forma metálica, como formando compuestos.

Una de las principales industrias en las cuales el aluminio ha generado un gran impacto es el área de transporte gracias a su ligereza y resistencia mecánica, la cuales ayudan a reducir el peso de los vehículos y por lo tanto reducir la energía requerida para su movimiento, generando así menores cantidades de gases contaminantes ayudando a las empresas a cumplir las nuevas normas ambientales con respecto a la contaminación causada por los escapes de los coches. [15]

Otra propiedad que ha favorecido mucho el uso del aluminio metálico es su marcada resistencia a la corrosión, a esta propiedad se debe su gran éxito en la fabricación de perfiles y cancelas para puertas y ventanas, millones de latas para contener diversos líquidos y gran variedad de utensilios de cocina.

### 2.2.2 INDUSTRIA DEL COBRE

El cobre es un metal rojizo que tiene un brillo metálico brillante. Es un material maleable, dúctil y buen conductor de calor y de la electricidad (resistividad eléctrica de  $16,7 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ ).

*Tabla 3. Propiedades del cobre [10]*

Número atómico	29
Símbolo atómico	Cu
Peso atómico	63.546
Punto de fusión	1084.6°C
Punto de ebullición	2562°C
Estados de oxidación	2, 1



El cobre es el tercer metal más abundante en la industria después del aluminio y el hierro, gracias a sus propiedades.

Las cualidades más destacadas del Cu y sus aleaciones una alta conductividad eléctrica (resistividad eléctrica de  $16,7 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ), una alta conductividad térmica y una buena resistencia a la corrosión. Al mismo tiempo combina estas cualidades con una resistencia mecánica aceptable (intermedia entre la de los aceros y los aluminios) y una excelente aptitud para el conformado, especialmente gracias a su ductilidad. Los factores que pesan en el lado negativo de la balanza son la elevada densidad ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ , 15% superior a la de los aceros) y un coste elevado.

Entre sus aplicaciones están su uso en cuestiones eléctricas como cables y circuitos eléctricos, en elementos de disipación de calor como intercambiadores de calor, y en usos estructurales. [14]

## 2.3 ZINALCO

### 2.3.1 INCURSIÓN EN LAS ALEACIONES Zn-Al

Las primeras aleaciones de zinc-aluminio surgieron en Alemania por el periodo de 1950 con la finalidad de sustituir al bronce en sus diversos usos industriales debido a la escasez de éste.

Al principio, las aleaciones consistían en una base de zinc con un 10 al 30% de aluminio, las cuales llegaron a ser más económicas que las aleaciones de cobre utilizadas en dicha época. Estas aleaciones pueden ser fundidos en moldes de arena en verde, moldes permanentes, moldeo por inyección, moldeo por centrifugación, etc.

En 1975 los científicos se dieron cuenta de la propiedad de superplasticidad que puede llegar a poseer esta aleación, sobre todo tras recibir un tratamiento térmico, lo cual permitió a estas aleaciones entrar más en la industria dentro de los procesos de conformado con una alta deformabilidad; sin embargo, este proceso reducía su resistencia a la corrosión. [6]

Más tarde en la época de 1980 las aleaciones aparecieron en Estados Unidos con los nombres ZA-12 y ZA-27, la cual hace referencia a su contenido de aluminio, aunque su principal uso fue solamente en el área de la obtención de piezas de fundición.

Estas aleaciones son materiales alternativos a diversas aleaciones utilizadas en la industria como lo son el hierro fundido, bronce, aluminios y fabricados de acero. Y una de las principales ventajas de esta aleación con respecto a las anteriores es su bajo costo de fundición debido a su baja temperatura de fusión y a su buena colabilidad, esto teniendo propiedades generalmente superiores a las de un bronce estándar.

Estas aleaciones poseen una alta resistencia a la tensión y una buena dureza, su resistencia puede llegar hasta los 64,000 psi dependiendo de la aleación y el proceso de fundición. Posee una buena resistencia al rodamiento y al desgaste, por lo cual se utilizan como sustitutos directos de casquillos y cojinetes industriales de bronce, siendo que estas aleaciones tienen un costo menor de fabricación y son hasta 43% más livianas.

El mecanizado de estas aleaciones es rápido y con un desgaste bajo para las herramientas, siendo que las velocidades de mecanizado utilizadas en este proceso son muy parecidas a las del latón de mecanizado libre y pueden ser 3 veces más rápidas que las del hierro fundido, la facilidad de mecanizado y la eliminación de los problemas de rotura de herramientas a menudo han influido en la selección de esta aleación sobre piezas de hierro fundido.

Los componentes de esta aleación de aluminio, cuando se golpean con hierro o acero oxidado, pueden generar una reacción exotérmica caliente que puede provocar una explosión de mezclas de gas/aire inflamables. Las aleaciones Zn-Al 8% y Zn-Al 12% se recomiendan como aleaciones que no producen chispas para aplicaciones mineras, marinas entre otras.

La resistencia a la corrosión de esta aleación es alta en condiciones atmosféricas, y en varias soluciones acuosas como lo es el petróleo. Su resistencia a la corrosión es similar a la del aluminio común. Sin embargo, esta propiedad se puede aumentar por medio de tratamientos superficiales como lo son el cromado, el plateado, aplicación de pinturas y anodización del zinc.

Esta aleación, aunque presenta grandes propiedades, tiene una desventaja significativa, la cual es su limitación de áreas de trabajo debido a temperaturas altas, ya que su resistencia a la tensión y su dureza bajan significativamente. Estas aleaciones pueden sufrir de deformación plástica cuando se aplica un esfuerzo a temperaturas aproximadas a los 200°F o 95°C, por lo cual un estrés constante a estas temperaturas no es recomendable para estas aleaciones. Lo mejor para estas aleaciones es mantenerlas en un rango menor a 120°F o 50°C con un estrés moderado. [16]

De estas aleaciones también surge la aleación ZAMAK, la cual es una aleación que contiene zinc, aluminio, magnesio y cobre; el cual es muy resistente a los roces y a las abolladuras, y contiene un porcentaje menor de aluminio en su composición. Esta aleación se caracteriza por ser principalmente fabricada por medio de moldeo por inyección, ya que por medio de fundición en verde puede generar muchas porosidades en su estructura.

Su uso hoy en día ha sido muy extendido en el sector del herraje, debido a sus propiedades similares a las del latón. Las piezas fabricadas en Zamak se utilizan en componentes de automóvil, construcción, electricidad, electrónica, telefonía, juguetes, artículos de deporte, decoración y vestido.

Para conocer más a detalle de las propiedades de las aleaciones convencionales más usadas de Al-Zn se puede visitar el anexo 3.

### **2.3.2 ORIGEN DEL ZINALCO**

En 1977, se estudió en México la aleación con el objetivo de obtener una aleación que pudiera sustituir al aluminio como materia prima, y con el tiempo surgió la aleación de Zinalco, la cual tuvo un desarrollo propuesto por la Organización de Estados Americanos.

El nombre Zinalco es una marca registrada a favor de la Universidad Nacional Autónoma de México. Su nombre viene directamente del uso de los nombres de sus componentes, zinc, aluminio y cobre.

La baja densidad de esta aleación, su resistencia a la corrosión y su ventaja para el país dio paso a que el Zinalco se volviera una opción como materia prima para la

formación de una amplia gama de productos, siendo rival de aleaciones de cobre, latones y aluminios; Incluso el grupo Falmex-Galvotec en 1984 inició el desarrollo industrial de esta nueva aleación invirtiendo su capital en este proyecto de la UNAM, encaminado a ensayar sus aplicaciones en la industria. [3]

### **2.3.3 MICROESTRUCTURA DEL ZINALCO**

El Zinalco es básicamente una aleación de zinc-aluminio modificada con una adición de cobre del 2-4%, la cual puede presentar una alta resistencia mecánica parecida a la del acero estructural, con la resistencia a la corrosión del aluminio. Esto se debe a la formación de precipitados de Cu-Al en la fase  $\alpha$  y precipitados de Cu-Zn en la fase  $\beta$ , que aumentan su dureza y resistencia a la tensión, aunque disminuyen en cierto grado su deformación máxima.

La fase  $\alpha$  es aluminio con menos del 1% del zinc disuelto, y la fase  $\beta$  es zinc con menos de 0.5% de aluminio disuelto. La forma geométrica que toman estas fases depende de la trayectoria seguida durante el enfriamiento a partir de una temperatura del orden de 280°C, pero inferior a 420°C, que es la región donde el Zinalco adquiere una estructura cristalina semejante a la del aluminio; cúbica centrada en las caras. Si la aleación sufre un enfriamiento brusco, la estructura resultante contará de granos muy finos de la fase  $\alpha$  y  $\beta$ , mientras que, si se enfría lentamente, las fases  $\alpha$  y  $\beta$  se arreglan en forma de láminas alternadas dando una estructura perlítica. En ambos casos, contando los granos muy finos o las láminas generalmente solo son observables con la ayuda de la microscopía electrónica, ya que su ancho es menos a 3  $\mu\text{m}$ . [17]

### **2.3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO**

Las propiedades del Zinalco llegan a competir con las de 2 metales ampliamente usados en la industria como lo son el aluminio (resistencia a la corrosión) y del hierro (resistencia a la tensión en aceros estructurales de bajo carbono). Se pueden observar mejor sus propiedades en la tabla 2.

*Tabla 4. Propiedades físicas del Zinalco [6].*

Temperatura de fusión (K)	649-754
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	5.4x10 <sup>3</sup>
Conductividad eléctrica (ohm/cm)	0.0000059
Conductividad térmica (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	125.5
Resistencia a la tensión	200-300MPa
Coefficiente de expansión térmica	25µm/mm K

Esta aleación puede ser laminada o extruida, en contraste con las aleaciones convencionales de Zn-Al, las cuales no son aptas para procesos de conformado. El uso de esta aleación disminuye los costos energéticos ya que requiere de menor energía para poder ser trabajada, y no acelera su velocidad de corrosión el proceso de conformado.

Sus propiedades la llevan a tener mejores niveles de resistencia mecánica que el aluminio, y una densidad intermedia entre el aluminio (2.7g/cm<sup>3</sup>) y la del acero (7.8g/cm<sup>3</sup>). De igual forma el rango de temperaturas en las cuales ocurre la fusión es menor en el caso del aluminio, dando así un menor gasto de energía que éstas. Si se aplica un tratamiento termo mecánico apropiado a la aleación en la cual se logran obtener granos muy finos, se puede conseguir una respuesta super plástica del material a temperaturas del orden de 250-300°C. [1]

Otras propiedades que debe de poseer la aleación para poder alcanzar el estado de super plástico son:

- Debe de utilizarse una velocidad de deformación baja
- Los bordes granulares en la aleación deberán permitir que los granos se deslicen fácilmente unos sobre otros y giren al aplicarse esfuerzo

Cuando la aleación es tratada con un templado en hielo para conseguir granos muy finos, y subsecuentemente a una laminación a temperatura ambiente, se puede conseguir una deformación cercana al 200% a 20°C.



### 2.3.5 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ZINALCO

En el caso de la industria de la construcción, la resistencia a la corrosión juega un papel clave para el uso de las aleaciones junto con su resistencia mecánica y su ligereza. La corrosión puede llevar a cabo una pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad de los componentes mecánicos, afectando de esta forma su desempeño.

Estudios de la aleación Zn-Al22 muestran que este material presenta una buena resistencia a la corrosión por parte del vapor de agua, gracias al desarrollo de una capa de óxido protector que impide el crecimiento de la oxidación hacia dentro del material. La capa está formada por dos partes correspondientes a las fases  $\alpha$ , donde se forma una capa semejante a la encontrada en el aluminio puro, y  $\beta$ , donde la capa es más porosa y de mayor volumen.

Conforme a las distintas microestructuras posibles, se nota una menor corrosión en el arreglo perlítico que en las estructuras de grano fino. Este efecto puede ser provocado por la existencia de una gran cantidad de superficies en la estructura de granos finos, ya que se ha observado anteriormente que los granos tienen mayor concentración de zinc cerca de las fronteras. En las estructuras de fundición es observable la corrosión en las regiones inter dendríticas ricas en zinc, mientras que, en la microestructura perlítica, la cantidad de fronteras es menor, por lo cual la corrosión se distingue en menor grado.

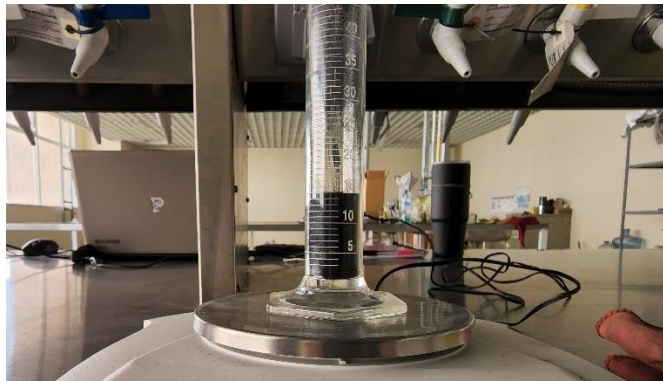
Además de su capacidad de formar capas de óxido estable, el Zinalco puede aceptar recubrimientos protectores por anodinado o por inmersión en baños de cromatos. [17]

### 2.4 REFUERZOS NANOESTRUCTURALES CON CARBÓN

Una de las estrategias para aumentar la resistencia de un material ha sido disminuir el tamaño de grano; esto ha llevado al desarrollo de materiales nanoestructurales. Los nanomateriales se pueden hacer crecer de manera controlada agregados atómicos y estructuras diversas con dimensiones en el rango de los nanómetros (millonésima parte de un milímetro).

Los refuerzos son materiales agregados a una matriz para otorgar propiedades que la matriz no posee; estos pueden ser de distinto origen a la base por lo que se les

conoce como materiales compuestos. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánica, pero también se emplean los refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión. Es más efectivo cuando menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz, por lo que no debe exceder ciertos % en peso a la del material base, ya que podría causar insolubilidad y/o formar aglomerados, para ello puede ser tomada en cuenta una relación de volumen entre la matriz y el material de refuerzo, sin embargo es una larga tarea para los investigadores hallar la relación correcta de adición en la que no se afectasen las propiedades del material compuesto y prevalezca una mejora.



*Figura 2. Medición de densidad de nano fibras de carbono*

El carbono, en más de una de sus formas, es un buen candidato para reforzar aleaciones ligeras, debido a su baja densidad ( $0.34\text{g/cm}^3$ , calculada en la figura 2) elevada resistencia y módulo de Young, electrónicamente pueden comportarse como conductores, semi conductores o aislantes dependiendo de su diámetro. Además, su elevada energía superficie permite suponer una alta eficacia en la transferencia de carga y una intercara con la matriz muy resistente, frente al movimiento de dislocaciones. Sin embargo, existe una problemática con los refuerzos de dicho material y es la falta de mojabilidad como propiedad, lo que genera aglomerados al tratar de introducirse dentro de la matriz metálica, dificultando su homogeneización. [4].

#### **2.4.1 NANOTUBOS**

Los nanotubos de carbón son estructuras cilíndricas de moléculas de carbón pertenecientes a la familia de los fullerenos. Estructuralmente son divididos en dos partes: dos medias esferas colocadas en los extremos del nanotubo y el cuerpo del

nanotubo consta de una malla de átomos de carbono colocados en forma bidimensional. [11]

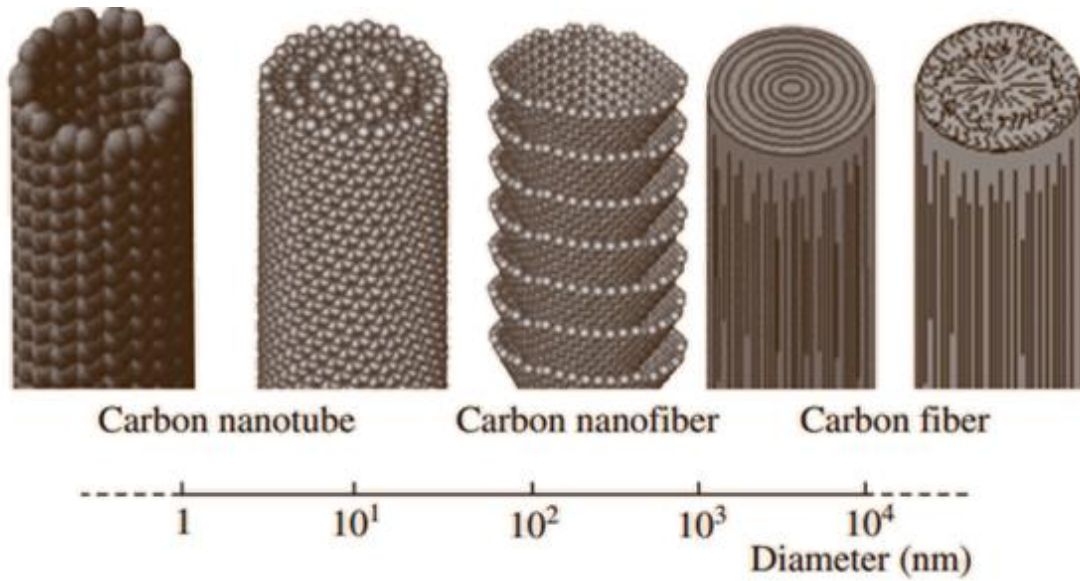
Los CNT (por sus siglas en inglés), fueron observados por primera vez en 1985 al estudiar material estelar por microscopía y hallar una molécula conformada por exactamente 60 átomos de carbono. Sin embargo, fueron sintetizados hasta 1991 por medio de la técnica de descarga de arco, utilizada para la formación de fullerenos.

Las propiedades de los CNT dependen en gran medida de la técnica usada para su crecimiento. La diferencia estructural de las nanopartículas de carbón es debida al acomodo de las capas o láminas que lo conforman: Nanotubos de Carbón de Pared Sencilla, Nanotubos de Carbón de Paredes Múltiples y sus derivadas nano-fibras de carbón.

#### **2.4.2 NANO-FIBRAS**

Las nano fibras de carbón consisten en placas gráficas perfectamente arregladas en varias orientaciones respecto al eje de la fibra. Los CNF presentan longitudes significativamente mayores que los nanotubos de paredes múltiples (siendo una subcategoría de estos). Las longitudes de las CNF están en los intervalos de 5 a 100 micrones, y diámetros en un intervalo de 5 a 100 nm.

Las nano fibras presentan mayor reactividad química que los nanotubos y esto es debido a la gran cantidad de defectos estructurales presentes en la geometría de las nano fibras. Existen dos tipos principales: las nano fibras de carbono de pared simple, sintetizadas por medio del método láser y las nano fibras de pared doble fabricadas bajo el método más común de arco eléctrico.



*Figura 3. Comparativa entre nanoestructuras de carbón*

### CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE

El estudio del Zinalco, como se ha venido mencionando, fue estudiado por primera vez por investigadores de la UNAM [6] sin embargo han derivado otras investigaciones donde se les ha encontrado distintas aplicaciones como lo son los tornillos anticorrosivos, muebles de cocina, naves de bodegas; además, la lámina en estado super plástico abre nuevas técnicas en la fabricación de automóviles, a través de la producción de carrocerías sin soldaduras, semejantes a las de fibra de vidrio [6].

La química de nanomateriales es un área compleja que no solo se ha dedicado a aportar al sector de materiales metálicos sino que el tipo de refuerzo del que se habla también ha sido utilizado en la fabricación de materiales poliméricos, como lo demuestra la Ing. Trejo M. en su trabajo "Modificación superficial por plasma de nanotubos de carbón y nano fibras utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos" en 2006, donde realiza un análisis de dichos materiales de interés y su interacción como compuestos de materiales poliméricos.

Además, se encuentran trabajos dedicados al refuerzo de la aleación de Zinalco natural, modificando las composiciones metálicas y/o formas de fabricación ya que gran parte de la dificultad, consiste en los procedimientos, que además se buscan reforzar con distintos nanomateriales, modificando tanto su procedimiento como la adición del refuerzo, ambos tipos de experimentación pueden observarse en el trabajo de "Fabricación de Zinalco reforzado con nano fibras de carbono" de Tovar G. en 2021 donde se realiza un análisis preliminar de las mejoras presentadas en la aleación obtenidas gracias al refuerzo adicionado, con base en ello es posible parametrizar los alcances de la nano fibras de carbono en una matriz de Zinalco, siempre tomando en cuenta las limitaciones que podrían presentarse debido a la insolubilidad de este material, además de hallar el valor máximo estimado de adición de nano fibras de carbono (0.25% wt) para evitar la volatilización de éstas. permitiendo tanto al presente escrito, como a futuras investigaciones establecer un rango de valores aceptables más reducido y por ende más certeros.



## CAPITULO 4. PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 4.1 PROBLEMA DE PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL ZINC

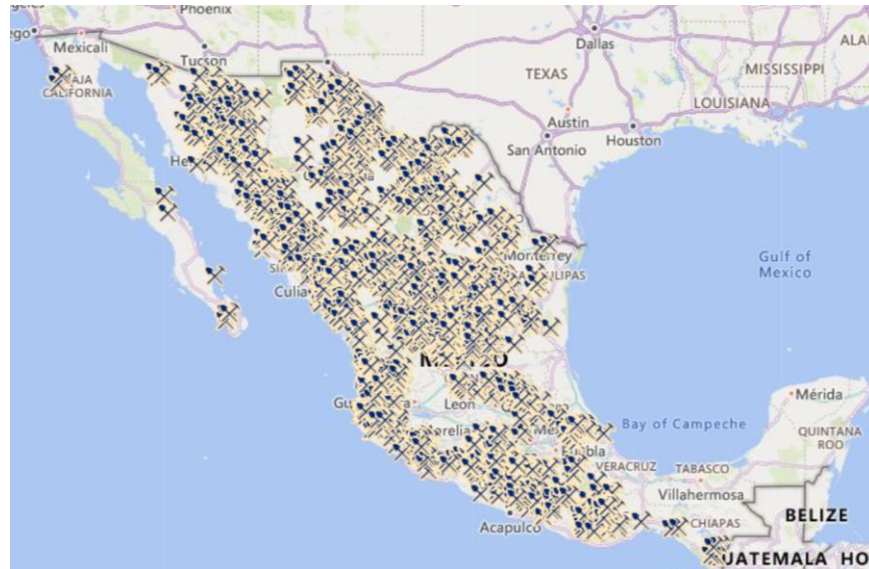
El zinc es un metal ampliamente explotado en México, posicionándose como el sexto productor a nivel mundial con una producción de 690 mil toneladas en 2019 detrás de países como China con 4,300 mil toneladas. [18]

México también cuenta con grandes reservas de dicho mineral estimadas en 22,000 toneladas, lo cual ha dado paso a proyectos mineros en México que prometen un aumento de producción del zinc, como lo son el proyecto Buenavista zinc en el estado de Sonora por parte de Southern Copper que promete una producción de 100 mil toneladas de zinc, el proyecto San Nicolás en el estado de Nuevo León por parte de Teck Resources que promete una producción de 91 mil toneladas de zinc, y el proyecto Metates en el estado de Durango por parte de Chesapeake Gold que promete una producción de 56,296 toneladas de zinc. [19]

Actualmente en México existen 141 zonas dedicadas únicamente a la extracción de zinc y 4232 zonas que además de zinc extraen otros metales, como se puede observar en la Figura 2 y en la Figura 3 respectivamente, donde se marcan las unidades mineras en México.



*Figura 4. Minas de zinc en México. [20]*



*Figura 5. Minas de zinc y otros elementos en México. [21]*

A pesar de toda la industria que existe en México en torno al zinc, el aprovechamiento de este mineral en el país se ha estancado durante los últimos años, ya que una gran parte de éste se va a exportaciones y el zinc utilizado en el país es aprovechado en su mayoría para la industria del galvanizado solamente. En el segundo semestre del periodo 2019-2020 México registró una exportación de 314,448 toneladas de minerales de zinc y sus concentrados; si se compara esta cifra con la producción de este mineral en el país durante el mismo periodo de tiempo, 394,254 toneladas, se muestra que el 79.75% del concentrado generado en el país se destina a exportaciones, generando una problemática de aprovechamiento de este recurso en el interior del país. [22]

Se puede encontrar información más detallada de la producción del zinc en México en el Anexo 1, e información acerca de las exportaciones en el Anexo 2.

Esta situación ha generado que durante los últimos años se hayan intentado generar nuevas formas de aumentar su empleo en forma de metal o aleaciones, sobre todo en función de nuevos materiales que puedan sustituir al aluminio en la industria, ya que México no cuenta con una alta producción de aluminio en el territorio, por lo cual una gran porción de este es importada de otros países como lo son China, Brasil y los Estados Unidos de América.

Desde 1985 la UNAM, junto a otras entidades educativas ha generado esfuerzos de formar nuevas aleaciones de zinc, siendo el caso más conocido el Zinalco.

#### **4.2. JUSTIFICACIÓN**

El Zinalco es una aleación con propiedades mecánicas similares a las del aluminio y el latón, las cuales pueden mejorarse con la adición de refuerzos nano estructurales, para convertir así a esta aleación en una opción viable de uso en diversas industrias, como lo es el sector automotriz, donde específicamente se podría emplear en la fabricación de piezas complejas como los chasis de vehículos automotores, sin necesidad de requerir métodos de unión o soldadura gracias a la capacidad de las aleaciones de Zinc a formarse por inyección.

#### **4.3. HIPÓTESIS**

Es posible mejorar significativamente la resistencia a la tensión y la dureza de las aleaciones de Zinalco por medio de refuerzos con nano fibras de carbono, evaluando dos adiciones distintas.

## CAPITULO 5. OBJETIVOS

### 5.1 OBJETIVO GENERAL

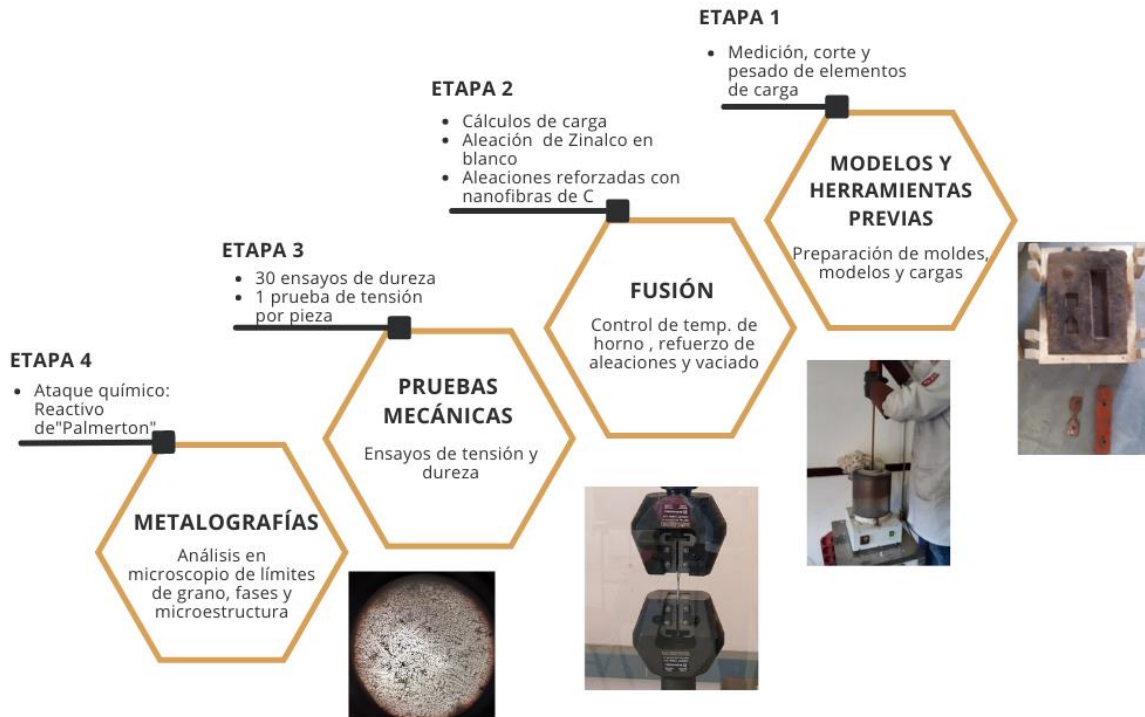
Fabricar aleaciones de Zinalco reforzadas con 0.1%t y 0.25% en masa de nano-fibras de carbono para mejorar las propiedades mecánicas de la aleación, y compáralas con aleaciones utilizadas en el sector de transporte y construcción.

### 5.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Fabricar una aleación de Zinalco con 76% de Zn, 22% de Al y 2% de Cu por método pirometalúrgico.
- Elaborar probetas para pruebas de resistencia a la tensión y dureza a base de aleaciones de Zinalco con 0.1% y 0.25% peso de nano-fibras de carbono.
- Analizar y comparar las propiedades mecánicas entre ambas piezas de Zinalco con adiciones de refuerzos y la pieza sin refuerzo.
- Realizar una comparativa entre las aleaciones de Zinalco reforzado frente a las aleaciones de aluminio de la serie 5XXX y 6XXX.

## CAPITULO 6. METODOLOGÍA

El procedimiento experimental que se llevó a cabo a lo largo del proyecto es mostrado en la figura 6.



*Figura 6. Diagrama del proceso*

### 6.1 MATERIALES UTILIZADOS DURANTE EL PROCESO

#### Material utilizado en fundición

- Horno de fusión eléctrico
- Crisol de óxido de magnesio
- Arena silíceo
- Caja de moldeo de arena
- Modelos de madera recubiertos con pintura anticorrosiva
- Herramientas de apisonado
- Herramientas para la formación de canales en el molde
- Polvo separador
- Materia prima de Zn, Al y Cu
- Nano-fibras de carbono
- Balanza
- Cuchara de agitación para el baño de la fundición

- Hélice motorizada de agitación para el baño de fundición
- Pirómetro digital

#### **Material utilizado en el acabado de piezas**

- Seguetas de corte para los canales de alimentación
- Herramienta de maquinado de piezas
- Lijas 80 y 200
- Limas finas para metal

#### **Material utilizado durante las pruebas mecánicas**

- Máquina de ensayos de tensión SHIMADZU FAL
- Medidor de dureza

#### **Material para las metalografías**

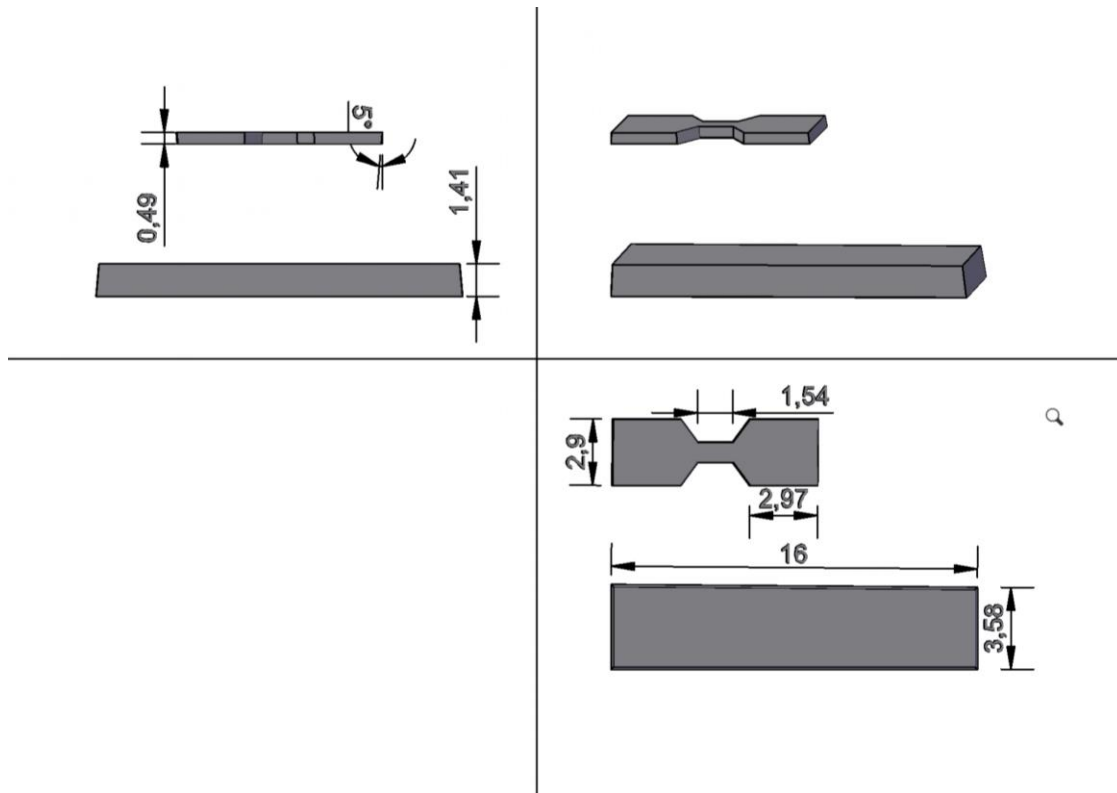
- Lijas 120, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 y 1500
- Reactivo de ataque químico Palmerton (16.8% óxido crómico, 1.2% sulfato de sodio, 82.3% agua)
- Alúmina de 2 micrómetros
- Microscopio óptico con aumentos de 50x, 100x y 400x
- Microscopio digital

## **6. 2 ETAPA 1: MODELOS Y HERRAMIENTAS PREVIAS**

### **6.2.1 MODELOS**

Antes de iniciar las fusiones fue necesario fabricar los modelos de las piezas que posteriormente serían vaciadas, por lo que se diseñaron dos piezas con madera de polín; una con forma rectangular para pruebas de dureza y otra con la forma universal para probetas de tensión, ambas con sus respectivos ángulos de salidas. La probeta de dureza se elaboró cortando con sierra eléctrica a las medidas exactas, contemplando 30° del lado superior de toda la pieza como ángulos de salida. Posteriormente se lijó la superficie para unificarla y se selló con dos capas de barniz para madera; finalmente se insertaron sobre la base inferior de la pieza dos piezas simétricamente separadas con la finalidad de facilitar el desmolde posterior de la pieza. De igual forma, se elaboró la probeta de resistencia a la tensión, llevando a cabo el mismo sellado de la pieza anterior.





*Figura 7. Diseño de modelos para fundición*

### 6.2.2 CORTE Y PESADO DE MATERIALES DE CARGA

Para las cargas de cada fusión de Zinalco se requirieron de entre 1.8 Kg a 2.2 Kg con la relación del 2% cobre, 22% aluminio y 76% zinc, por lo que se cortaron a partir de los lingotes de Al, piezas de +/- 330 g con sierra eléctrica, bloques de cobre de +/-30 g y +/- 1140 g de Zinc.

Este proceso se llevó a cabo dos veces para fabricar la aleación en blanco de Zinalco. Las cargas por fusión fueron las siguientes.

*Tabla 5. Peso de carga obtenido para cada fusión reforzada*

Cargas Por Fusión Nº1 (g)	Cargas Por Fusión Nº2 (g)
671	726
745	743
642	670

## 6.3 ETAPA 2: FUSIÓN

### 6.3.1 CÁLCULOS DE CARGA

Se utilizaron las mismas relaciones porcentuales de carga que las empleadas para la fabricación de la aleación de Zinalco, siendo el Zn la matriz, posteriormente el Al y finalmente el Cu.

Según la tabla 5 y los pesos obtenidos para cada fusión se obtiene la relación de 0.1% wt y 0.25% wt de nano fibras de carbono que deben ser agregados a cada fusión. Por ejemplo; en el caso de la primera fusión de 671 g que será reforzada con 0.1% de nano fibras de carbono, se deben adicionar 0.671 g para reforzar la aleación. De esta forma se realizaron todos los cálculos previos a las fusiones.

### 6.3.2 ALEACIÓN DE ZINALCO

Previo a realizar las aleaciones reforzadas se prepararon las aleaciones de Zinalco en blanco, en las cuales se buscó obtener una carga de crisol de +/-70% de su capacidad. En este proceso se utilizó un horno de crisol de carburo de silicio que fue precalentado a 350°C durante 15 min y se elevó progresivamente la temperatura; primero fue cargado el zinc al llegar la temperatura a 450°C debido a que es la matriz de la aleación, posteriormente se agrega el aluminio a una temperatura de 550°C, al ser el segundo componente en mayor cantidad, finalmente se cargó el cobre a 580°C, temperatura a la cual los elementos ya se habrían fundido. Es importante destacar que se mantuvo la carga hasta 650°C para permitir su correcta homogenización, además de su desgasificación con madera, dando vueltas al baño fundido antes de retirar la escoria y ser vaciado sobre las lingoteras. Se obtuvieron 8 ½ lingotes de cada fusión.

### 6.3.3 ALEACIONES DE ZINALCO REFORZADAS CON 0.1% WT Y 0.25% WT

Antes de dar inicio, para cada una de las fusiones se precalentó el horno a 350°C, dando un lapso de 30 minutos previos a introducir la carga.

Mientras tanto, el equipo se dedicó a la elaboración del molde con arena sílice, comenzando por el cribado de la arena con un tamiz de 3 mm de apertura y de 1 mm para la arena de careo. Una vez formado cada montículo, se procedió a hidratar con la técnica del caracol repitiendo el proceso alrededor de 6 veces, según lo requiriera la arena. Se eligió una caja de moldeo acorde al tamaño de los modelos, de tal manera que se ajustaran ambas piezas en un solo molde y se desperdiciara la menor cantidad de material como fuera posible. Se comenzó la compactación de la primera capa de arena cribada dentro de la caja, apisonando lo mejor posible y agregando capa tras capa hasta llegar a la superficie de la caja sobre la cual se colocó arena de careo únicamente en la superficie y se rasparon los bordes sobresalientes, además de marcarse ligeramente las guías para las piezas, corredores y la línea de alimentación. En la caja negativa se colocaron las piezas y sobre ellas polvo separador y arena de careo lo más ajustada posible en los bordes para evitar perder las formas delicadas, el resto de la caja fue compactada con arena cribada normal y finalmente se retiraron las piezas delicadamente (por medio de las pijas colocadas anteriormente) por el extremo contrario de la caja, se perfeccionaron los corredores y alimentadores antes de sellar por completo la caja y colocarla en su lugar de vaciado.

Al transcurrir el tiempo de precalentamiento en el horno, se cargaron de entre 600 g a 700 g de Zinalco en lingotes por fusión y se les dio un tiempo de 20 minutos de fusión antes de elevar la temperatura a 650°C; esta última sería la temperatura de vaciado final, sin embargo, cabe resaltar que, con la finalidad de evitar pérdidas de calor al adicionar el refuerzo de nano fibras, se requirió un sobrecalentamiento de +40°C, alcanzando los 690°C.

### 6.3.4 ADICIÓN DE NANOFIBRAS DE CARBONO

El horno se destapó y se introdujeron en 3 porciones las nano fibras (dentro de una laminilla de papel aluminio para mayor velocidad de adición), entre cada porción se homogeneizaron las fibras por medio de una hélice giratoria energizada por un taladro, todo ello procurando tardar el menor tiempo posible (entre 2 a 3 minutos en

total) para evitar pérdidas por volatilización o en gases, e inmediatamente escoriificar y vaciar el metal en su molde.

Este procedimiento fue el utilizado para las seis fusiones de aleación reforzada (tres aleaciones reforzadas con 0.1% wt y tres reforzadas con 0.25% wt nano fibras de carbono).

## 6.4 ETAPA 3: PRUEBAS MECÁNICAS

### 6.4.1 ENSAYO DE TENSIÓN

Las pruebas de tensión fueron realizadas en una máquina universal digital enlazada a un software de control, donde inicialmente se introdujeron las medidas de longitud, espesor y grosor de cada pieza (tabla 6); así como su respectiva denominación (A, B, C, X, Y, Z, Blanco) y el orden el cual serían realizadas las pruebas, así como parámetros específicos tal como un esfuerzo aplicado de 40 N/mm y la velocidad de aplicación de carga, ajustada a 0.5 mm/s.

*Tabla 6. Medidas de las probetas antes del ensayo*

Probeta	Espesor (mm)	Anchura (mm)	Longitud calibrada (mm)
A	4.11	7.27	11.6
B	4.4	7.76	15.3
C	4.36	7.63	12.77
X	4.53	8.1	14.8
Y	4.33	7.61	13.78
Z	4.57	8.23	14.8
BLANCO	4.7	7.87	13.78

Con los ajustes pertinentes, se procedió a colocar pieza por pieza entre las mordazas de la máquina procurando sujetarse en el punto concéntrico de la pieza para resultados más certeros. Posteriormente se aplicó la función “tarar” para que se ubicara la posición en la que se encontraba el punto de partida; una vez

preparada la maquina se inició la prueba y con un avance de 50 milisegundos, se demoró alrededor de 3 minutos para llegar al punto de fractura; este procedimiento se realizó con las siete piezas.



*Figura 8. Máquina de ensayos universal para ensayos de tensión*

#### **6.4.2 ENSAYO DE DUREZA**

Para la realización este ensayo fue necesario maquinar las piezas con la finalidad de obtener una superficie uniforme y obtener resultados más certeros; una vez realizados se procedió a realizar 30 pruebas de dureza Brinell electrónico portátil con un indentador de carburo de tungsteno en forma de balón, descartando los valores tomados sobre protuberancias o uniformidades y finalmente se registraron los datos obtenidos.

## 6.5 ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN

### 6.5.1 METALOGRAFÍAS

Para esta etapa se obtuvieron pequeñas probetas rectangulares como se observa en las figuras 9.1 y 9.2, las cuales se obtuvieron cortando un extremo de cada una de las piezas de dureza, obteniéndose siete en total. Las probetas lijadas con lija de agua desde el número 220 hasta 1500 como se observa en la figura 10; lavándose y cambiando de lado al pasar de una lija a otra, posteriormente se pulieron con ayuda de una pulidora automática (figura 11), utilizando agua y pasta de alúmina para acelerar el proceso y evitar oxidaciones.



*Figuras 9.1, 9.2. Probetas metalográficas*



*Figura 10. Preparación de probetas metalográficas*



*Figura 11. Pulido de probetas metalográficas*



Para el ataque químico de las piezas, se prepararon 50 mL de reactivo de “Palmerton” (composición en el Anexo 4). Por medio de una pipeta se colocaron alrededor de 3 mL de reactivo sobre un vidrio de reloj, para facilitar el contacto con la pieza.

La cara pulida es observada al microscopio antes de ser atacada para analizar comparativas; una vez observada, se atacó por sólo 5 segundos para después lavarse con abundante agua a presión y secada con alcohol y aire para evitar contaminaciones; finalmente se analizaron los límites de grano, cambios de fase y ubicación del carbono con lentes de entre 50,100 y 400 aumentos.

## CAPITULO 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1 ENSAYOS DE TENSIÓN

Se realizaron dos tipos de análisis, uno superficial para observar el tipo la fractura y posibles acumuladores de esfuerzos y uno microestructural para analizar las características mecánicas de las piezas.

#### 7.1.1 ANALISIS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Hablando en términos de esfuerzo soportado por las piezas, es evidente en los resultados que las piezas “A”, “B” y “C” (con refuerzo de 0.1%wt de nano fibras de C) tienen mayor resistencia con un valor promedio de las tres pruebas de 332.311 N/mm<sup>2</sup>, en contraste a las piezas “X”, “Y” y “Z” (las piezas con un refuerzo de 0.25%wt de nano fibras de C) con un esfuerzo promedio de 204.797 N/mm<sup>2</sup>.

De igual forma, la aleación con un añadido de refuerzos de 0.25% mostro una mayor resistencia a la tensión que la obtenida en la muestra sin ningún refuerzo añadido, la cual tuvo un valor de 222.617 N/mm<sup>2</sup>. Mientras que en las probetas con 0.25% de refuerzo, solo una obtuvo una resistencia mayor con respecto a la probeta sin ningún refuerzo.

*Tabla 7. Resultados de prueba de tensión*

Probeta	Max. Deformación (%)		Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	
	Individual	Promedio	Individual	Promedio
A	16.719		313.758	
B	16.2838	17.50	339.600	332.311
C	19.4832		343.576	
X	9.5098		168.176	
Y	22.9971	15.88	275.264	204.797
Z	15.1284		170.952	
BLANCO	23.3164		222.617	

Para tener una mejor percepción del efecto de las nano-fibras en el material se creó la tabla 8, la cual compara los valores promedios y máximos de resistencia a la tensión de las aleaciones con 0.1% y 0.25% de refuerzo con respecto al valor obtenido en la aleación sin ningún refuerzo proporcionado.

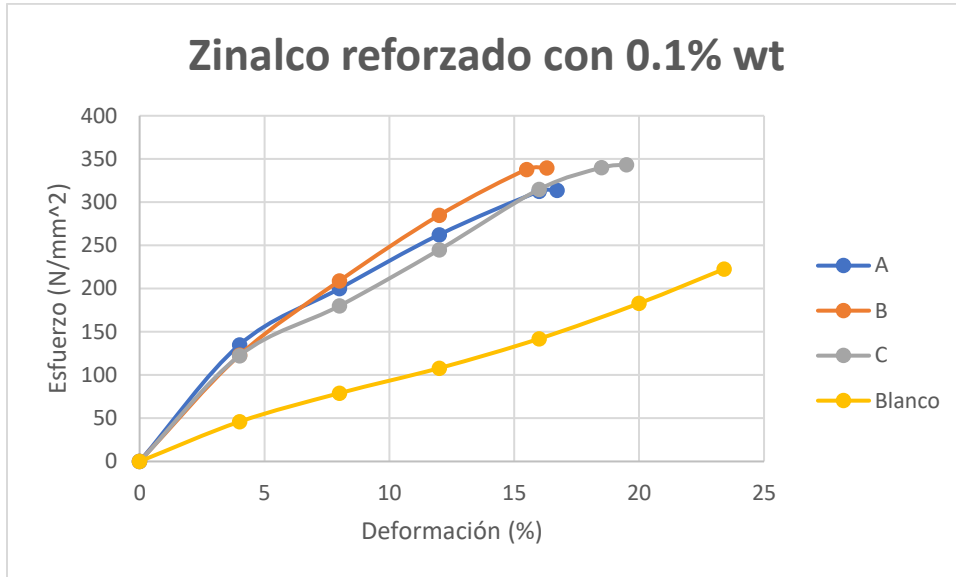
*Tabla 8. Resultados de prueba de tensión*

<b>% de refuerzo</b>	<b>Aumento de resistencia respecto al promedio</b>	<b>Aumento de resistencia respecto al máximo</b>
<b>0.1</b>	49.27%	54.33%
<b>0.25</b>	-8%	23.65%

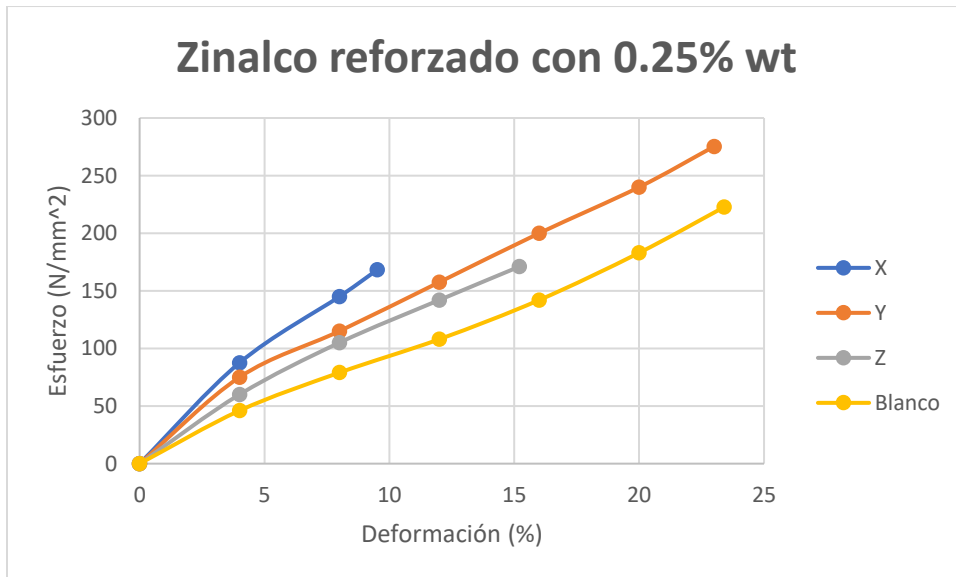
Como se puede observar en la tabla anterior, el aumento en la resistencia con una adición de 0.1% de nano-fibras como refuerzo tuvo el mayor impacto en la resistencia a la tensión, teniendo un aumento de hasta un 54% en este valor.

Para un análisis más detallado, se realizan gráficas de esfuerzo-deformación de las piezas de Zinalco reforzado con 0.1%wt vs el Zinalco en blanco, donde se observa que tanto la pieza A, B, C experimenta un menor porcentaje de elongación en la pieza, pero con el aumento significativo de resistencia.

Las curvas observadas en la ilustración 10 nos muestran que existe una repetibilidad en proceso, puesto que en las tres ocasiones se obtuvieron resultados similares, siendo que en todas se mostró el aumento de resistencia con respecto al Zinalco blanco por al menos 49%.



**Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación de Zinalco reforzado con 0.1 % wt vs blanco de Zinalco**



**Figura 13. Curvas esfuerzo-deformación de Zinalco reforzado con 0.25 % wt vs blanco de Zinalco**

### 7.1.2 ANÁLISIS DE FRACTURA

Al deformarse las probetas de tensión observamos una elongación de hasta un 23.3% en la aleación de Zinalco en blanco y en orden descendente los refuerzos de 0.25 y 0.1.

*Tabla 9. Porcentaje de deformación promedio en probetas*

% Refuerzo	% Deformación (promedio)
0.1	17.495
0.25	15.878
blanco	23.3164

Las altas deformaciones favorecen la fractura frágil debido a que se producen a lo largo de planos de fractura y tienen una rápida propagación de grieta; lo que nos indica que el blanco es más susceptible a ser una pieza frágil soportando menor tensión aplicada, sin embargo, una alta deformación también indicaría una mejor resistencia en situaciones de impacto que requiriesen una gran elongación, todo dependerá del uso para el que se requiera el material.



*Figura 14. Fractura frágil de probeta reforzada*

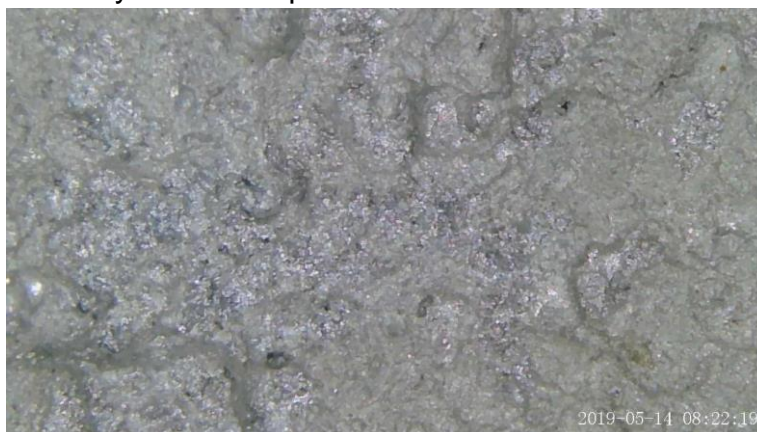
Las probetas presentan una fractura frágil con superficie irregular astillada como se observa en la figura 14. La falta de simetría puede ser causada por la heterogeneidad del material o un defecto, tal como la segregación, una burbuja, o una inclusión sin embargo en este caso se toma en cuenta la posibilidad de que en algunas secciones la difusión de las nano fibras no se llevó a cabo en su totalidad,

formando clústeres no enlazados a la matriz que, al realizar el ensayo se comportan como una inclusión generando acumuladores de esfuerzos, propiciando la propagación de grietas prematuras, como se observa en la figura 15.



***Figura 15. Clúster de nano fibras en probeta B 0.1%***

A pesar de presentarse un punto de esfuerzos acumulados en una pieza, se trata de un caso aislado, ya que en el resto de las superficies se observan los granos de carbono por fuera de las grietas, lo que nos indica que con el procedimiento experimental llevado a cabo en este trabajo, la formación de clústers es mínima y la difusión de las nano fibras en la matriz metálica fue llevada a cabo hasta cierto punto, correctamente, como puede observarse en la figura 16, siendo la más representativa a la mayoría de las piezas.



***Figura 16. Superficie fracturada de probeta X con 0.25% wt***



## 7.2 ENSAYOS DE DUREZA

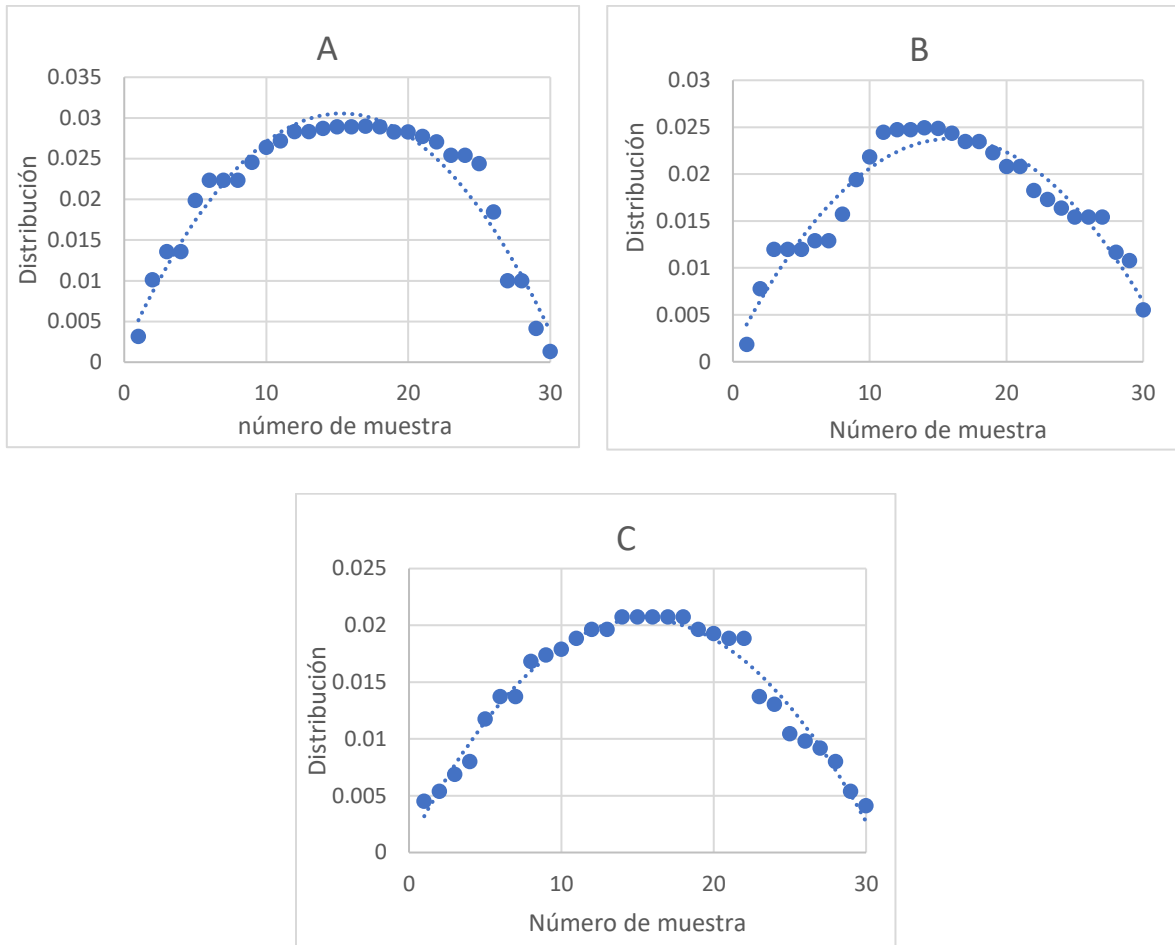
En la siguiente tabla se analizan las medidas de tendencia central, observando que los valores predominantes de dureza se encuentran por encima del valor obtenido en la pieza de Zinalco en blanco, indicando que la adición de refuerzos nanoestructurales efectivamente ayuda a incrementar la dureza en aleaciones de Zinalco.

*Tabla 10. Resultados analíticos prueba de dureza*

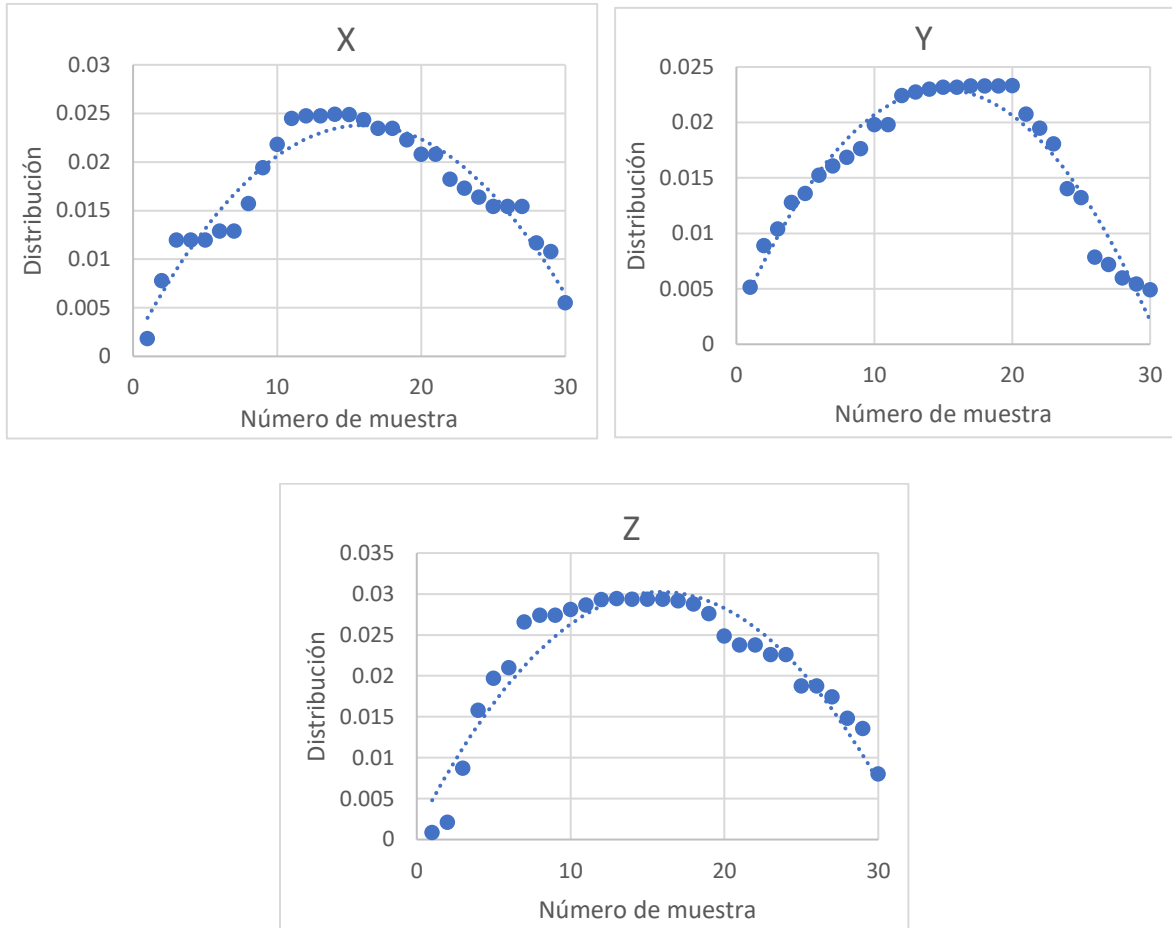
Probeta	Dureza HB (prom.)	Mediana HB	Desviación estándar	Distribución (prom)	Curtosis
<b>A</b>	82.9	82	13.75633605	0.00896485	0.602365165
<b>B</b>	85.3	88	15.9380986	0.00754315	0.786740419
<b>C</b>	85.5	85.5	19.17568503	0.00785003	-0.86939779
<b>X</b>	90.2	89	15.9380986	0.00847738	-0.67893922
<b>Y</b>	91.8	90	17.03360438	0.00784425	-0.83041470
<b>Z</b>	86.3	87	14.62437738	0.00825419	-0.68325478
<b>BLANCO</b>	85.4	87.5	13.23683471	0.00887886	-0.9711536

En las curvas de variabilidad se muestra la dispersión de los datos en la escala de medición respecto al número de muestra tomada. La distribución en los datos fue, en todos los casos un valor cercano a cero (tabla 10) por lo que podemos decir que existe simetría en las curvas y por ende el número de pruebas tomadas arrojó un resultado muy certero.

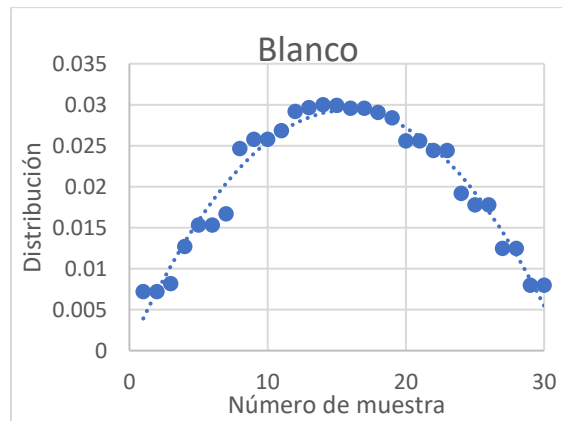
La curtosis positiva quiere decir que la distribución es más elevada, mientras que la curtosis negativa indica que la curva es más plana; en este caso se obtuvieron valores positivos y negativos, con una dispersión es baja, es decir, todos los valores se encuentran rodeando al cero, sin llegar a la unidad por lo que podemos aseverar que se trata de “curvas normales”



**Figura 17(a)(b)(c). Curvas de distribución de Zinalco reforzado con 0.1%wt de nano fibras de carbono**



**Figura 18. (X)(Y)(Z). Curvas de distribución de Zinalco reforzado con 0.25%wt de nano fibras de carbono**



**Figura 19. Curva de distribución de Zinalco en blanco**

La desviación estándar de estas piezas mostro un espectro con una amplitud considerable, lo cual se puede deber a diversos factores que pueden ir desde los errores humanos al realizar la medición de la dureza de las piezas, los defectos existentes en la pieza como microporosidades, rechupes o inclusiones del molde, y una posición heterogénea del refuerzo añadido a las aleaciones.

Aún con los diversos factores que surgieron a la hora de realizar la medición, se puede observar que la mayoría de las mediciones de dureza están cercanas a la parte media de la distribución normal, ya que estas gráficas muestran curvas centradas en la mayoría de los casos, lo cual informa de un promedio confiable obtenido de esas piezas.

### 7.3 COMPARACIÓN CON OTRAS ALEACIONES

Tomando en cuenta valores de resistencia a la tensión y densidad de la aleación de Zinalco con 0.1% de refuerzo, y comparando sus propiedades con aleaciones de aluminio estructural como los presentes en la serie 6XXX y aluminios usados para transporte como los presentes en las aleaciones 5XXX, se puede analizar la viabilidad de esta aleación como un sustituto de esta en este campo. En la siguiente tabla se muestra una comparación entre estas aleaciones.

*Tabla 11. Comparación de la aleación de Zinalco reforzado con aluminios de la serie 6XXX y 5XXX [23] [24] [25].*

<b>Aleación</b>	<b>Resistencia a la tensión MPa</b>	<b>Elongación %</b>	<b>Dureza HB</b>	<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Zinalco 0.1% refuerzo</b>	332	17.5	84.6	5.40
<b>Al 6061-T4</b>	235	21	65	2.70
<b>Al 6061-T6</b>	310	14	95	2.70
<b>Al 6082-T4</b>	205	19	70	2.71
<b>Al 6082-T6</b>	340	11	95	2.71
<b>Al 5052 H32</b>	228	12	61	2.68
<b>Al 5052 H34</b>	262	10	68	2.68
<b>Al 5086 O</b>	290	12	78	2.66

Como se puede observar en la tabla 10, la aleación de Zinalco reforzado con 0.1% de nano-fibras de carbono posee una elevada resistencia a la tensión combinada

con una buena elongación y una alta dureza, esto en comparación con aleaciones de aluminio utilizadas comúnmente en el área de la construcción y del transporte. Estos datos muestran que la aleación fabricada puede competir con estas aleaciones en diversas aplicaciones, ya que, según bibliografía [3], de igual manera cuenta con una elevada resistencia a la corrosión que le permiten incluirse en las áreas en las cuales estas aleaciones de aluminio radican.

Aunque una desventaja de esta aleación es su mayor densidad, aproximadamente 2 veces superior a la de estas aleaciones, por lo cual es poco factible que esta aleación vaya a ser usadas en industrias dónde el peso sea un factor sumamente importante, como lo es la industria aeroespacial.

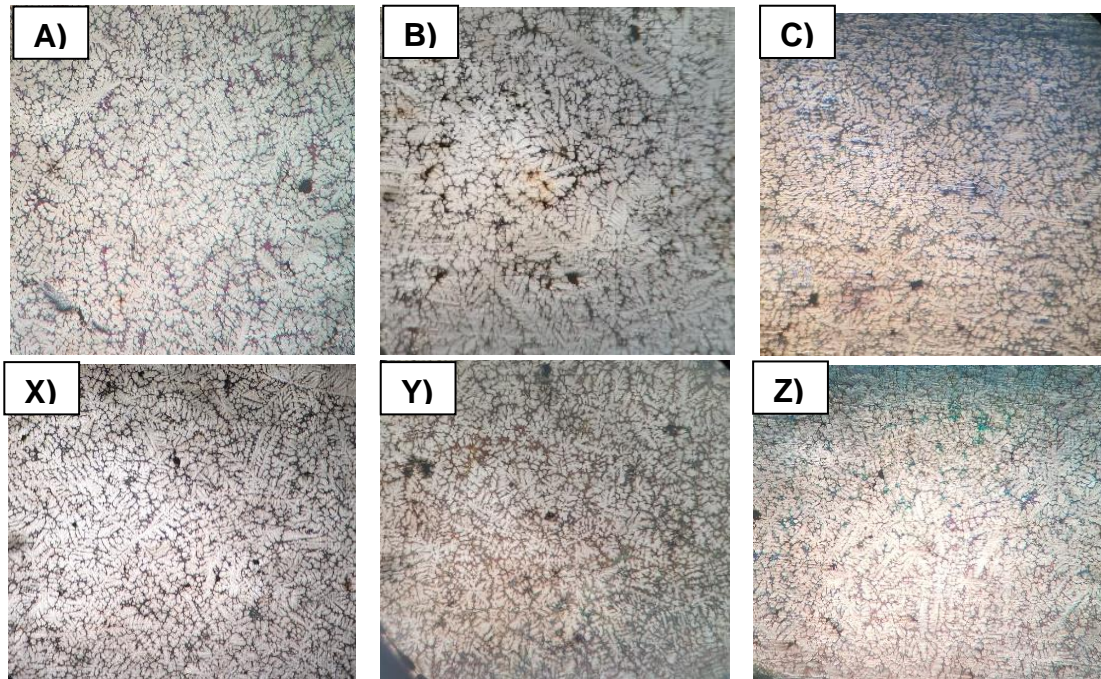
El costo de esta aleación respecto a las demás aleaciones de aluminio no fue calculado, debido a que este trabajo se enfoca en las propiedades mecánicas de esta aleación y el aprovechamiento del zinc en México, aparte de que no se podría estimar correctamente los costos de producir esta aleación es masa, ya que como ventaja tendría un menor punto de fusión, y por lo tanto un menor coste energético al fabricar piezas; y como desventaja tendría la implementación de las nano-fibras de carbono, que aunque sea un porcentaje muy bajo, puede influir significativamente en el precio final de esta aleación.

## 7.4 ANÁLISIS METALOGRAFICOS

Para analizar la estructura interna del Zinalco se usan técnicas de caracterización metalográfica, por medio de un microscopio estereoscópico y un ataque químico con reactivo de Palmerton (reactivo utilizado para revelar estructuras de zinc) comparando así el efecto de la adición de 0.1% y 0.25% de nano-fibras en la estructura con respecto al Zinalco sin refuerzo.

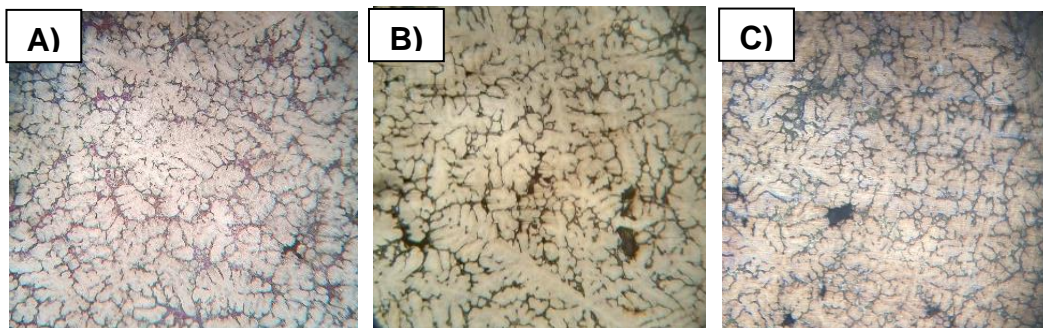
En la figura 20 se observa el crecimiento dendrítico natural de los granos, sin necesidad de usar como puntos de nucleación las aglomeraciones de nano fibras acumuladas, por el contrario, los clústers de refuerzo están concentrados entre los brazos dendríticos quedando aislados de la estructura, lo cual nos indica una difusión incompleta y generando posibles zonas de debilidad estructural.



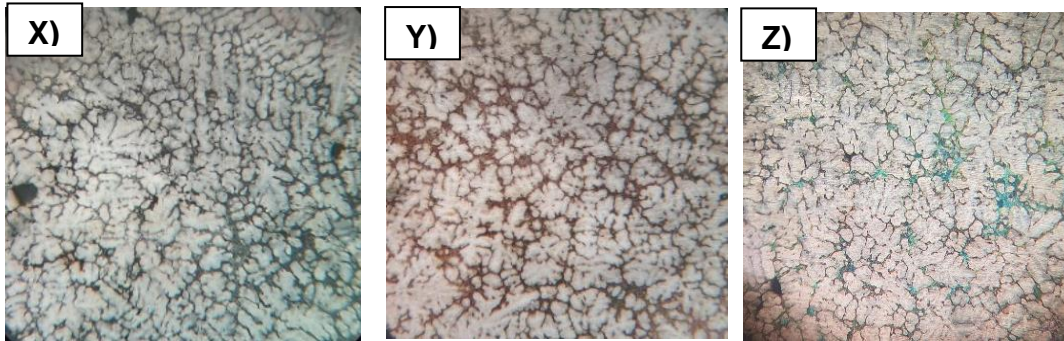


*Figura 20. Micrografías a 50X en microscopio tras ataque químico*

En la figura 21 se observa el espacio intergranular de la estructura, donde se observan tonalidades más oscuras que las dendritas, lo que nos indica que las nano fibras de carbono se encuentran alojadas intergranular mente e Inter dendríticamente, evitando así dislocaciones en la matriz, mejorando sus propiedades mecánicas.

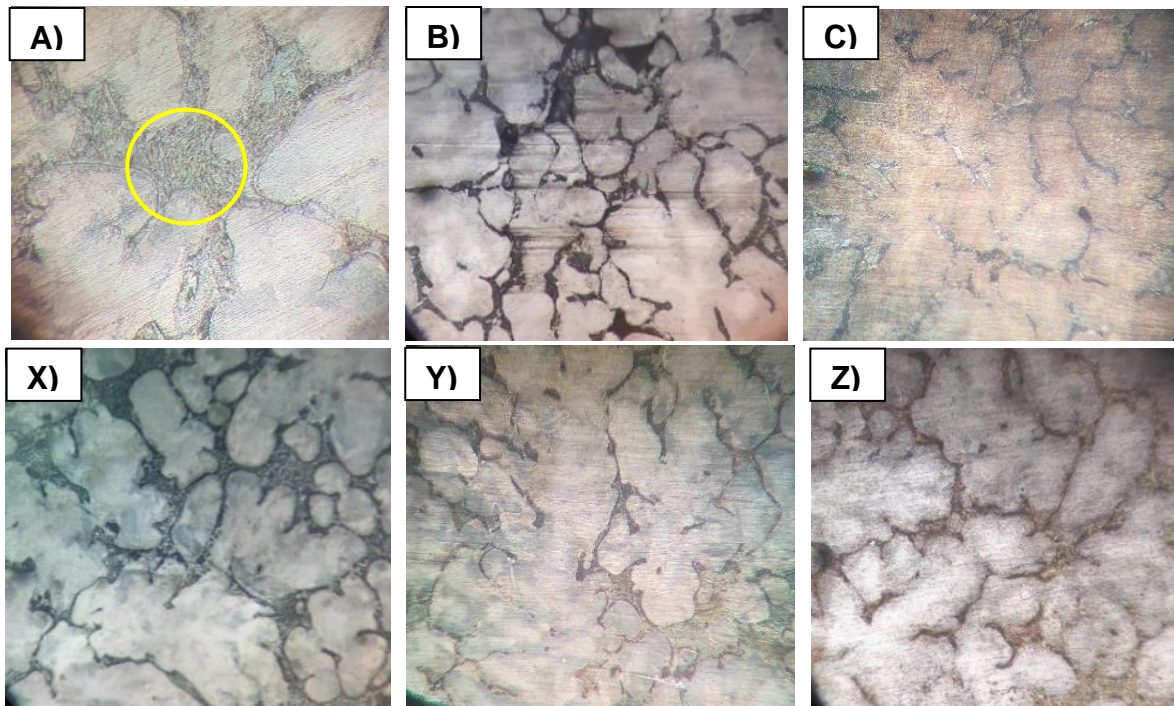






*Figura 21. Micrografías a 100X en microscopio tras ataque químico*

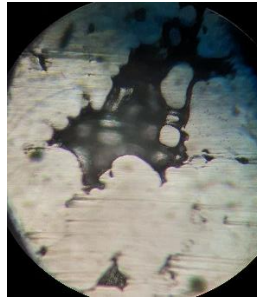
A un aumento superior de hasta 400X como lo muestra la figura 22, es posible observar ligeramente las fases presentes en las aleaciones, tanto en las aleaciones reforzadas de 0.1% y 0.25% como en el blanco no existen variaciones de fase, en los tres casos se aprecia una estructura perlítica bien definida, identificada por su característica forma rayada, observada en la figura 22 A) señalada.



*Figura 22. Micrografías a 400X tras ataque químico*

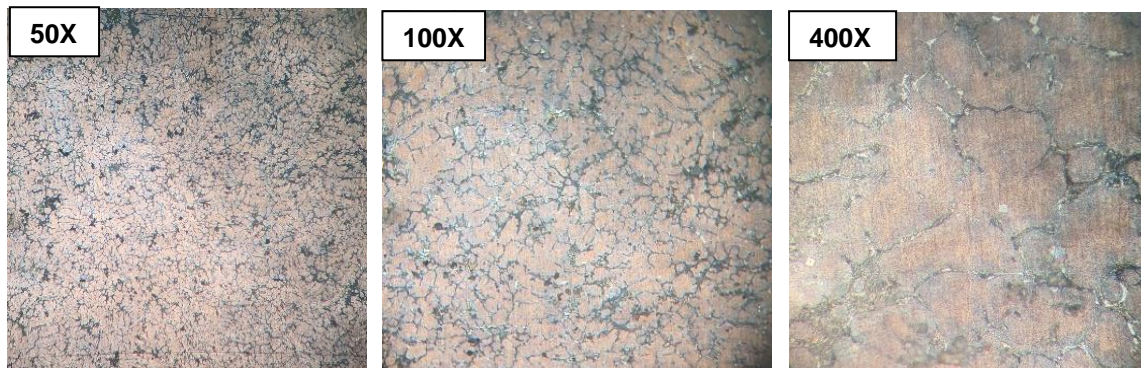
En la siguiente imagen se presenta un acercamiento de micrografía a 400x donde se muestra un clúster de las nano-fibras de carbono, el cual cuenta con una forma irregular, que da paso a abarcar mayor área superficial, por lo que existe mayor contacto con la matriz metálica.





*Figura 23. Acercamiento de clúster de nano-fibras de carbono a 400x*

Como comparativa entre los refuerzos se presentan micrografías de los mismos aumentos de una probeta con la aleación de Zinalco en blanco donde no existen clústers de nano fibras interfiriendo en la estructura, sin embargo, también se observa que el espacio intergranular es de menor tamaño en comparación a las del refuerzo.



*Figura 24. Micrografías comparativas a distintos aumentos de aleación de Zinalco en blanco*

Como se logra apreciar en las figuras, el tamaño de grano de las diferentes piezas tuvo una variación ligera entre las piezas con .01% de refuerzos y 0.25% de refuerzos, lo cual afecta a las propiedades mecánicas de las piezas.

En las piezas con 0.1% de refuerzo, se logó ver a 400x aumentos que tienen un tamaño de grano superior a la de las piezas con 0.25% de refuerzo, y un tamaño de grano similar a la de la pieza sin refuerzo.

Lo más notorio de estas metalografías, es que se logra apreciar que en las piezas con 0.25% de refuerzo muestran un espacio intergranular superior a la de las piezas con 0.1% de refuerzo, este espacio está formado principalmente por precipitados

de cobre y principalmente por las nano-fibras de carbono. Esto puede dar un indicio del porque las aleaciones con mayor porcentaje de refuerzo obtuvieron una menor resistencia mecánica, lo que se pudo deber a un espacio excesivo entre cada grano que afectó negativamente el desplazamiento de la red al deformarse. Al impedir el desplazamiento de los granos durante la deformación, se crean puntos de tensión en la pieza que conllevan a la ruptura temprana del material.

## CAPITULO 8. CONCLUSIONES

- Es posible fabricar una aleación de Zinalco con 76% de zinc, 22% de aluminio y 2% de cobre por un medio pirometalúrgico de manera exitosa, capaz de ser utilizada como matriz metálica base para la formación de un material compuesto.
- Se mostro que las piezas fabricadas con una adición de 0.1% y 0.25% de refuerzo tienen un efecto significativo en las aleaciones de Zinalco, siendo el porcentaje de 0.1 de refuerzo el que mostró un beneficio mayor hacia las piezas con un aumento en la resistencia a la tensión de 49.27%, manteniendo una buena deformación máxima con respecto a diversas aleaciones de aluminio utilizadas en la industria actualmente.
- La adición de 0.25% de refuerzos muestra un comportamiento negativo a la aleación de Zinalco, siendo que este redujo su resistencia a la tensión y su deformación máxima; dicho comportamiento a consecuencia del ensanchamiento del espacio intergranular en la aleación, que no permite el desplazamiento de los granos fluidamente, aunque se deben de seguir realizando experimentos para tener un panorama completo de las causas.
- Las propiedades mecánicas obtenidas de la aleación de Zinalco reforzado con 0.1% de nano fibras de carbono muestran la capacidad de ser utilizadas en la industria en sustitución de aluminios de la serie 5XXX y 6XXX, gracias a sus características semejantes, y superiores en algunos de los casos.
- Las nano fibras de carbono quedan incrustadas tanto en el espacio intergranular en la microestructura del Zinalco dando un enlace fuerte entre la matriz y el refuerzo; sin embargo, de no existir una correcta difusión, las nano fibras se presentan en forma de clústers irregulares que provocan zonas de debilidad.

## CAPITULO 9. RECOMENDACIONES

Gracias a los datos obtenidos a lo largo de este proyecto, es posible plantear algunas sugerencias para apoyar a investigaciones futuras e incrementar la eficiencia de las aleaciones de Zinalco reforzadas

- El porcentaje de adición de refuerzo eficiente se encuentra por debajo del 0.25% peso para evitar perjudicar las propiedades mecánicas de la aleación.
- Es posible realizar un estudio económico a profundidad del uso del Zinalco reforzado, así como realizar comparativas de costos con diversos materiales del sector para realizar un análisis de viabilidad para las industrias.
- La porosidad y microporosidad es un factor que fácilmente puede confundir los resultados o incluso llegar a afectarlos si el gas llega a expulsar los refuerzos adicionados por lo que la fusión y el vaciado deben ser limpios y de alta calidad para obtener más confiables.
- Puede obtenerse mayor fiabilidad en las aleaciones reforzadas extendiendo los estudios de propiedades como podrían ser análisis químicos, pruebas de corrosión, ensayos de compresión, etc. Dando amplitud en las aplicaciones y abriendo puertas hacia la industria
- La difusión de las nano fibras en el metal líquido es probablemente uno de los puntos de mayor impacto en el procedimiento por lo que es posible experimentar con diversos métodos de adición y homogeneización.

## CAPITULO 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. P. Arturo, Experiencias propuestas para el uso del zinc y sus aleaciones como recurso Sdidáctico, México, D.F.: XVII Congreso internacional anual de la SOMIM, 2011.
- [2] GLENCORE Austriana de Zinc, Principales aplicaciones del Zinc, 2017.
- [3] A. d. a. romo, Conformabilidad de uniones zinalco-aluminio obtenidas por laminado conjunto, México, D.F.: Universidad Autonoma de México, 1995.
- [4] G. G. P. Pérez\*, «Comportamiento mecánico de la aleación AZ31 reforzada con nanofibras de carbono,» *Revista de Metalurgia*, vol. 46, pp. 7-12, 2010.
- [5] O. M. T. Gaucin, Fabricación de zinalco reforzado con nanofibras de carbono, Zacatecas: IPN, 2021.
- [6] J. N. G. Torres Villaseñor, «Propiedades y usos del zinalco,» *Revista Mexicana de Físcia*, vol. 31, nº 3, pp. 489-501, 1985.
- [7] M. G. T. Merla, Modificación superficial por plasma de nanotubos de carbon y nanofibras utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos, Saltillo, Coahuila: CEentro de investigación en química aplicada, 2006.
- [8] B. A. Jennifer, Obtención de espumas de Zinalco mediante la adición de carbonato de calcio como agente espumante, Ciudad de México: ESQUIE IPN, 2018.
- [9] ASM International HANdbook Commitee, «Materials Selection and Design,» de *Volume 20*, 1997, pp. 941-947.
- [10] Knovel, *Knovel Sampler, Periodic table of the elements*, Elsevier, 2022.
- [11] International Zinc Associatoin, *Zinc... un material sostenible*, 2010.
- [12] I. I. J. C. F. Aguilar, Mejoramiento de las propiedades mecánicas del estuche de latón 70/30 empleado en cartuchería militar.
- [13] R. L. Mott, *Machine Elements in Mechanical Design*, Ohio: PEARSON Prentice Hall, 2004.
- [14] C. R. Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*, Catalunya: EDICIONS UPC, 2008.
- [15] R. N. Lumley, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Woodhead Publishing, 2018.
- [16] Allied metal company, *Za casting alloys*, Chicago, 2004.

- [17] O. E. O. d. Jesus, Obtención y propiedades de espumas metálicas base Zinalco, México, D.F.: ESIME, IPN, 2008.
- [18] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Zinc, January 2020.
- [19] Bnamericas, «Bajo la lupa: los proyectos de zinc más grandes de México,» 07 Julio 2021.
- [20] GeolInfoMex 2D, *Minas de Zinc*, Gobierno de México, 2022.
- [21] GeolInfoMex 2D, *Minas de zinc y otros elementos*, Gobierno de México, 2022.
- [22] Servicio Geológico Mexicano, *Anuario estadístico de la minería mexicana*, Secretaría de economía, 2020.
- [23] Alacer mas, 6061-(aluminio-magnesio-silicio), Barcelona, 2018.
- [24] Alacer mas, 6082-(aluminio-magnesio-silicio), Barcelona, 2018.
- [25] GABRIAN INTERNATIONAL (H.K.) LTD, 5052 Aluminium Alloy Properties, 2016.

## CAPITULO 11. ANEXOS

### ANEXO 1. Producción del Zinc en México

#### 32.- Zinc A.- Producción en Volumen y Valor, por Presentación, 2019-2020 I/ (Toneladas y pesos corrientes)

Forma de Presentación	2019		2020 p/	
	Toneladas	Pesos	Toneladas	Pesos
<b>Total:</b>	<b>325,276.00</b>	<b>16,006,928,602.75</b>	<b>394,254.00</b>	<b>19,166,193,400.00</b>
Mineral	325,276.00		394,254.00	

p/ Cifras preliminares.  
I/ En contenido metálico.  
Fuente: Dirección de Control Documental e Indicadores Estratégicos; Secretaría de Economía, S. E. e Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI.

#### B.- Producción en Volumen por Entidad Federativa y Municipio, 2019-2020 (Toneladas)

Estados y Municipios	2019	2020 p/
	Toneladas	Toneladas
<b>Total:</b>	<b>859,193.57</b>	<b>1,008,252.25</b>
<b>Agascalientes</b>	<b>21,217.71</b>	<b>14,249.00</b>
Asientos	21,217.71	14,249.00
<b>Baja California Sur</b>	<b>12,580.84</b>	<b>1,520.00</b>
Mulegé	12,580.84	1,520.00
<b>Chihuahua</b>	<b>130,014.37</b>	<b>121,834.88</b>
Aldama	-	-
Aquiles Serdán	12,351.85	478.00
Ascensión	25,186.26	15,409.28
Cuahuahua	582.48	73.26
Guadalupe y Calvo	30,133.55	26,563.99
Hidalgo del Parral	2,841.50	-
Manuel Benavides	732.71	1,084.78
San Francisco del Oro	4,639.37	5,772.00
Santa Bárbara	42,252.54	47,336.15
Satevó	9,798.10	24,820.00
Urique	1,496.00	297.42
<b>Coahuila</b>	<b>-</b>	<b>30,382.00</b>
Cuatro Ciénegas	-	382.00
<b>Durango</b>	<b>111,005.68</b>	<b>127,135.75</b>
Cuencamé	82,818.41	86,105.75
Guadalupe Victoria	61.10	261.11
Guanaceví	-	2,024.62
Mapimí	8,623.31	7,682.06
Nombre de Dios	1.53	-
Santiago Papasquiaro	15,038.59	9,262.52
Tepehuanes	1,160.87	85.61
Topia	3,301.87	21,587.44
<b>Guerrero</b>	<b>12,461.82</b>	<b>33,648.69</b>
Arcelia	12,231.84	17,236.26
Tetipac	229.98	-
<b>Hidalgo</b>	<b>23,611.60</b>	<b>10,015.70</b>
Zimapán	23,611.60	10,015.70
<b>Jalisco</b>	<b>10,297.36</b>	<b>86,524.20</b>
Bolaños	10,297.36	86,524.20



<b>México</b>	<b>38,660.22</b>	<b>38,304.54</b>
Zacazonapan	38,137.57	38,304.54
Zacualpan	522.65	-
<b>Michoacán</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>
Angangueo	0.04	0.02
<b>Oaxaca</b>	<b>32,795.89</b>	<b>26,090.18</b>
San Pedro Totolápan	32,795.89	26,090.18
<b>Querétaro</b>	<b>-</b>	<b>2,598.00</b>
Cadereyta de Montes	-	2,598.00
<b>San Luis Potosí</b>	<b>30,650.27</b>	<b>29,287.62</b>
Charcas	30,650.27	29,287.62
<b>Sinaloa</b>	<b>-</b>	<b>2,027.81</b>
Cosalá	-	2,027.81
<b>Zacatecas</b>	<b>435,897.76</b>	<b>484,633.86</b>
Chalchihuites	19,265.30	15,658.40
Fresnillo	87,646.79	109,613.94
Mazapil	260,095.34	319,595.00
Melchor Ocampo	623.06	0.03
Morelos	-	11,000.64
Sombrerete	23,591.06	28,765.85
Vetagrande	3,135.28	-
Zacatecas	41,540.93	-

## ANEXO 2. Exportación de Zinc en México

**C.- Exportación en Volumen y Valor, por Fracción Arancelaria, Presentación y Destino, 2019-2020**  
(Kilogramos y dólares, constantes)

Fracción Arancelaria, Forma de Presentación y País de Destino	2019		2020 p/	
	Kilogramos t/	Dólares	Kilogramos t/	Dólares
<b>Total:</b>		<b>238,440,000.00</b>		<b>378,174,000.00</b>
<b>2608.00.01</b>				
<b>Minerales de zinc y sus concentrados</b>	<b>133,479,000.00</b>	<b>142,941,000.00</b>	<b>314,448,000.00</b>	<b>223,347,000.00</b>
Bélgica (Reino de)	-	-	20,356,000.00	14,092,000.00
Canadá	16,044,000.00	16,366,000.00	-	-
Corea del Sur (República de)	117,211,000.00	126,413,000.00	250,750,000.00	176,352,000.00
Japón (Estado de)	-	-	36,818,000.00	30,181,000.00
Perú (República de)	224,000.00	162,000.00	-	-
Suiza (Confederación Helvética)	-	-	6,524,000.00	2,722,000.00

### ANEXO 3. Propiedades de las aleaciones más comunes de Zn-Al

	ZA-8			ZA-12			ZA-27		
	Sand	Perm	Die	Sand	Perm	Die	Sand	Perm	Die
Ultimate Tensile Strg (psix1000)	36-40	32-37	53-56	40-46	45-50	57-60	58-64	61.5	59-64
Yield Strength 0.2% offset psi x 1000	28-29	29-31	41-43	30-31	36-40	45-48	53-54	53	52-55
Compressive Yield Strength 0.1% Offset (psi x 1000)	28-30	29-32	35-38	32-34	33-35	38-40	47-48	-	51-53
Shear Strength (psi x 1000)	-	35	38-42	36-38	-	41-44	41-43	-	46-48
Youngs Modulus	12.7 x 10 <sup>6</sup>	12.4 x 10 <sup>6</sup>	11.2 x 10 <sup>6</sup>	12 x 10 <sup>6</sup>	12 x 10 <sup>6</sup>	11.2 x 10 <sup>6</sup>	11.3 x 10 <sup>6</sup>	-	11.3 x 10 <sup>6</sup>
Fatigue Strength, Rotary Bending (psi x 1000)	-	7.5	15	15	-	17	25	-	21
Brinell Hardness (500-10-30 Sec.)	82-89	85-90	99-107	92-96	85-95	95-105	110-120	110-120	116-122
Elongation (% in 2 inches)	1-2	1-2	6-10	1-2	1.5-2.5	4-7	3-6	1	2-3.5
Impact Strength <sup>1</sup> 68 <sup>o</sup> (ft. - lb)	13-18	-	24-35	17-22	-	20-37	25-40	-	7-12
Design Stress <sup>2</sup> in Tension 68 <sup>o</sup> F (psi x 1000)	-	10	9	10	10	8.3	11.5	-	9.0
Design Stress <sup>2</sup> in Tension 212 <sup>o</sup> F (psi x 1000)	-	-	-	1.3	-	-	1.5	-	1.3
Design Stress <sup>2</sup> in Tension 300 <sup>o</sup> F (psi x 1000)	-	.6	-	.5	-	-	0.75	-	-

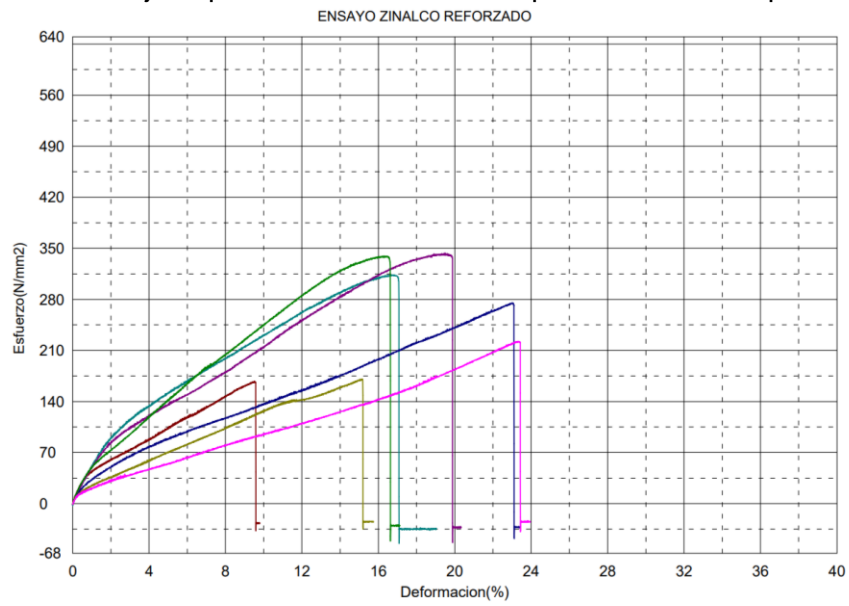
<sup>1</sup> 10mm sa. (.394 in. sa.) ASTM unnotched specimen

<sup>2</sup> Stress to produce a steady creep rate of 1% strain per 100,000 hours. (11.4 years)

### ANEXO 4. Composición del compuesto de ataque químico Palmerston.

Compuesto	Peso (g)	Porcentaje (%)
Oxido crómico (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.4	16.7
Sulfato de Sodio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.6	1.1
Agua (H <sub>2</sub> O)	41.15	82.2

### ANEXO 5. Gráfica arrojada por el software de la máquina universal de pruebas de tensión





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus**  
**Zacatecas**

INGENIERÍA METALÚRGICA

**“FABRICACIÓN DE ALEACIONES DE ZINALCO**  
**REFORZADAS CON NANOFIBRAS DE**  
**CARBONO”**

**Proyecto de titulación**

Docente: Perla María Arellano Sosa

**Presentan**

Mildreth Carbajal Melgarejo

Juan Pablo Ramírez Monroy

**Asesor de proyecto**

Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez

**Revisores de proyecto**

Dra. Seydy Lizbeth Olvera Vázquez

Dr. Luis Ramón Arellano Piña

Dra. Elvia Angélica Sánchez Ramírez