



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERIA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE LA DUREZA EN COMPUESTOS METÁLICOS DE  
ALUMINIOGRAFENO PRODUCIDOS POR EL MÉTODO DE  
PULVIMETALURGIA EN CONCENTRACIONES DE 1, 2 Y 3 % EN  
PESO DE GRAFENO.**

**Trabajo de titulación:**

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: JHONANTAN FERNANDO GOYES ROBALINO**

**DIRECTOR: ING. JORGE ISAÍAS CAICEDO REYES**

Riobamba – Ecuador

2021

**© 2021, Jhonatan Fernando Goyes Robalino**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Jhonatan Fernando Goyes Robalino declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 08 de marzo de 2021

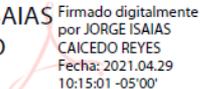
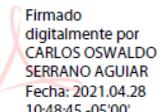
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jhonatan Goyes Robalino', with a stylized flourish at the end.

Jhonatan Fernando Goyes Robalino

060475175-0

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo proyecto técnico ESTUDIO DE LA DUREZA EN COMPUESTOS METÁLICOS DE ALUMINIOGRAFENO PRODUCIDOS POR EL MÉTODO DE PULVIMETALURGIA EN CONCENTRACIONES DE 1, 2 Y 3 % EN PESO DE GRAFENO realizado por el señor: Jhonatan Fernando Goyes Robalino, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Nuñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ  Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2021.04.29 16:28:13 -05'00'	2021-03-08
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	JORGE ISAIAS CAICEDO REYES  Firmado digitalmente por JORGE ISAIAS CAICEDO REYES Fecha: 2021.04.29 10:15:01 -05'00'	2021-03-08
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR  Firmado digitalmente por CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR Fecha: 2021.04.28 10:48:45 -05'00'	2021-03-08

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi familia, padres y hermanos que han sido el apoyo incondicional durante toda mi vida.

Jhonatan

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a mis padres por darme todo su apoyo y motivación para ser una mejor persona cada día. A mis hermanos, primos y amigos que siempre me han demostrado su cariño y enseñanzas. Al ingeniero Isaías Caicedo, Carlos Serrano y Marco Guevara por haberme guiado con sus consejos y enseñanzas durante todo el proceso de investigación de mi trabajo de titulación.

Jhonatan

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Antecedentes de la investigación .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Identificación del Problema .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Justificación de la Investigación .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>8</b>
<i>1.4.1 General .....</i>	<i>8</i>
<i>1.4.2 Específicos .....</i>	<i>8</i>
<b>1.5 Fabricación de aleaciones .....</b>	<b>8</b>
<i>1.5.1 Proceso de fusión .....</i>	<i>9</i>
<i>1.5.2 Proceso de electrólisis .....</i>	<i>10</i>
<i>1.5.3 Metalurgia de polvos .....</i>	<i>10</i>
<b>1.6 Métodos para la obtención de nanocompuestos de matriz metálica.....</b>	<b>11</b>

<i>1.6.1 Infiltración sin presión</i> .....	11
<i>1.6.2 Agitación de fusión</i> .....	12
<i>1.6.3 Deposición láser</i> .....	12
<i>1.6.4 Ultrasonido y agitación</i> .....	13
<i>1.6.5 Molienda Criogénica</i> .....	14
<b>1.7 Pulvimetalurgia</b> .....	15
<i>1.7.1 Producción de polvo</i> .....	15
<i>1.7.2 Proceso de tamizado</i> .....	19
<i>1.7.3 Mezclado de polvos</i> .....	20
<i>1.7.4 Compactación de polvos metálicos</i> .....	20
<i>1.7.5 Sinterizado</i> .....	22
<b>1.8 Elementos aleantes</b> .....	22
<i>1.8.1 Aluminio</i> .....	22
<i>1.8.2 Grafeno</i> .....	23
<b>1.9 Ensayos destructivos</b> .....	25
<i>1.9.1 Pruebas de dureza</i> .....	26
<b>1.10 Software de tratamiento estadístico SPSS</b> .....	28
<b>1.11 Pruebas de Kolmogórov-Smirnov y Scheffe</b> .....	28
<b>1.12 ANOVA</b> .....	28
<b>1.13 Categoría fundamental</b> .....	29
<b>1.14 Hipótesis general y específicas</b> .....	30
<i>1.14.1 Hipótesis general</i> .....	30
<i>1.14.2 Hipótesis específicas</i> .....	30

<b>1.15 Señalamiento de variables .....</b>	<b>30</b>
<i>1.15.1 Variable independiente .....</i>	<i>30</i>
<i>1.15.2 Variable dependiente.....</i>	<i>30</i>

## **CAPÍTULO II**

<b>2. MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Enfoque .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2 Modalidad básica de la investigación.....</b>	<b>31</b>
<i>2.2.1 Investigación documental .....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.2 Investigación de campo.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.3 Investigación experimental.....</i>	<i>32</i>
<b>2.3 Niveles de la investigación .....</b>	<b>32</b>
<i>2.3.1 Pre-Experimental.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.2 Longitudinal.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.3 Analítico.....</i>	<i>33</i>
<b>2.4 Población y muestra.....</b>	<b>33</b>
<i>2.4.1 Población.....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.2 Muestra .....</i>	<i>33</i>
<b>2.5 Operacionalización de las variables .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6 Matriz de consistencia.....</b>	<b>34</b>
<b>2.7 Recolección de información.....</b>	<b>36</b>
<b>2.8 Procesamiento y análisis de la información .....</b>	<b>36</b>

<b>2.9 Metodología del proceso experimental.....</b>	<b>37</b>
<b>2.10 Equipos y materiales.....</b>	<b>39</b>
<i>2.10.1 Equipos.....</i>	<i>39</i>
<i>2.10.2 Materiales.....</i>	<i>40</i>
<b>2.11 Procedimiento experimental.....</b>	<b>40</b>
<i>2.11.1 Adquisición de la materia prima.....</i>	<i>40</i>
<i>2.11.2 Pesaje de los elementos aleantes.....</i>	<i>40</i>
<i>2.11.3 Mezclado de los elementos aleantes.....</i>	<i>41</i>
<i>2.11.4 Proceso de compactación.....</i>	<i>41</i>
<i>2.11.5 Proceso de sinterización.....</i>	<i>43</i>
<i>2.11.6 Preparación de las muestras obtenidas.....</i>	<i>43</i>
<i>2.11.7 Ensayo de dureza Brinell.....</i>	<i>43</i>
<b>2.12 Tipo y diseño de la investigación.....</b>	<b>44</b>

### **CAPÍTULO III**

<b>3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1. Análisis de los tratamientos.....</b>	<b>46</b>
<i>3.1.1. Análisis de la Dureza Brinell.....</i>	<i>46</i>
<i>3.1.2. Análisis estadístico.....</i>	<i>49</i>
<b>3.2. Discusión de resultados.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3. Pruebas de Hipótesis.....</b>	<b>54</b>
<i>3.3.1. Hipótesis general.....</i>	<i>54</i>

<i>3.3.2. Hipótesis específicas</i> .....	54
<b>CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	57
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Técnicas de compactación.....	20
<b>Tabla 2-1:</b>	Presiones de compactación para diversos polvos metálicos.....	21
<b>Tabla 3-1:</b>	Temperatura y tiempo de sinterización de diversos metales. ....	22
<b>Tabla 4-1:</b>	Composición química, propiedades físicas y mecánicas del aluminio.....	23
<b>Tabla 5-1:</b>	Propiedades del grafeno. ....	24
<b>Tabla 6-1:</b>	Propiedades mecánicas de los materiales. ....	26
<b>Tabla 1-2:</b>	Muestras de estudio.....	33
<b>Tabla 2-2:</b>	Operacionalización de las variables.....	34
<b>Tabla 3-2:</b>	Matriz de consistencia.....	34
<b>Tabla 4-2:</b>	Equipos utilizados. ....	39
<b>Tabla 5-2:</b>	Esquema del experimento.....	45
<b>Tabla 1-3:</b>	Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento cero T0.....	46
<b>Tabla 2-3:</b>	Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento uno T1.....	47
<b>Tabla 3-3:</b>	Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento dos T2.....	48
<b>Tabla 4-3:</b>	Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento tres T3.....	48
<b>Tabla 5-3:</b>	Resultados promedios de las pruebas de Dureza Brinell.....	49
<b>Tabla 6-3:</b>	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	50
<b>Tabla 7-3:</b>	Análisis de varianza a la Dureza Brinell por efecto de la adición de diferentes niveles de grafeno al aluminio por proceso de pulvimetalurgia.....	50
<b>Tabla 8-3:</b>	Comparaciones múltiples – Método de Scheffe.....	50

<b>Tabla 9-3:</b> Estadística descriptiva.....	51
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b>	Esquema del proceso de fundición. a) Fundición de revestimiento, b) Fundición en arena, c) Fundición en molde permanente.....	9
<b>Figura 2-1.</b>	Esquema del proceso Hall-Héroult por electrólisis de alúmina fundida en criolita.....	10
<b>Figura 3-1.</b>	Diagrama esquemático de la técnica de infiltración sin presión. ....	11
<b>Figura 4-1.</b>	Representación esquemática del sistema de conformado de red diseñado por láser (LENSTM). 13	
<b>Figura 5-1.</b>	Formas de atomización para obtención de polvos.....	16
<b>Figura 6-1.</b>	Micrografía de barrido electrónico de óxido de cobre reducido a polvo de cobre.	17
<b>Figura 7-1.</b>	Proceso de electrodo giratorio con fuente de arco eléctrico.....	18
<b>Figura 8-1.</b>	Tamizadora analítica marca Retsch.....	19
<b>Figura 9-1.</b>	Ciclo de compactación de polvo metálico.....	21
<b>Figura 1-2.</b>	Pesaje de los compuestos.....	41
<b>Figura 2-2.</b>	Proceso de mezclado. ....	41
<b>Figura 3-2.</b>	Proceso de compactación. ....	42
<b>Figura 4-2.</b>	Muestras verdes compactadas. ....	42
<b>Figura 5-2.</b>	Selección de la temperatura de sinterización en el horno de mufla.....	43
<b>Figura 6-2.</b>	a) Ensayo de dureza, b) Medición de huella. ....	44

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-1.</b>	Variables del trabajo de investigación.....	29
<b>Gráfico 1-2.</b>	Proceso y análisis de los datos obtenidos.....	36
<b>Gráfico 2-2.</b>	Proceso metodológico experimental.....	39
<b>Gráfico 1-3.</b>	Dureza Brinell de las diferentes concentraciones.....	51
<b>Gráfico 2-3.</b>	Regresión de la prueba de Dureza Brinell.....	52

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** REGISTRO POLVO FINO DE ALUMINIO. **ANEXO B:**

PROFORMA DE IMPORTACIÓN DE GRAFENO. **ANEXO C:**

CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE GRAFENO. **ANEXO D:**

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DUREZA.

## RESUMEN

El objetivo principal de la investigación fue determinar si existe variación en la propiedad mecánica de dureza en el aluminio por la adición de grafeno a compuestos metálicos fabricados mediante el proceso de pulvimetalurgia. Para lo que se desarrolló cuatro tratamientos con tres repeticiones en cada uno, se trabajó cada uno de ellos con diferentes concentraciones, de 1, 2 y 3% en peso de grafeno, y se comparó con un blanco de prueba, es decir un tratamiento sin interacción del material de refuerzo. Para el procesamiento de datos y resultados se utilizó el análisis de varianza que brinda el estudio del efecto de factores sobre la media de una variable continua a través del procesamiento de sus varianzas. Además, se complementó la investigación con un análisis de comparaciones múltiples para saber si existen diferencias significativas particulares entre los distintos grupos de la población. Se obtuvo resultados donde se evidencia que existen diferencias significativas entre sus medias, siendo el tratamiento con mayor porcentaje de grafeno (3%) el que representó un 12,97% de aumento en la propiedad medida de dureza con respecto al aluminio prístino. Se concluye que el tratamiento con mayor porcentaje de adición de grafeno es el más adecuado para mejorar la dureza del aluminio. Se recomienda estudiar las demás propiedades del compuesto para caracterizar de mejor manera el material.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA MECÁNICA>, <DUREZA>, <PULVIMETALURGIA>, <ALUMINIO>, <GRAFENO>.



Firmado electrónicamente por:  
JHONATAN RODRIGO  
PARREÑO UQUILLAS



7-04-2021

0966-DBRAI-UTP-2021

## **ABSTRACT**

The main objective of the research was to determine if there is variation in the mechanical property of hardness in aluminum due to the addition of graphene to metallic compounds manufactured by the powder metallurgy process. For which four treatments were developed with three repetitions in each one, each one of them was worked with different concentrations, of 1, 2 and 3% by weight of graphene, and it was compared with a blank test, that is, a treatment without reinforcement material interaction. For the data and results processing, the analysis of variance was used, which provides the study of the effect of factors on the mean of a continuous variable through the processing of its variances. In addition, the investigation was supplemented with a multiple comparison analysis to find out if there are particular significant differences between the different population groups. Results were obtained where it is evidenced that there are significant differences between its means, being the treatment with the highest percentage of graphene (3%) which represented a 12.97% increase in the measured property of hardness with respect to pristine aluminum. It is concluded that the treatment with a higher percentage of graphene addition is the most appropriate to improve the hardness of aluminum. It is recommended to study the other properties of the compound to better characterize the material.

**Keywords:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <MECHANICAL ENGINEERING>, <HARDNESS>, <PULVIMETALLURGY>, <ALUMINUM>, <GRAPHEN>.

## INTRODUCCIÓN

La producción de materiales compuestos de matriz metálica con propiedades mecánicas mejoradas, es uno de los objetivos más importantes en las investigaciones actuales dentro de la ciencia e ingeniería de materiales. Para poder obtener estas propiedades requeridas, los materiales compuestos presentan en su matriz fases distribuidas llamadas rellenos o refuerzos, este refuerzo se agrega a la matriz para obtener mejores propiedades de tenacidad, rigidez, resistencia, dureza. (Ramesh, 2014, pp. 131-147). En la actualidad, el compuesto de matriz de aluminio reforzado con partículas gana relevancia debido a su bajo costo de producción presentando propiedades isotrópicas, lo que facilita la posibilidad de fabricar componentes y elementos secundarios.

La elección de la aleación de aluminio es principalmente debido a su abundante disponibilidad local y su bajo costo de procesamiento. Además, el aluminio es uno de los materiales más usados en todo el mundo, pasando por aplicaciones básicas como perfiles de puertas, ventanas, tubos, recipientes, cables, hasta otras más avanzadas como en la industria aeronáutica y automotriz. Por lo que se han llevado a cabo varias investigaciones que estudian el comportamiento e interacción de la matriz de aluminio con refuerzos de carbono, en sus diversas formas, sean este grafito, grafeno, fullerenos, nanotubos de carbono, entre otros.

En los últimos años, estos materiales a base de carbono (nanotubos y grafeno) han surgido con especial importancia de nuevos materiales para varias aplicaciones en la ingeniería estructural y otros dispositivos, debido a su módulo elástico y resistencia mecánica extremadamente alta, así como también su conductividad térmica y eléctrica. La combinación de estas propiedades con su tamaño y peso, hace que el grafeno y los nanotubos de carbono sean considerados la primera opción de refuerzo, teniendo una expectativa muy prometedora en el campo de los materiales compuestos (Young et al., 2012, p.2).

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo principal verificar si la interacción del grafeno mejora la dureza del aluminio producido por un método de pulvimetalurgia. Con el antecedente de (Madhava, 2016, p.2) que demuestra que se pueden fabricar exitosamente un metal matriz de aluminio reforzado con grafeno, donde después de los procesos de mezclado, compactado y sinterizado, se encontró una distribución uniforme del grafeno en la aleación de aluminio. Además, (Yolshina et al, 2016, p.4) con su método de interacción química demostró una dureza mejorada en el aluminio con una concentración de 2% en peso, valor de referencia para presente investigación y posibles resultados.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Este capítulo contempla un análisis de investigaciones previas a esta, que ayudarán a la comprensión y desarrollo del tema propuesto, recopilando toda la información disponible en artículos, libros, revistas y repositorios web. Luego se describe la identificación del problema relacionado con el campo de la ciencia e ingeniería de materiales para su posterior justificación y formulación de objetivos. Finalmente se describe el marco conceptual necesario para el desarrollo de la presente investigación, así como la identificación de variables de trabajo y formulación de hipótesis.

### 1.1 Antecedentes de la investigación

A continuación, se presenta una serie de trabajos de investigación relacionadas directamente con el objeto de análisis: “Estudio de la dureza en compuestos metálicos de aluminio-grafeno producidos por el método de pulvimetalurgia en concentraciones de 1, 2 y 3 por ciento en peso de grafeno” a fin de profundizar en el entendimiento del mismo. Los primeros artículos a presentarse trataran acerca de los métodos utilizados para la de obtención de grafeno y los siguientes abordaran los métodos de producción de compuestos de metal – grafeno. En cada uno de los artículos se tratará el tema principal del mismo adjuntando sus objetivos, procedimiento y conclusiones principales a las que se llegaron mediante el análisis respectivo. Con el fin de aportar a la presente investigación se centrará primordial atención a los datos de relevancia como son los resultados de resistencias mecánicas de los materiales como punto focal y el método de formación del compuesto metálico utilizado. En cuanto a pruebas mecánicas en los artículos se han realizado los ensayos de dureza Vickers y Rockwell y en cuanto a los métodos de producción de compuestos se han utilizado diferentes técnicas como son formación química in situ, expansión hidrotermal de grafito, reducción de óxidos, entre otros. Los trabajos de investigación consultados son recientes y en ellos se citan a cada uno de sus autores.

Una primera investigación denominada “Nuevos compuestos metálicos de aluminio-grafeno y aluminio-grafito: síntesis y propiedades” propuesta por Yolshina et al., (2016, pp. 5-6) hace referencia a la producción de compuestos de aluminio – grafeno haciendo uso de un método de interacción química directa de carburos in situ con aluminio fundido sobre un medio de haluros alcalinos. El objetivo de la investigación fue conseguir un material con una buena resistencia mecánica, pero sobre todo con una formación y distribución de grafeno uniforme y dispersa en

toda su sección transversal con lo cual se lograría un compuesto de alta calidad. Para llevar a cabo el proceso se utilizó una mezcla de sales pre fundidas (LiCl, NaCl, KCl, CsCl, CaCl<sub>2</sub>, NaF, AlF<sub>3</sub>) y aluminio actuando estas primeras como electrolito base, a las cuales se les adiciono carburos metálicos o no metálicos como WC, TiC, ZrC, en un crisol de alúmina llevándolo a un horno a temperaturas de entre 973 a 1073 K durante tiempos entre 0.5 a 5 horas. A las placas obtenidas se les realizaron diferentes pruebas tanto de resistencia mecánica como son la prueba de dureza Vickers, resistencia a la tracción, ductilidad, composición química realizándose un estudio de la superficie mediante microscopía óptica y electrónica, así también pruebas de corrosión, densidad y puntos de fusión de cada placa teniendo que cada una de estas propiedades ya mencionadas mejoraban sus valores proporcionalmente a la adición de grafeno en la matriz. Finalmente se determinó que los compuestos obtenidos mediante el método de interacción química directa presentaban mejores propiedades mecánicas que el aluminio sin adiciones, teniendo así mayor resistencia, dureza, ductilidad y elasticidad luego de realizadas las pruebas respectivas, obteniendo para el ensayo de dureza (HV 2000 mH) valores de 16.72, 45.32 y 57.19 para aluminio prístino, 1% y 2% grafeno en composición respectivamente.

Un segundo artículo el cual fue llevado a cabo a nivel local en los laboratorios de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en un trabajo conjunto de las facultades de Mecánica y Ciencias se desarrolló un proceso de alto rendimiento respecto a funcionalidad y economía de producción de grafeno utilizando principalmente sonicación fue el realizado por Vacacela et al., (2019, pp. 2-8). Dicho estudio denominado “Preparación de dispersiones de grafeno de pocas capas a partir de grafito hidrotermalmente expandido” se enfocó en la obtención de grafeno haciendo uso de un proceso conjunto de tratamiento térmico y exfoliación del grafito. Los objetivos de este fue encontrar un método eficiente, de bajo impacto ambiental y de costo viable utilizando solventes de alto punto de ebullición y un proceso de sonicación a fin de conseguir un material con grafeno disperso uniformemente en su estructura, esto en contraste a los métodos convencionales como la escisión micromecánica de grafito, oxidación – reducción de grafito, exfoliación electroquímica de grafito y exfoliación en fase líquida de grafito. Para obtener el grafeno se utilizó 100 mg de láminas de grafito natural agregadas en 50 mL de bromuro de hexadeciltrimetilamonio con diferentes concentraciones de surfactante (0.1, 0.5, 1 mg/mL), pasando la mezcla a un recipiente de teflón sellado y reaccionando a 180 grados centígrados durante 15 horas. El grafito pretratado pasó a una sonicación durante 3 horas para luego ser centrifugado y analizado mediante espectroscopía de absorción UV-visible y las morfologías de las muestras utilizando una microscopía electrónica de barrido, obteniéndose espectros Raman con una longitud de onda laser de 514 nm. Como conclusión de esta investigación se obtuvo un dato importante que fue la concentración dispersa de grafeno con valores de 40 a 60 µg /mL lo cual establece la obtención de un nuevo método mejorado de producción de grafeno en

comparación a otros que incluso incorporan sonicación con un mayor tiempo de acción, todo esto gracias a la estabilidad que genera el tratamiento térmico con uso de surfactantes.

Continuando con métodos de reforzamiento o producción de metales con grafeno citamos a continuación tres artículos de interés en los cuales se aplican distintos procesos de formación de compuestos, todos ellos con resultados beneficiosos para las propiedades mecánicas de las muestras obtenidas siendo muy superiores a los metales y aleaciones convencionales. Es así que tenemos una primera investigación denominada “Nuevo método de nano procesamiento para reforzar nanocompuestos de matriz metálica mediante nano plaquetas de grafeno” propuesta por Chen et al., (2012, pp. 2-4), en la cual se buscó un nuevo método de incorporación de grafeno en una matriz de magnesio haciendo uso de procesos combinados de ultrasonido en estado líquido y remoción en estado sólido. El proceso consistió en inyectar nano plaquetas de grafeno a una fundición de magnesio a 700 °C bajo cavitación por ultrasonido, luego la mezcla fue pasada a un molde en el cual tuvo lugar un proceso de solidificación para posteriormente ser sometido a un proceso de remoción en un equipo que consiste de un recipiente que calienta la masa mientras una pieza giratoria pasa sobre toda la superficie generando fricción. Una vez obtenido un grafeno disperso sobre la matriz metálica se realizaron pruebas de micro dureza al compuesto evaluando el rendimiento mecánico de la matriz reforzada con 1.2 % vol. de grafeno obteniendo un valor de 66 Kg/mm el cual es 78 % más duro que la muestra de magnesio puro, demostrando así resultados positivos al combinar estos dos métodos de trabajo. Como información adicional importante del estudio se obtuvo la demostración del grafeno como capa de pasivación ante la oxidación ya que logra prevenir la difusión química de la misma proporcionando una protección casi perfecta dentro de los granos, esto más la evolución de un catalizador metálico proporcionarían múltiples aplicaciones beneficiosas en diferentes sistemas

En otro trabajo realizado por Zhang et al., (2018, pp. 5-12) el cual se denomina “Compuestos de aluminio / grafeno con propiedades de disipación de calor mejoradas por reducción de óxido de grafeno in situ en partículas de aluminio” buscó producir compuestos de aluminio mejorados mediante la adición de grafeno utilizando el método de pulvimetalurgia. Para el proceso se sintetizó una solución de óxido de grafeno a partir de grafito por el método modificado de Hummers (proceso para generar óxido de grafito mediante el uso de permanganato de potasio, nitrato de sodio y ácido sulfúrico), posteriormente se le añadió polvo de aluminio produciéndose una reducción del óxido de grafeno en la superficie del metal pasando luego a ser filtrados, secados y comprimidos en un molde de acero inoxidable para su posterior sinterización. Se realizaron pruebas de dureza Vickers a las muestras logrando valores de  $43.1 \pm 2.5$  HV,  $49.2 \pm 2.5$  HV,  $50.7 \pm 1.2$  HV y  $52.2 \pm 1.9$  HV para el aluminio prístino, 0.1 %, 0.2% y 0.3% en peso de grafeno respectivamente, demostrando un aumento de dureza proporcional a la adición de grafeno y

obteniendo que la muestra con mayor cantidad del mismo presenta un incremento de la dureza del 21.1% respecto al aluminio prístino. Mediante la oxidación in situ se logró obtener un grafeno con buena dispersión sobre la matriz y a pesar de haber sido fabricados por simple compresión y sinterización se lograron compuestos metálicos de baja densidad los cuales tienen potencial aplicación en gestión de calor en electrónicos, área automotriz y aeroespacial. Se recomendó la aplicación de un proceso de formación adicional como es la extrusión en caliente o frío con el fin de mejorar aún más las propiedades mecánicas de los compuestos. Como una última investigación referente a la formación de compuesto metal-grafeno se tiene la realizada por (Mendoza et al, 2016, pp. 2-6) la cual se denomina “Respuesta mecánica y microestructural de un nanocompuesto de aluminio reforzado con partículas a base de carbono” en la cual se identifican los problemas clásicos de adición de grafeno en aluminio y se propone el uso de cobre con el fin de mitigarlos.

Estos problemas tradicionales al momento de producir compuestos metálicos son la formación de agregados no deseados, la baja humectabilidad y la aglomeración del carbono dentro de la matriz, dado a esto se propone el uso de cobre con el fin de formar grafito metalizado mejorando de esta manera el proceso de fabricación buscando una mejor porosidad y homogeneidad del producto final. Para el proceso de producción se utilizó grafito, aluminio y cobre en forma de polvo pasando primero a sintetizar el grafito metalizado realizando una mezcla con 15 % at. de cobre y procesándola en molienda durante 4 horas en una atmósfera de argón inerte, posteriormente se realizaron los compuestos de aluminio – grafito metalizado (0%, 0.5%, 1 %) mediante molienda durante periodos de 1 a 8 horas usando metanol (0.8%) como agente de control. Una vez obtenidos los compuestos se realizó la prueba de dureza mecánica concluyendo que tanto el tiempo de fresado como la proporción de grafito metalizado usado en cada compuesto tienen una influencia directa beneficiosa sobre las propiedades obteniendo los siguientes valores en la prueba Rockwell: piezas 1 hora de fresado en concentraciones de 0%, 0.5% y 1 % es de 28, 46, 36 respectivamente, piezas 2 horas de fresado: 52 (0%), 64 (1%) y la de mayor dureza fue la 4 horas de fresado y 0.5% grafito metalizado reportando 73 HRB. Se demostró también que el proceso de molienda mejora tanto el tamaño del grano como la homogeneidad del compuesto y resistencia mecánica, mientras que resultados de los rayos x mostraron que no existían sólidos en suspensión dentro de la matriz de aluminio esto gracias al uso de cobre.

## **1.2 Identificación del Problema**

La ingeniería de materiales ha beneficiado el avance tanto tecnológico como científico de las sociedades, pasando del uso de materias básicas encontradas en la naturaleza como la piedra, el cobre, el hierro a la formación de compuestos complejos mediante tecnologías desarrolladas como son los composites, los materiales inteligentes, los biodegradables y los nano estructurados. Esta

ciencia de los materiales se ha llegado a convertir en el motor de evolución para las sociedades cumpliendo con un papel protagónico en cada edad de la humanidad y generando cada vez más expectativa hacia el futuro. (Guerrero et al., 2011, pp.11-19). La evolución del uso de materiales simples como arcilla y barro hasta los actuales de alta tecnología como son las estructuras inteligentes vienen acompañados por sucesivas y nuevas investigaciones. Estos nuevos materiales entre los que se encuentran a manera básica metales, elastómeros, polímeros, híbridos y vidrios han permitido el avance de varios sectores industriales en la actualidad como son: industria de la construcción, aeronáutica, medicina, biomedicina, implementos deportivos, industria química y petrolera, entre otros (Adamian, 2009; Ashby, 2011; Mijangos, 2007). Dentro de la evolución de materiales es de vital importancia mencionar a la nanotecnología la cual trata sobre la manipulación de la materia a nivel molecular logrando así nuevos compuestos con diferentes y mejoradas características que los ya conocidos. Estas nanotecnologías toman relevancia en la primera década del siglo XXI teniendo un gran impacto en la vida moderna y desarrollando aplicaciones en fármacos, microchips, energía inagotable, construcción de edificios con micro robots, combate de plagas y contaminación a escala molecular, materiales inteligentes y multifuncionales con mejores propiedades tanto mecánicas como físicas, esto a la par de un cambio en los procesos de producción, pasando de ser rústicos o manuales a convertirse en procedimientos de gran complejidad en los cuales hay una intervención de varias ramas de la ciencia como son la mecánica, la química y la biología (Gonsalves, 2008; Pradeep, 2007).

Algunos de los materiales que han sido desarrollados con gran éxito a través de la aplicación de la nanotecnología han sido los metales y sus respectivas aleaciones llegando a crearse los composites los cuales son aleaciones como el acero pero que han sido reestructuradas a nivel molecular principalmente en combinación con carbono generalmente en forma de grafeno dando a este nuevo material propiedades superiores a las iniciales. A sus inicios los compuestos o composites se utilizaban en áreas específicas como son la aeronáutica o aeroespacial donde es necesario materiales resistentes y de baja densidad sin embargo el avance tecnológico y a la reducción de costos han hecho que estos se implementen a diversos campos como son automotriz, construcción, marina, electrodomésticos, entre otros adquiriendo un elevado potencial en la industria. Como ya se ha mencionado estos nuevos materiales tienen como protagonista principal al grafeno el cual fue descubierto hace más de 80 años pero lamentablemente poco estudiado sino hasta el año 2004 cuando se logró aislarlo y a partir de ahí este nanomaterial se ha convertido en un elemento de vanguardia debido a sus múltiples características como son la gran ductilidad, baja densidad, alta dureza debido a sus enlaces covalente, conductividad térmica y eléctrica, red autorreparable, bactericida, entre otras más razón por la cual ha llegado a ser denominado incluso como “material de Dios” (Mazumdar, 2003; Rodriguez, 2016). Se ha reconocido la necesidad de producir estos nuevos materiales cuyas propiedades son significativamente superiores a los

tradicionales por lo cual nuevos métodos de obtención están siendo desarrollados teniendo así algunos referentes a la producción de grafeno como la exfoliación mecánica, deposición química de vapor, la expansión hidrotérmica del grafito y a la formación de compuestos como procesamiento de agitación por fricción, método de molienda de bolas, metalurgia de polvos (P / M) (Wang et al., 2012, pp.4-6).

De igual manera el desarrollo de estos materiales debe ir acompañado con el avance y automatización de los procesos de fabricación teniendo así que en años recientes en el país se han presentado varias investigaciones relacionadas con los materiales principalmente a nivel universitario, pero aún son escasos tratando de suplir las necesidades de un país en vías de desarrollo. Un análisis sobre el desarrollo económico de un país determina que este viene de la mano con la evolución del sector industrial mientras que un país limitado en este sector es de manera general un proveedor de materia prima como lo es Ecuador (Levy , 2006; Uquillas, 2008). En el país la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación busca incentivar la formación de un nuevo modelo productivo orientado a la generación y difusión del conocimiento, enfocándose en la producción y exportación de materias mediante una política que busca el desarrollo social a través de tecnologías nuevas que sean capaces de promover la competitividad, dentro de estas políticas se busca el fomento industrial y tecnológico mediante la optimización y creación de nuevos productos y procesos (SENESCYT, 2007, pp. 2-10). En virtud de lo anterior, el presente trabajo se orienta al análisis de la producción de compuestos de grafeno - aluminio mediante el método de “pulvimetalurgia” pero específicamente al estudio de la propiedad mecánica de dureza de los compuestos obtenidos por este método, por tanto, el estudio busca responder las siguientes interrogantes:

¿El porcentaje de grafeno en peso utilizado en cada tratamiento influye directamente en la propiedad mecánica medida?

¿El método de pulvimetalurgia utilizado para la formación del compuesto sustenta mejores características que otros estudiados ?

¿Es posible generar un compuesto de alta calidad con respecto al aluminio pristino con un método relativamente económico y sencillo ?

### **1.3 Justificación de la Investigación**

La presente investigación proporcionara un contraste de los compuestos obtenidos mediante métodos anteriormente estudiados como interacción química, agitación de fusión, infiltración de fusión, entre otros con el propuesto “pulvimetalurgia o metalurgia de polvos” con respecto a su calidad de dureza y a su facilidad de procesamiento.

También se podrá determinar la influencia de la cantidad de grafeno en la mezcla con aluminio, utilizando diferentes concentraciones ascendentes en porcentaje peso de grafeno en condiciones determinadas y comparándolas con un blanco de control de aluminio prístino sin adiciones. Y por último al tener un método relativamente económico y sencillo, se busca determinar la eficacia del mismo con respecto a la propiedad medida para así ser considerado como un proceso estándar de fabricación de compuestos para uso industrial o de investigación de laboratorio.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 General***

Determinar la variación en la dureza del aluminio por la adición de tres diferentes concentraciones de grafeno mediante un proceso de pulvimetalurgia.

#### ***1.4.2 Específicos***

Producir mediante el método de pulvimetalurgia compuestos metálicos de aluminio – grafeno en tres concentraciones distintas de 1, 2 y 3 % en peso de grafeno.

Determinar la dureza de los compuestos producidos y un blanco de prueba mediante el ensayo de dureza Brinell.

Establecer la influencia del porcentaje en peso de grafeno utilizado en cada compuesto mediante tratamiento estadístico y determinar la muestra con mayor dureza producida.

### **1.5 Fabricación de aleaciones**

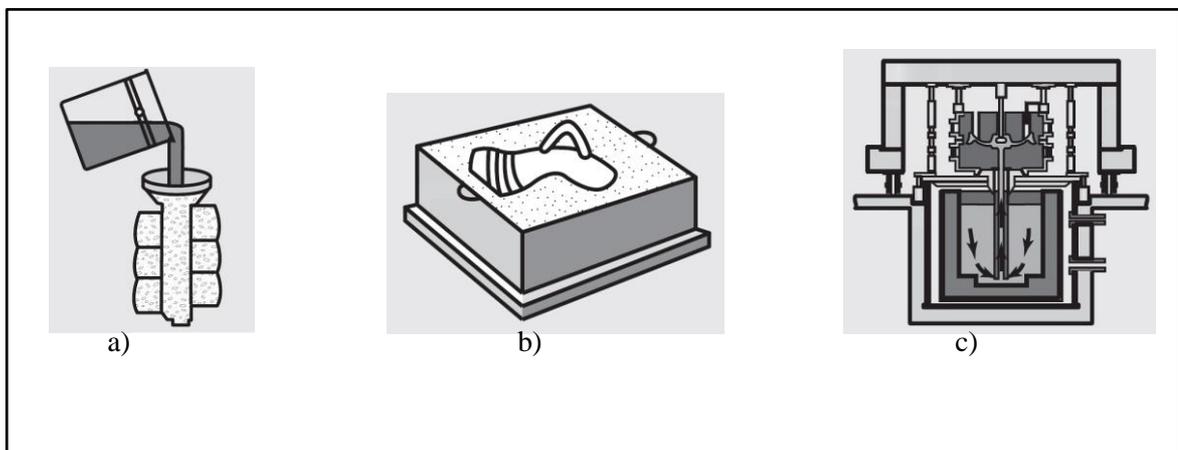
Para tener una aleación se necesita una mezcla homogénea de dos o más elementos, de los cuales al menos uno debe ser metal. Con el objetivo de que este compuesto presente propiedades diferentes a las que podrían presentar los elementos de forma individual. Existen varios procesos,

los cuales se han ido desarrollando a la par de las necesidades y aplicaciones requeridas en la industria, fomentando una competencia tecnológica en la innovación de equipos y procesos. A continuación, se presentan los procesos más utilizados en la industria metalúrgica (Pineda, 2019, p.9).

### 1.5.1 Proceso de fusión

Este proceso se basa en alcanzar la temperatura de fusión del material, con el fin de presentarlo en estado líquido para así poder verterlo en un molde y obtener la pieza deseada. Una vez solidificado adquiere la forma del molde, es decir la geometría requerida. Es un procedimiento comúnmente usado para la fundición de aluminio y hierro, y se pueden usar diversos tipos de moldes, entre ellos moldes de arena y acero.

En teoría, se puede aplicar la fundición para cualquier material, pero se deben trabajar en los metales que presente mejores propiedades de fusibilidad y colabilidad. Las principales ventajas que presenta este proceso es la facilidad con la que puede ser ejecutado, además de considerarse relativamente económico, donde los residuos pueden ser reutilizados. (Pineda, 2019, p.9)



**Figura 1-1.** Esquema del proceso de fundición. a) Fundición de revestimiento, b) Fundición en arena, c) Fundición en molde permanente

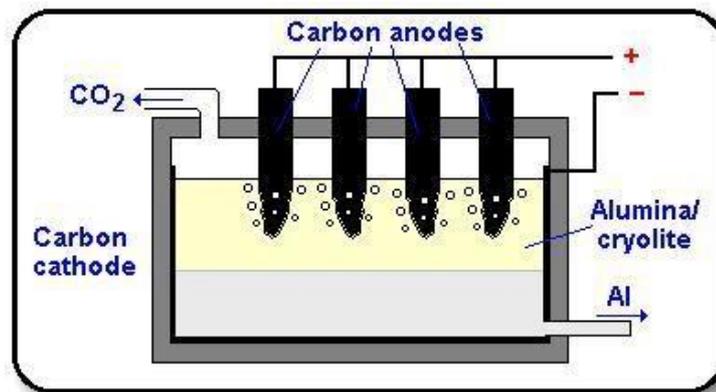
**Realizado por:** Kalpakjian & Schmid, 2008, p.20

Para obtener una fundición satisfactoria se deben controlar bien el diseño y el proceso de solidificación, esto con el fin de tener un correcto flujo del fluido en el sistema. Un correcto diseño en la alimentación de la colada puede evitar o reducir varios problemas como porosidades o enfriamientos prematuros. Por último, también se debe tener en cuenta la velocidad del vaciado,

ya que cuanto menor sea esta en el interior del molde, la fluidez será menor (Kalpakjian & Schmid, 2008, p.268).

### 1.5.2 Proceso de electrólisis

La electrólisis es un proceso químico en el cual los elementos se descomponen gracias al paso de una corriente eléctrica. En este punto se tiene lugar a una liberación de electrones por el ánodo, y una recepción de cationes en el cátodo. Por este método se ha logrado obtener diferentes metales reductores como el aluminio, magnesio o potasio. Para el caso del aluminio, una vez obtenido el óxido de aluminio, se somete a electrólisis por corriente directa, en donde el aluminio metálico se forma en el cátodo, mientras se libera oxígeno en el ánodo. Este proceso demanda una gran cantidad de energía, teniendo como resultado un material relativamente puro de hasta 99.99% de Al, pero de igual manera a un elevado costo (Kalpakjian & Schmid, 2008, p.173).



**Figura 2-1.** Esquema del proceso Hall-Héroult por electrólisis de alúmina fundida en criolita

Realizado por: Herradón, 2016

En la figura 2-1 se esquematiza el procedimiento para obtener aluminio a partir de alúmina previamente disuelta en un baño de criolita fundida. Este procedimiento se mantiene hasta la actualidad con algunas variaciones y desarrollos tecnológicos, pero que no han afectado el resultado. Al día de hoy se producen toneladas de aluminio con una pureza superior al 99%, siendo el metal de mayor producción a nivel mundial (López, 1995).

### 1.5.3 Metalurgia de polvos

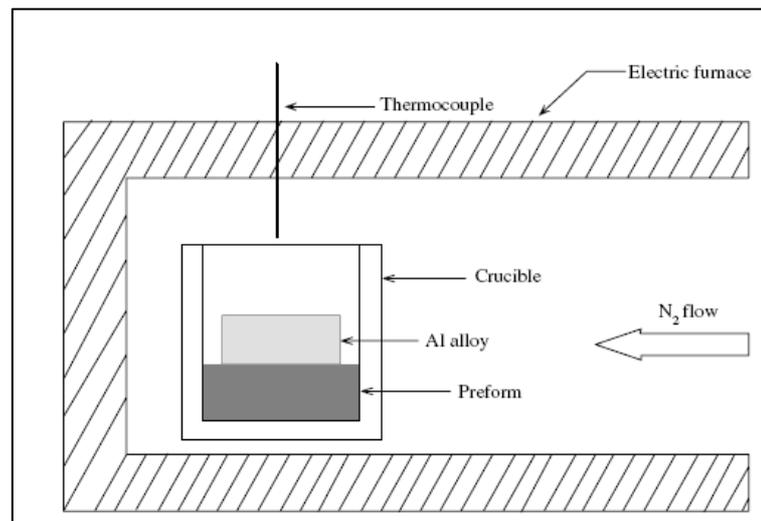
Esta técnica de fabricación de aleaciones metálicas implica cuatro pasos básicos: fabricación de los polvos, mezcla de polvos, compactación y sinterización. Para la obtención de polvos existen

varias técnicas como atomización, reducción de óxidos, pulverización mecánica, entre otros. En la dosificación y mezcla de los polvos lo más fácil de realizarlos es por una mezcla mecánica, pudiendo ser esta mediante un molino de bolas. La siguiente etapa consta de la compactación en frío, que se la realiza por medio de prensas mecánicas o hidráulicas, el resultado de esto se conoce como compactado crudo o pieza verde. Por último, la sinterización consta de alcanzar una temperatura cercana y por debajo de la temperatura de fusión del metal a trabajarse (Madhava, 2016. p.2).

## 1.6 Métodos para la obtención de nanocompuestos de matriz metálica

### 1.6.1 Infiltración sin presión

Este método implica una infiltración espontánea de aluminio fundido sobre una preforma obtenida por prensado o sinterizado, bajo una atmósfera de nitrógeno, en un estado sin presión y sin ninguna ayuda de vacío o presión aplicada externamente. Se coloca un lingote de metal en la parte superior de la preforma, luego este líquido fundido fluye hacia la preforma bajo la acción de la gravedad. Este proceso se lo realiza a 800 °C durante 5 horas bajo una atmósfera de nitrógeno. Las principales ventajas de esta técnica es que es un proceso económico y no requiere de equipos costosos, además de la facilidad para controlar la fracción de volumen de los refuerzos. Teniendo de esta manera la oportunidad de incorporar refuerzos de alto volumen superiores al 50% para cumplir con las propiedades requeridas. El diagrama esquemático de la preparación se muestra en la figura 3-1. (Zhou, 2007. p.2).



**Figura 3-1.** Diagrama esquemático de la técnica de infiltración sin presión.

Realizado por: Zhou, 2007, p.2.

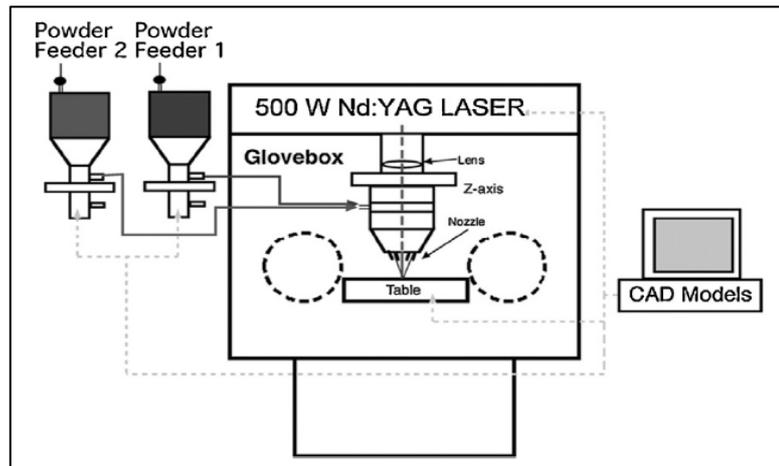
Del esquema podemos observar que en la parte interior del crisol se coloca la preforma de aluminio, nanotubos de carbono y magnesio, seguida de una aleación metálica de aluminio, y este conjunto se coloca en el horno eléctrico que tiene un flujo de nitrógeno que reacciona con el magnesio durante la infiltración para formar nitruro de magnesio, lo que mejora en gran medida la capacidad de humectación entre el aluminio fundido y los polvos. El papel del magnesio durante la infiltración es reaccionar con el oxígeno residual para que el resultado de esta técnica sea libre de cualquier capa de óxido pasivante. (Tjong, 2013. p.11).

### ***1.6.2 Agitación de fusión***

Este proceso implica la fusión de lingotes de metal o aleación en un horno bajo una atmósfera de gas protector. Los refuerzos carbonosos se mezclan en el metal fundido con agitación mecánica seguido de la solidificación. Generalmente, estos refuerzos carbonosos que pueden ser NTC tienden a suspenderse en la superficie de los metales fundidos debido a la gran diferencia entre la densidad de estos con los metales. Se utiliza un impulsor de alta temperatura para agitar esta masa fundida con los refuerzos, generando un vórtice y así dispersar estos nano refuerzos. La agitación ayuda a que se transfieran las partículas de refuerzo al metal líquido y mantiene estas partículas en suspensión. El método de vórtice es típicamente usado para crear y mantener una buena distribución del material de refuerzo en la matriz de aleación (Tjong, 2013. p.11).

### ***1.6.3 Deposición láser***

El proceso de deposición por láser se relaciona con el uso de rayos láser de alta intensidad para fabricar nano compuestos de matriz metálica utilizando polvos metálicos. Los rayos láser son capaces de alcanzar velocidades muy rápidas de fusión de la superficie seguidas de solidificación a altas velocidades de enfriamiento. La técnica de procesamiento por láser ofrece algunas ventajas para la formación de materiales compuestos, como un tiempo de procesamiento corto y menos distorsión de la muestra. Este proceso utiliza la materia prima en polvo, por lo tanto, permite la flexibilidad para depositar una variedad de polvos elementales y crear una aleación in situ. El sistema LENSTM desarrollado por *Sandia National Laboratories* se ilustra en la figura 4-1 a continuación: (Tjong, 2013. p.12).



**Figura 4-1.** Representación esquemática del sistema de conformado de red diseñado por láser (LENSTM).

Realizado por: Gopagoni et al, 2011, p.2.

Este sistema tiene cuatro componentes principales en su ensamblaje: sistema láser, suministro de polvo, la guantera de ambiente controlado y el sistema de control de movimiento. Este proceso comienza con un archivo de diseño CAD de un componente tridimensional que se divide en una serie de capas para que estas sean transmitidas al conjunto de fabricación. Un láser de alta potencia se enfoca en el sustrato para crear un grupo de fusión en el que la materia prima en polvo se entrega a través de un gas inerte que fluye por el conjunto de boquilla múltiple. Las boquillas están diseñadas de tal manera que las corrientes de polvo convergen en el mismo punto donde está enfocado el rayo láser, creando así el objeto sólido tridimensional (Banerjee et al, 2003. p.3).

#### ***1.6.4 Ultrasonido y agitación***

Con la técnica descrita a continuación se busca solucionar la extrema dificultad que se tiene al incorporar y dispersar de forma eficiente nano plaquetas de grafeno en una matriz metálica. Este novedoso método combina un procesamiento ultrasónico en estado líquido con una agitación en estado sólido para la fabricación de nanocompuestos de matriz metálica. Las nano plaquetas de grafeno exhiben extraordinarias propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, por lo que es necesario buscar una ruta para aprovechar dichas propiedades en varias matrices de materiales como polímeros, metales y cerámicas. El sistema de procesamiento ultrasónico puede generar una cavitación transitoria intensa y una fuerte transmisión acústica. Entonces se cree que el procesamiento ultrasónico es ampliamente considerado como una de las técnicas más poderosas para dispersar nano partículas en metal fundido.

Los pasos a seguir en este método es primero alimentar las nano plaquetas de grafeno a la masa fundida bajo la zona de cavitación generada por la sonda ultrasónica de alta potencia. Después de

la alimentación las nano plaquetas se dispersan aún más mediante procesamiento ultrasónico durante 15 minutos. Luego la masa fundida con nano plaquetas de grafeno se vierte en un molde de placa, para que después de la solidificación se obtenga la placa metálica reforzada con estas nano partículas. Para mejorar la dispersión después de la técnica de ultrasonido, se utiliza el proceso de agitación por fricción en estas placas obtenidas por ultrasonido. Este proceso consiste en trabajar la placa con una herramienta giratoria no consumible para agitar los materiales a lo largo de la trayectoria de desplazamiento en estado sólido. Teniendo así una combinación de estos procesos para incorporar y dispersar con éxito las nano plaquetas de grafeno en matrices metálicas (Chen, 2012, pp. 2-5).

### ***1.6.5 Molienda Criogénica***

Este procedimiento consiste en el desgaste mecánico de polvos dentro de un medio criogénico, siendo un método para fortalecer materiales a través del refinamiento del tamaño de grano y la dispersión de partículas finas a escala nanométrica. Esta técnica se basa en una deformación plástica severa, por lo que la formación de nanoestructuras dentro de las partículas de polvo se puede comparar con otros métodos de molienda de bolas, refinamiento de microestructural de materiales, agitación por fricción o trabajo en frío. Esta operación tiene lugar cuando se introducen polvos metálicos en un molino de bolas modificado para que este se pueda enfriar mediante un flujo continuo de nitrógeno líquido a través de una camisa de enfriamiento. Una vez consolidados, estos materiales han demostrado tener una resistencia considerable en comparación con los materiales convencionales y con materiales granulados procesados por otros métodos (Witkin, 2006, pp. 5-35).

Se puede fabricar compuestos de aluminio con nano hojuelas de grafeno combinando varias rutas de procesamiento como: mezcla, molienda criogénica, desgasificación y extrusión en caliente. En el primer paso, se tiene polvo de aluminio y GNF mezclados mecánicamente con ácido esteárico usando un mezclador en V modificado. Luego se emplea la molienda criogénica a una velocidad de 180 rpm durante 2 horas. Para eliminar los gases atrapados, humedad, ácidos y grupos funcionales en las nano hojuelas de grafeno se evacúa este polvo en vacío, terminando así la etapa de desgasificación. Por último, se extruye este compuesto a 300 °C para formar barras de 15 mm de diámetro para finalmente someterlas a un tratamiento térmico de recocido. Teniendo como resultado un compuesto que exhibe una mayor resistencia y ductilidad que la de un aluminio monolítico (Li, 2015, pp. 2-6).

## **1.7 Pulvimetalurgia**

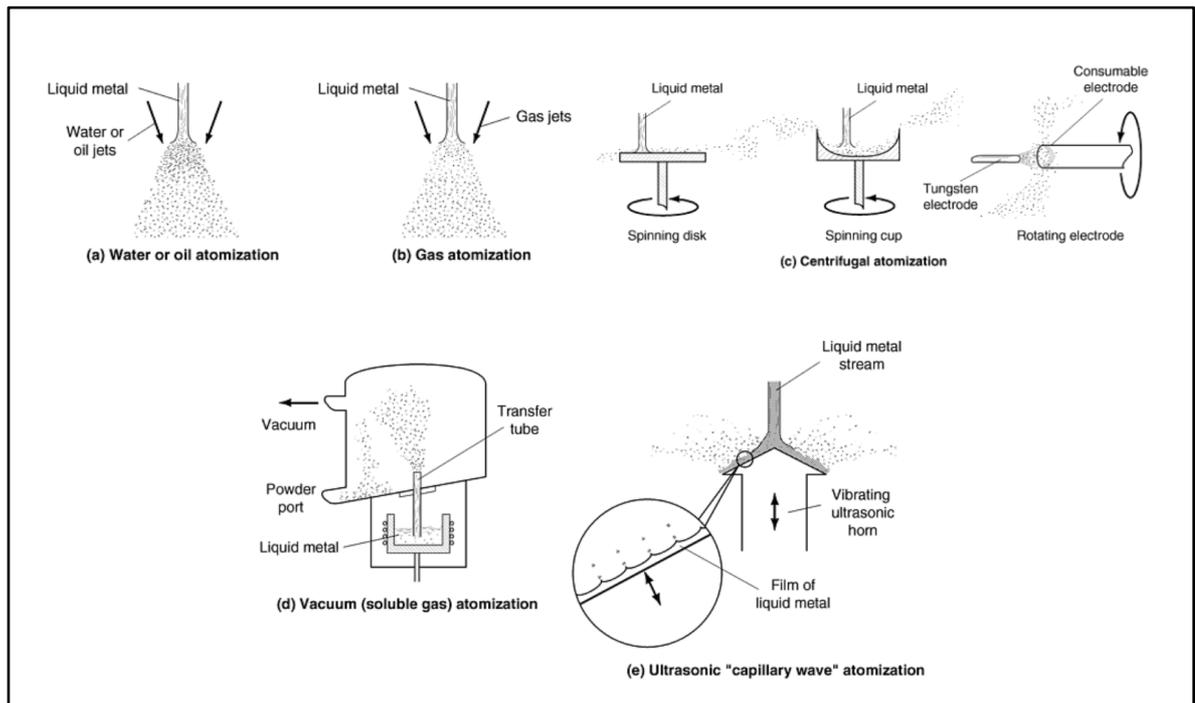
La norma ASTM B925 “Prácticas estándar para la producción y preparación de muestras de prueba de metalurgia de polvos (PM)” contempla varios factores para la fabricación de muestras para diferentes pruebas como compresibilidad, ensayo de tracción, impacto, fatiga, expansión térmica, entre otras. Ya que la norma no contempla indicaciones para compuestos metálicos de aluminio- grafeno, o compuestos en general, se seguirán las recomendaciones que hace esta acerca del proceso de compactación y sinterización, mas no la aplicación específica y directa de esta norma al presente trabajo de investigación. Como se indicó en la sección 1.5.3 existen varios métodos para la obtención de los polvos metálicos y la mezcla de los mismos, además de temperaturas y presiones de sinterización y compactación respectivamente. A continuación, se detalla cada uno de los procesos que involucra esta técnica.

### ***1.7.1 Producción de polvo***

Existen varias técnicas que se utilizan para fabricar una amplia variedad de polvos metálicos diseñados para cumplir con los requerimientos y demandas de una extensa rama de aplicaciones. Varios de estos procesos permiten controlar de manera precisa la composición química y características físicas de los polvos, sabiendo que se pueden producir polvos de prácticamente todos los metales. Los métodos comúnmente utilizados son: atomización, molienda, aleaciones mecánicas, electrólisis, reducción de óxidos y métodos químicos (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 89).

#### ***1.7.1.1 Atomización***

Este método obtiene polvo de los principales metales como aluminio, cobre, estaño, hierro, níquel y titanio. A partir del metal fundido, que se vierte en una cámara de atomización y que mediante la pulverización se solidifica obteniendo el polvo metálico. Se entiende por atomización simplemente a la ruptura de un líquido en gotas muy finas, sabiendo que cualquier material disponible en estado líquido puede ser atomizado. Este método se ha convertido en el modo dominante de producción de polvos metálicos ya que tiene elevadas tasas de producción y escalabilidad. Existen varias formas de realizar atomización y se presentan en la figura 5-1 a continuación:



**Figura 5-1.** Formas de atomización para obtención de polvos.

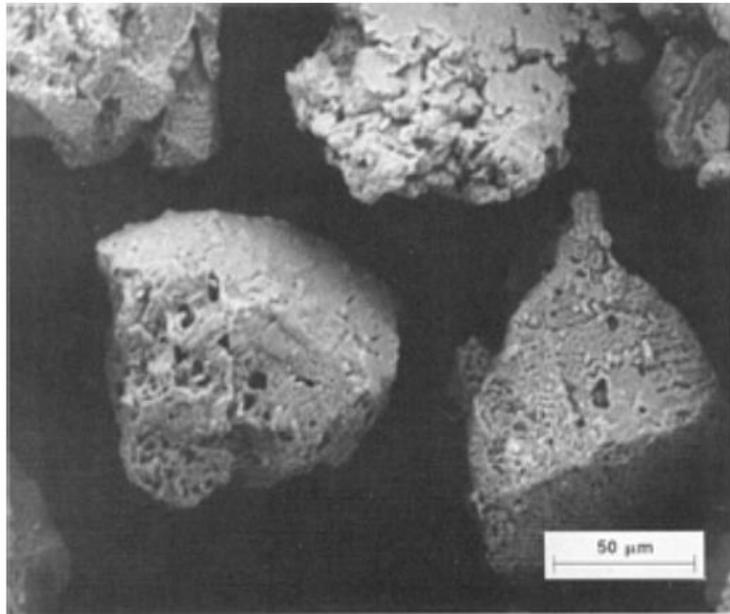
Obtenido de: (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 90).

En (a), El metal fundido corre a través de un sistema de boquilla atomizadora que luego se desintegra en gotas finas por los chorros de agua o aceite a alta velocidad. En (b), se tiene un mejor control de tamaño de partícula ya que se puede cambiar la relación del flujo de gas al metal. En (c), la fuerza centrífuga rompe el líquido y arroja el metal fundido pulverizado en forma de gotas que luego se solidifican como partículas de polvo. Este método es más eficiente energéticamente que la atomización por agua o gas, ya que solo el 1% de la energía del chorro se usa para la desintegración del metal. En (e), el principio básico de este método, es que una película líquida, si vibra lo suficientemente fuerte formará ondas que se romperán para formar gotas. Esta técnica proporciona un rendimiento similar al de la atomización centrífuga pero mejor que la atomización de gas (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 93-131).

### 1.7.1.2 Reducción de óxidos metálicos

A partir de sus respectivos óxidos metálicos, se puede obtener polvos de cobre, hierro, molibdeno y tungsteno, esto se logra poniéndolos en contacto con un gas reductor a una temperatura menor que la de fusión. La calidad que presentan los polvos de hierro y cobre se puede comparar con la de polvos producidos por otros métodos. La característica de estos polvos es que presentan poros dentro de cada partícula de polvo, lo que los hace ideales para trabajarlos en compactación y sinterización. Los medios reductores más usados para aplicar este método son el hidrógeno y el

monóxido de carbono, teniendo en cuenta que la variable más importante a considerar en esta técnica es la temperatura de reducción (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 166).



**Figura 6-1.** Micrografía de barrido electrónico de óxido de cobre reducido a polvo de cobre.

**Obtenido de:** (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 323).

Una vez que el óxido ha sido reducido se tamiza y clasifica, en algunos casos también es necesaria una lubricación. Estos pasos tienen lugar con el fin de evitar cambios incontrolados en características como densidad y flujo de polvo. Para estabilizar el producto contra la oxidación, algunos polvos se tratan con antioxidantes patentados. El polvo de cobre sin este tratamiento está en peligro de perder su resistencia en verde y otros efectos secundarios cuando se exponen al aire húmedo. Los polvos de cobre con una grande superficie específica son más sensibles a presentar una capa delgada de corrosión, lo que se denomina deslustre (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 323).

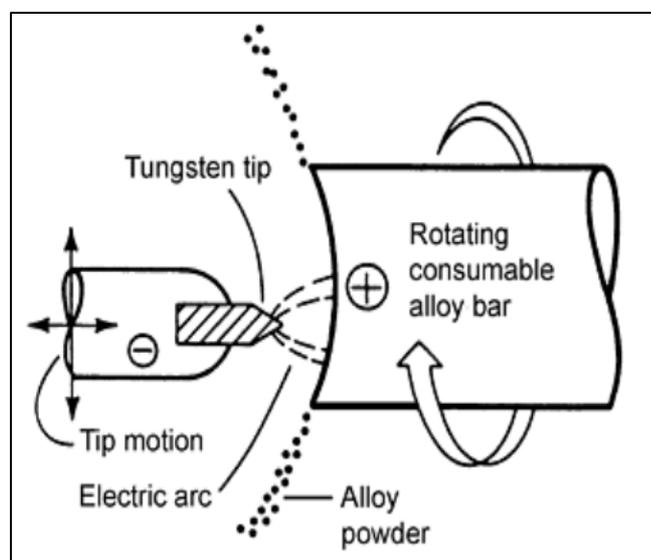
#### *1.7.1.3 Proceso de molienda mecánica*

Esta técnica tiene como objetivo producir polvo metálico a través de un proceso de molienda mecánica. Se tiene como resultado la reducción en el tamaño de la partícula, con una microestructura fina y controlada. El proceso mencionado consiste en impactos de alta energía por parte de los elementos del equipo de molienda sobre las partículas, causando repetidas micro forjas, reduciendo así el tamaño de las partículas de polvo. Existen varios equipos para realizar molienda mecánica, entre ellos el molino de bolas de alta energía, molino de bolas planetario, molino de bolas vibratorio, como los más utilizados.

Una de las variables más importantes que involucra el desarrollo de este proceso, es la temperatura de trabajo, que se debe encontrar entre 100 y 200 °C, la cual se incrementa y produce debido a la energía cinética al momento de la molienda. Esta energía cinética se relaciona directamente con el tamaño de bolas utilizadas en el molino, ya que dependerá de la masa y velocidad a las que estas trabajen, por lo que elegir un tamaño adecuado será otra variable fundamental en el proceso. Por último, la atmosfera en la que se trabaja es un factor igual de importante que los anteriores; se puede trabajar en una atmósfera controlada con argón o helio, reduciendo así la contaminación, a diferencia de trabajar en un proceso sin control de atmósfera produciendo compuestos volátiles o no volátiles (Campos, 2011. P. 4-8).

#### 1.7.1.4 Electrodo giratorio

El proceso de electrodo giratorio es otra técnica para producir polvos metálicos, obteniendo un alto nivel de pureza y limpieza del producto. Recibe este nombre ya que, al hacer girar una barra de metal sobre su eje longitudinal, se funde por uno de sus extremos. Este metal fundido se expulsa centrífugamente formando pequeñas gotas que se solidifican en partículas de polvo esféricas. La fuente de energía más usada para fundir el electrodo es el arco eléctrico, pero también se lo puede realizar mediante plasma. El esquema básico del proceso se muestra en la figura 7-1.



**Figura 7-1.** Proceso de electrodo giratorio con fuente de arco eléctrico.

**Obtenido de:** (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 229).

Este método presenta varias ventajas de fabricación en su producto, el proceso de electrodo giratorio es un medio de fusión y atomización sin contacto para fabricar polvo con un nivel de pureza muy elevado. Debido a que las gotas atomizadas se dispersan y se alejan radialmente una de la otra, existe pocas posibilidades de colisiones entre gotas, teniendo como resultado el flujo libre de estas partículas y una alta densidad de empaquetamiento. La mejora constante de esta técnica ha llevado a introducir en los equipos cámaras controladas de vacío, además de trabajar en base a fuerzas centrífugas en lugar de arrastre aerodinámico, se obtiene polvo libre de porosidad a diferencia del método de atomización por gas (ASM Metals Handbook vol. 7, 1997, p. 229).

### ***1.7.2 Proceso de tamizado***

Esta etapa permite separar, fraccionar y determinar el tamaño de grano en materiales como abrasivos, carbón, carbón activado, cemento, diamantes, especias, entre otras. En el mercado se puede encontrar varios tipos de tamizadoras con diferentes principios de funcionamiento, pero las más usadas por su facilidad y versatilidad son las tamizadoras vibratorias. El principio básico consiste permitir que las partículas pasen por las aperturas de un tamiz mediante movimientos circulares horizontales y golpeteos verticales, esta combinación de movimientos simula al tamizado a mano. En la figura 8-1 se muestra una tamizadora analítica que presenta varias ventajas como: no necesita mantenimiento, fácil operación y diseño ergonómico (Retsch Lab Equipment. 2020).



**Figura 8-1.** Tamizadora analítica marca Retsch.

**Obtenido de:** (Retsch Lab Equipment. 2020. Haan, Alemania).

La tamizadora analítica modelo AS 200 TAP mostrada en la figura 8-1 es una de las más usadas en el campo de la investigación y desarrollo. Entre sus principales aplicaciones tenemos el control de calidad de materias primas, productos intermedios y acabados, además de supervisar procesos de producción. Está diseñada para trabajar con productos a base de carbón (pudiendo ser estos, grafito y grafeno), abrasivos, cemento, entre otros. Realiza su tamizaje de manera horizontal circular con golpeteos verticales (Retsch Lab Equipment. 2020).

### ***1.7.3 Mezclado de polvos***

La mezcla es una operación de combinación de polvos, en esta etapa se debe conseguir una distribución uniforme de los elementos aleantes con el material base. El objetivo de esta etapa es que mediante el proceso de mezclado evitar concentraciones o aglomeraciones en un punto específico de la muestra, ya que esto puede traer consecuencias negativas en los procesos de compactación y sinterización. Esta operación se la puede llevar a cabo en el mismo molino de bolas que se usa para la obtención de los polvos, con la diferencia de que el tiempo de trabajo será menor. Uno de los factores más importantes a ser controlado es la contaminación de los polvos que se mezclan, además del desgaste del contenedor (Pineda, 2019, p.19).

### ***1.7.4 Compactación de polvos metálicos***

En la etapa de compactación los polvos previamente mezclados se prensan para darles la forma de la matriz que los contienen. En la tabla 1-1 se muestran los tipos de compactación más usados:

**Tabla 1-1:** Técnicas de compactación.

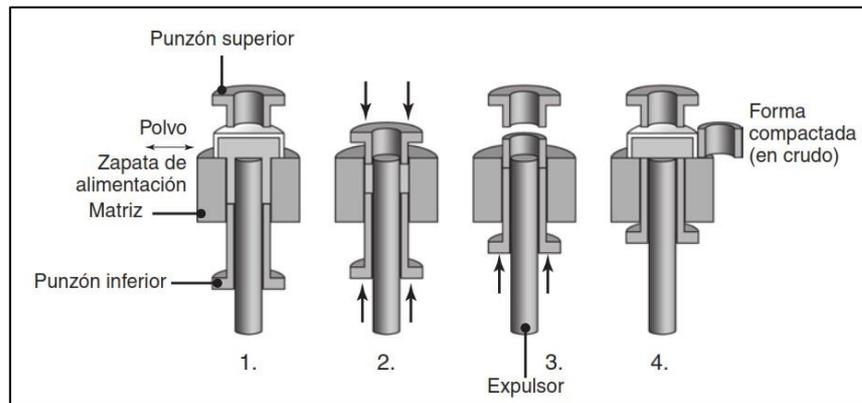
TIPO	PROCESO
Compactación en frío	Prensado
	Prensado isostático
	Laminado
	Extrusión
	Moldeo por inyección
Compactación en caliente	Prensado isostático

**Fuente:** Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 485

**Realizado por:** Goyes Jhonatan. 2020.

El objetivo en esta etapa es obtener una muestra que tenga la forma y densidad adecuada para que la pieza final tenga propiedades óptimas de trabajo. Los principales pasos para realizar el proceso de compactación son los siguientes: Llenado de la matriz, ubicación de los punzones, entrada del punzón que realiza la compactación, aplicación de una presión definida, retirar la carga de presión

y finalmente extraer el compactado. A este producto en pulvimetalurgia se lo conoce como compactado en verde o crudo, ya que presenta una baja resistencia, y se puede dañar o desmoronar. Para elevar la resistencia en crudo, se deben aplicar con mucho cuidado los pasos anteriormente mencionados, teniendo especial atención en el llenado de la matriz y la aplicación de la presión. La figura 9-1 ilustra los pasos indicados para la compactación:



**Figura 9-1.** Ciclo de compactación de polvo metálico.

**Obtenido de:** (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 491).

La densidad del compactado es el factor más importante en el desarrollo de este proceso, ya que cuanto más alta sea la densidad de la pieza mayor será su resistencia y módulo elástico. Ahora, conforme aumenta la presión de compactación, aumentamos la densidad de la pieza, siempre y cuando respetando los límites de presión para diversos materiales que se muestran en la tabla 2-1. Los equipos más utilizados para realizar el proceso de compactación, son prensas accionadas por medios hidráulicos o mecánicos, trabajando por lo general a temperatura ambiente (Kalpakjian, 2008, p. 490-493).

**Tabla 2-1:** Presiones de compactación para diversos polvos metálicos.

PRESIONES DE COMPACTADO	
METAL	PRESIÓN (MPA)
Aluminio	70-275
Bronce	200-275
Hierro	350-800
Latón	400-700
Tantalio	70-140
Tungsteno	70-140

**Fuente:** Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 493

**Realizado por:** Goyes Jhonatan. 2020.

### 1.7.5 Sinterizado

El proceso de sinterización es el último paso en la técnica de pulvimetalurgia para producir compuestos metálicos. El objetivo principal en esta etapa es permitir que las partículas individuales del compactado en crudo se fusionen, para esto se calienta en un horno a una temperatura por debajo del punto de fusión, pero lo suficientemente alta para permitir este fenómeno de fusión. Por lo general, el intervalo de las temperaturas de fusión se encuentra en el rango del 70% a 90% del punto de fusión del metal o aleación que se está trabajando. Otro factor fundamental a considerar en la etapa de sinterización es el tiempo, el que puede ir desde 10 minutos para aleaciones de hierro y cobre, hasta 8 horas para el tantalio. En la tabla 3-1 se resume temperatura y tiempo para diversos metales: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 499).

**Tabla 3-1:** Temperatura y tiempo de sinterización de diversos metales.

TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE SINTERIZACIÓN		
Material	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Aceros inoxidables	1100-1290	30-60
Cobre, latón y bronce	760-900	10-45
Níquel	1000-1150	30-45
Hierro y hierro-grafito	1000-1150	8-45
Ferritas	1200-1500	10-600
Tantalio	2400	480

**Fuente:** Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 499

**Realizado por:** Goyes Jhonatan, 2020.

Al ser la temperatura de fusión del aluminio de 660.3 °C se podría trabajar en un rango de 462.21 y 594.27 °C, ya que de manera general estas temperaturas se encuentran en el rango del 70 al 90 % respectivamente para el proceso de sinterización.

## 1.8 Elementos aleantes

### 1.8.1 Aluminio

La principal característica que presenta el aluminio es su peso ligero, debido a su baja densidad, lo que lo hace uno de los materiales más sobresalientes en una relación resistencia-peso. Además, presenta buenas propiedades de conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión debido a la formación de una delgada película superficial de óxido. Es un metal muy dúctil lo que permite una notable capacidad de maquinabilidad y formabilidad, facilitando la obtención de

productos con varias formas deseadas (Mikell, 2007, p.112). La tabla 4-1 muestra las principales propiedades del aluminio:

**Tabla 4-1:** Composición química, propiedades físicas y mecánicas del aluminio.

COMPOSICIÓN QUÍMICA							
Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Otros
0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS							
Propiedad				Valor			
Densidad				2710 kg/m <sup>3</sup>			
Temperatura de fusión				660 °C			
Módulo de elasticidad				71.7 Mpa			
Resistencia a la tensión				90 Mpa			
Límite de fluencia				29.4 Mpa			

**Fuente:** Budynas 2008, p. 51

**Realizado por:** Goyes Jhonatan, 2020.

### 1.8.2 Grafeno

El carbono es un elemento alotrópico que se puede encontrar en varias formas como: diamante, fullereno, nanotubos de carbono, grafito y grafeno. El grafeno está constituido por una sola capa de átomos de carbono en forma hexagonal, por lo que se lo considera un nanomaterial bidimensional. Según el número de capas que presente se lo puede clasificar en monocapa, bicapa, pocas capas (3 a 4) y multicapas (5 a 10), ya que todos presentan propiedades similares se los puede caracterizar como grafeno. Es un material casi transparente y una lámina de un átomo de espesor puede ser 200 veces más resistente que el acero. Es una estructura que presenta una amplia variedad de propiedades y aplicaciones superiores a varios materiales ya conocidos (Graphenano, 2017).

Entre sus principales propiedades tenemos que es un material ultraligero, una lámina de 1m<sup>2</sup> pesa solo 0.77 mg, y gracias a su estructura bidimensional lo hace un material altamente resistente, además de ser muy flexible y ligero. Se lo considera como uno de los mejores conductores térmicos, siendo su conductividad mayor a la del cobre, diamante o plata; de igual manera, su conductividad eléctrica también supera a la de los mejores exponentes en esta propiedad. Otra propiedad muy importante del grafeno es su alta densidad, lo que le otorga una propiedad de impermeabilidad a todo tipo de líquido, vapores y gases, excepto al agua, ya que estas moléculas si pueden atravesar la membrana del grafeno, potenciando sus aplicaciones como filtro, bactericida, entre otros (Graphenano, 2017). La tabla 5-1 muestra las principales propiedades del grafeno:

**Tabla 5-1:** Propiedades del grafeno.

PROPIEDADES GRAFENO		
Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la tensión	130	GPa
Módulo de Young	0.5-1	TPa
Densidad	0.77	mg m <sup>-2</sup>
Conductividad térmica	5000	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Conductividad eléctrica	0.96×10 <sup>8</sup>	(Ω m) <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansión térmica	-6×10 <sup>-4</sup>	K <sup>-1</sup>
Movilidad de electrones	1500	cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>

**Fuente:** Kumar, 2014

**Realizado por:** Goyes Jhonatan, 2020.

### 1.8.2.1 Métodos de obtención del grafeno

Existen varios métodos para obtención del grafeno que se han ido desarrollando y mejorando con el paso de los años, teniendo métodos que van desde lo más simple como la exfoliación con cinta adhesiva, hasta técnicas de procesamiento muy complejas que requieren materiales y equipos de vanguardia. El mundo se encuentra en una carrera por lograr producir grafeno a escala industrial, ya que de momento solo se produce a pequeña y mediana escala y laboratorios y centros de investigación. Gracias a las propiedades que este nanomaterial ha demostrado, es importante lograr su producción y masificación para así poder realizar cosas que hasta ahora nos parecen imposibles, como materiales ultra resistentes y baterías de extremada larga duración. A continuación, se presentan los métodos más utilizados para la producción de grafeno.

**Exfoliación mecánica:** El objetivo de la exfoliación es obtener una única lámina de carbono a partir del grafito, que no es más que varias láminas de carbono superpuestas. Esta técnica llevó a dos investigadores rusos Andre Geim y Konstantin Novoselov a ganar el premio nobel de física del año 2010. Los investigadores utilizaron el grafito de un lápiz, al rayar sobre una superficie y luego desprender capa por capa con la ayuda de la cinta adhesiva, lograron por primera vez obtener grafeno por este método. Esta técnica presenta varias deficiencias como su poca homogeneidad, presencia de defectos e impurezas, y producción relativamente nula (Hug, 2017).

**Solución de exfoliación:** La materia prima que se utiliza en esta técnica son los polvos de grafito, que mediante el método de Hummer, primero se oxida este polvo, luego se añade agua desionizada y otras sustancias químicas para finalmente obtener óxido de grafeno disperso en agua. Luego se somete a un proceso mecánico de ultrasonido y sonicación para permitir la interacción del oxígeno con el agua, obtenidos en el proceso de oxidación. Finalmente, se separa el óxido de grafeno de partículas residuales de grafito mediante centrifugado. La principal

desventaja de este método es que deja en la estructura final varias impurezas propias de los procesos de oxidación (Rodríguez, 2016).

**Reducción hidrotermal de óxido de grafeno:** Este procedimiento pertenece al grupo de métodos de reducción química, siendo una alternativa ecológica a los reductores químicos peligrosos para la síntesis de grafeno. Con esta técnica se pueden obtener nanoestructuras homogéneas altamente cristalinas sin la necesidad de un recocido o calcinación. La reducción hidrotermal toma lugar en un sistema cerrado en presencia de agua o un solvente, llegando a una temperatura cercana o superior a su punto de ebullición con el objetivo de elevar la presión. Durante este proceso el agua actúa como una fuente de iones, facilitando así el proceso de reducción. El producto final son láminas de grafeno dispersas en agua o en el solvente utilizado para su reducción. Una de las principales desventajas de este método es que las láminas pueden presentar una baja conductividad debido a la interacción con nitrógeno que se usa en algunos reductores (Khan, 2015).

**Deposición química de vapor (CVD):** La deposición química de vapor o más conocida como CVD por sus siglas en inglés (*chemical vapor deposition*), es un método de síntesis de grafeno que mayor interés y mejores resultados a presentado a lo largo de su estudio. El principio de este método es la posibilidad del grafeno para crecer sobre sustratos de carburo de silicio aislantes y conductores. Los átomos de carbono se alimentan externamente por precursores gaseosos y se depositan sobre el sustrato, permitiendo el crecimiento del grafeno directamente sobre la superficie del carburo. La principal ventaja de este método es que permite sintetizar un número predefinido de capas de grafeno con alta precisión, incluida la monocapa, considerada la nanoestructura que mejores propiedades presenta. Para llevar a cabo este proceso, se requieren elevadas temperaturas, se habla que, para lograr un grafeno de alta calidad, se requiere trabajar entre 1500 a 1800 °C. En este rango de temperatura ocurre la descomposición del sustrato, el crecimiento del grafeno por sublimación del silicio ocurre desde aproximadamente los 1300 °C, antes de alcanzar la temperatura de crecimiento de CVD, teniendo que las primeras capas de carbono se formarán por la evaporación del silicio (Backes, 2019).

## 1.9 Ensayos destructivos

En el campo de la industria e investigación siempre es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales, los datos que arrojan estas pruebas permitirán conocer con exactitud su futuro comportamiento y funcionamiento. Para lograr determinar dichas propiedades se emplea los denominados ensayos destructivos, en los que se somete a la pieza analizada a diferentes tipos de pruebas, teniendo como resultados marcas, deformaciones o roturas de la muestra. Se pueden diferenciar 3 tipos de ensayos destructivos de propiedades mecánicas: ensayos destructivos

estáticos, ensayos destructivos dinámicos y ensayos tecnológicos. En el primer tipo la carga es estática o progresiva, teniendo como resultado ensayos de dureza, tracción, flexión, compresión, entre otros. Para los ensayos dinámicos no se tiene carga estática ni progresiva, se puede realizar pruebas de fatiga, desgaste y resiliencia. Finalmente, para verificar si un material es óptimo para una aplicación en especial, se utilizan los ensayos tecnológicos, mediante los cuales se puede conocer propiedades como la soldabilidad, templabilidad, conformado, entre otras (Ensayos destructivos en la soldadura, 2011, p.4).

Las propiedades mecánicas definen la forma en que los materiales soportan cargas o fuerzas aplicadas, en la tabla 6-1 se resumen las principales propiedades mecánicas de los materiales.

**Tabla 6-1:** Propiedades mecánicas de los materiales.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
Dureza	Resistencia a rayadura o penetración.
Tenacidad	Resistencia de un cuerpo a la rotura.
Fragilidad	Facilidad de un cuerpo para romperse.
Elasticidad	Capacidad de un cuerpo para deformarse y recuperar su estado inicial.
Resiliencia	Energía absorbida por unidad de sección.
Fatiga	Capacidad de un cuerpo de resistir esfuerzos repetitivos.

**Fuente:** Ensayos destructivos en la soldadura, 2011

**Realizado por:** Goyes Jhonatan, 2020.

### ***1.9.1 Pruebas de dureza***

La dureza es una propiedad mecánica que presentan los materiales, es medible, y específicamente se define como la resistencia a la indentación permanente. Si un material presenta una buena dureza significa que es resistente al uso y a las rayaduras, característica importante en varias aplicaciones industriales. Gracias al constante avance tecnológico, se han venido desarrollando varias técnicas y procedimientos que facilitan la evaluación de las propiedades de los materiales, entre ellas las pruebas de dureza, que se caracterizan por ser rápidas y convenientes. Cabe recalcar que existen métodos apropiados y recomendados para los distintos tipos de materiales, teniendo entre los ensayos de dureza más conocidos las de Brinell, Rockwell y Vickers (Mikell, 2007, p.52).

#### ***1.9.1.1 Dureza Brinell***

La norma ASTM\_E10 establece todos los parámetros necesarios para realizar la medición de dureza Brinell en materiales metálicos, incluyendo la verificación y calibración de las máquinas de prueba de dureza. El procedimiento consiste en realizar una indentación sobre la muestra con una bola de acero mediante una fuerza aplicada, la magnitud y tiempo de aplicación de esta fuerza varían dependiendo del material a analizar. Por lo general, el tamaño de la bola estándar es de 10

mm, y para metales blandos, se pueden utilizar fuerzas desde 100 hasta 250 kgf. Con estos datos y la siguiente ecuación se puede encontrar el valor de dureza Brinell que se denota con el símbolo HBW:

$$= 0.102 \times \frac{F}{D^2 - d^2}$$

Donde:

**D**= Diámetro de la bola, mm

**F**= Carga aplicada, N

**d**= Diámetro de la indentación, mm

No se requiere que la probeta a ensayar tenga una forma o tamaño especial, pero su espesor debe ser al menos diez veces la profundidad de la indentación. Para realizar las indentaciones, se debe cumplir con una distancia de al menos dos veces y media el diámetro de la misma, entre centros y entre centro y borde. La superficie sobre la que se va a realizar la hendidura debe ser limada, rectificadora o mecanizada, con el fin de que la hendidura se muestre claramente y permita la medición de su diámetro con alta precisión. Se medirán dos diámetros de una indentación en ángulo recto, y el promedio se usará como base para el cálculo, se pueden usar dispositivos de medición portátil o dispositivos de medición micrométrica.

#### *1.9.1.2 Dureza Vickers*

Este tipo de ensayo es muy similar al de dureza Brinell, la diferencia es el tipo de penetrador, que para este caso es de forma piramidal de diamante con un ángulo de 130° entre sus caras y con base cuadrada. El método consiste en medir la diagonal de la huella dejada por el indentador después de quitar la carga, donde el valor de dureza Vickers se define como el cociente entre la carga y la huella. A esa prueba también se la conoce con el nombre de ensayo de micro dureza y es adecuado para una amplia gama de aplicaciones, recomendado para durezas superiores a 500 HB. En las normas ASTM E384 e ISO 6507 se detallan todos los parámetros y factores necesarios para realizar correctamente el ensayo de dureza Vickers (Esparza, 1998, p.3).

### **1.10 Software de tratamiento estadístico SPSS**

Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó el software SPSS en su versión IBM SPSS Statistics 23.0, el cual es muy popular entre las distintas investigaciones científicas y de orden social, y que a pesar de tener una interfaz bastante sencilla de manejo el programa brinda una gran capacidad de gestión de datos de manera efectiva, ya que en su programación posee una base de procesamiento con distintos tipos de análisis como son: estadísticas descriptivas (frecuencias, medias, desviación estándar), hasta estadísticas bivariadas como análisis de varianza, regresión, representación gráfica de los datos, pruebas T, ANOVA y de correlación (Castañeda 2010, 15). Además, la funcionalidad de este programa estadístico se complementará con el uso del tradicional *Microsoft Excel* aportando una herramienta gráfica para la comparativa de los datos analizados.

### **1.11 Pruebas de Kolmogórov-Smirnov y Scheffe**

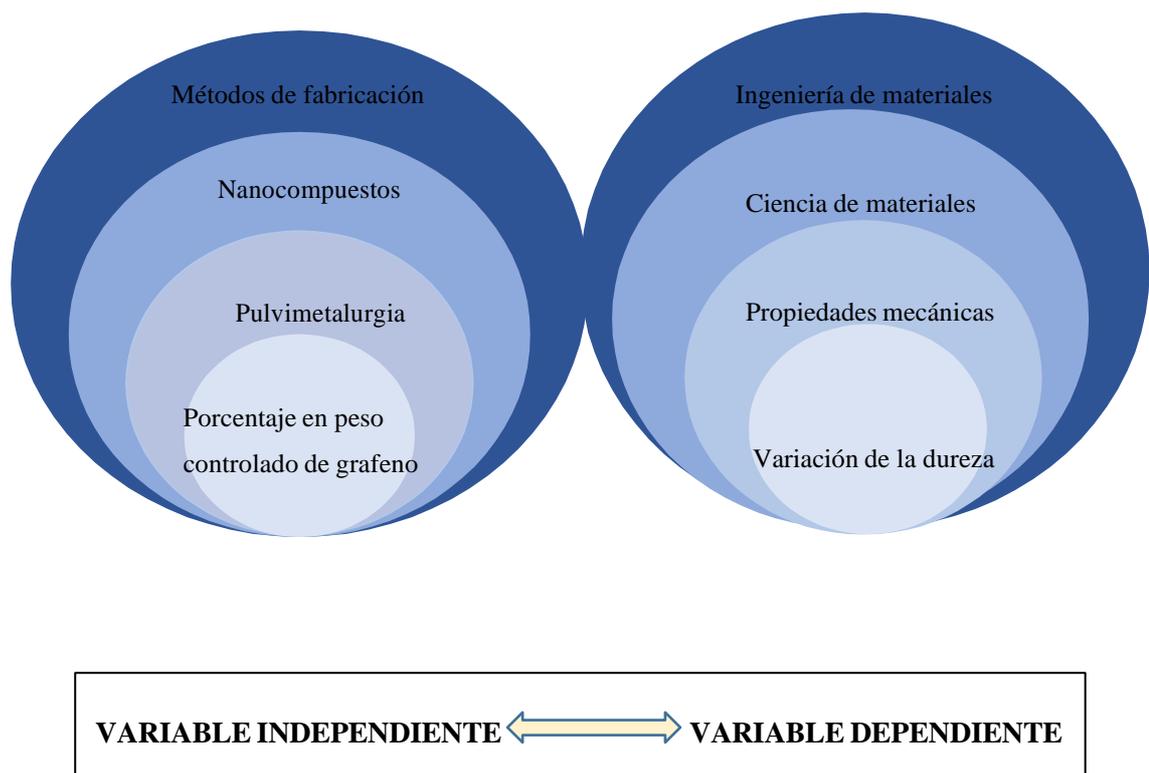
La prueba de Kolmogórov-Smirnov es parte de la estadística inferencial y nos permite comprobar si en nuestra muestra obtenida existe o no una distribución normal, esto mediante la medición del grado de concordancia entre los valores de las funciones de la distribución de los datos obtenidos con una distribución teórica específica, el estadístico de prueba  $z$  se calcula en función de la máxima diferencia entre ambas funciones:  $D = \max |F_*(x) - F_0(x)|$  siendo  $F_*(x)$  la función de distribución muestral y  $F_0(x)$  la función teórica correspondiente a la población especificada en la hipótesis nula. La necesidad de la aplicación de esta prueba en el presente estudio radica en que para la realización del análisis de varianza ANOVA es necesario saber si la metodología aplicable es de índole paramétrico o no paramétrico (Mitjana & Ruiz, 2021, p. 2). En cuanto al análisis estadístico propuesto por Henry Scheffé la importancia del mismo radica en que nos permite realizar comparaciones múltiples en un análisis de regresión lineal como es el caso del aplicado en análisis de varianza ANOVA; en un solo paso el método Scheffé nos contrasta las medias de un nivel de factor, teniendo un procedimiento similar al Working-Hotelling, de esta manera se sabe si existen diferencias significativas particulares entre los distintos grupos de la población.

### **1.12 ANOVA**

El análisis factorial ANOVA nos brinda el estudio del efecto de factores sobre la media de una variable continua a través del procesamiento de sus varianzas, al trabajar con este tipo de análisis se parte de la hipótesis nula, la cual es que la media estudiada es la misma en los diferentes grupos y la hipótesis de trabajo es que al menos dos de los grupos analizados poseen medias significativamente distintas. La herramienta consiste en extraer las medias de todos los grupos de

estudio para proceder a comparar sus varianzas, esto a través de la comparativa entre la varianza de cada grupo con la varianza promedio de toda la muestra, tendremos variaciones estadísticas significativas conforme las medias de cada grupo más se alejen entre sí. El estadístico ANOVA sigue el modelo F de Fisher-Snedecor, el cual indica que mientras las varianzas de los grupos que están siendo comparadas más se alejan de la varianza promedio de la muestra el estadístico F adquiere un valor mayor a 1, un valor de 1 indica que la varianza de los grupos es igual a la varianza promedio aceptándose así la hipótesis nula. Cuando un análisis de varianza nos da como resultado un estadístico F mayor a uno es conveniente realizar una comparación múltiple de medias, ya que, el estadístico ANOVA solo nos demuestra que, si existe al menos diferencia significativa de medias entre dos grupos, pero no entre cuales (Amat, 2016).

### 1.13 Categoría fundamental



**Gráfico 1-1.** Variables del trabajo de investigación.

Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

## **1.14 Hipótesis general y específicas**

### ***1.14.1 Hipótesis general***

$H_0$  = No existe variación en la dureza del aluminio por adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

$H_i$  = Existe variación en la dureza del aluminio por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

### ***1.14.2 Hipótesis específicas***

A mayor cantidad de grafeno utilizado, el aluminio presentará mayor dureza.

La dureza del aluminio se ve afectada por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

El tratamiento con mayor porcentaje en peso de grafeno será el más adecuado para la producción de compuestos metálicos de aluminio-grafeno.

## **1.15 Señalamiento de variables**

### ***1.15.1 Variable independiente***

Concentración de grafeno.

### ***1.15.2 Variable dependiente***

Dureza.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el diseño de la investigación que comprende el enfoque, la modalidad y los niveles de esta investigación. Además, de manera objetiva se realiza un análisis de operacionalización de las variables dependiente e independiente que ayudará a la comprensión del objetivo y metodología para llevar a cabo el proceso experimental. Finalmente se presenta de manera sistemática la metodología del proceso experimental con todos sus pasos detallados para la obtención del producto, para su posterior ensayo y análisis de resultados.

#### 2.1 Enfoque

La investigación tiene como enfoque determinar y comparar la dureza de nanocompuestos metálicos de aleación aluminio grafeno con el material base, a partir de técnicas estandarizadas en los procesos y ensayos desarrollados. Se emplea un enfoque cuantitativo debido a la característica experimental de la investigación, recolectando datos de las pruebas realizadas para su posterior procesamiento, análisis de resultados y validación de hipótesis mediante tratamiento estadístico para determinar la muestra con mayor dureza.

#### 2.2 Modalidad básica de la investigación

##### 2.2.1 *Investigación documental*

En el proceso documental es necesaria la recolección de información sobre las aleaciones y los compuestos de carbono con base de matriz metálica, con la finalidad de obtener información actualizada y validada. La información analizada se obtuvo de investigaciones y publicaciones en: libros, revistas científicas, repositorios digitales, tesis de grado, artículos técnicos, etc. Como resultado se tienen variables, factores y parámetros que interviene en el estudio, que es necesario para un diseño adecuado de la investigación.

##### 2.2.2 *Investigación de campo*

La investigación de campo es necesaria para la obtención de las muestras y realización del ensayo de dureza bajo la norma ASTM correspondiente, con el fin de obtener, analizar y procesar los

resultados provenientes de los ensayos. El correcto uso de los equipos y materiales de los laboratorios de la escuela de ingeniería mecánica en la ESPOCH, para obtener las propiedades mecánicas con los parámetros de variación establecidos.

### ***2.2.3 Investigación experimental***

El procedimiento experimental está enfocado en comparar la dureza de un aluminio base con una aleación en porcentajes controlados de grafeno en el orden del 1, 2 y 3 por ciento en peso. La técnica de pulvimetalurgia es la elegida para producir los compuestos debido a la facilidad que esta presenta, teniendo los mismos parámetros de composición química, prensado y sinterizado en todas las probetas. El material base utilizado es polvo fino de aluminio con un 98% de pureza de la marca *Loba Chemie*, mientras que el material aleante es polvo de grafeno de pocas capas y 98% de pureza. Obtenido de *Easchem Co*.

## **2.3 Niveles de la investigación**

### ***2.3.1 Pre-Experimental***

El investigador realiza el trabajo experimental para obtener las muestras a analizar, controlando y variando únicamente los valores de la variable independiente. También existe un control de las demás variables del proceso como la mezcla, compactación y sinterización, que, aunque no intervienen en el análisis, son fundamentales para obtener buenos resultados. Cabe recalcar que se necesitó hacer unas primeras experimentaciones para observar el comportamiento de los materiales bajo diferentes circunstancias de temperatura, presión y mezcla de los mismos, con el fin de tener un primer contacto tanto con los materiales como con los equipos a utilizar durante el procedimiento.

### ***2.3.2 Longitudinal***

Al realizar el seguimiento a un mismo proceso y variables de investigación durante un período determinado, se habla de un estudio de carácter longitudinal. Mediante el proceso de pulvimetalurgia que tiene cuatro pasos básicos predeterminados, y el control en la variación de los porcentajes en peso de grafeno, durante el proceso de obtención de muestras, toma relevancia la correcta manipulación de estos parámetros para finalmente analizar la dureza obtenida en cada probeta.

### 2.3.3 Analítico

La investigación consta con dos variables de interés analítico, la dureza como variable dependiente, y por otro lado la aleación mecánica como variable independiente. Estos son los dos puntos básicos y bien definidos para llevar a cabo la investigación.

## 2.4 Población y muestra

### 2.4.1 Población

Aleación mecánica de polvo de aluminio extra puro, con diferentes y controlados porcentajes en peso de grafeno, mediante un proceso de mezcla, compactación y sinterización.

### 2.4.2 Muestra

Se aplica la técnica de muestreo no probabilística, por razones de coste y de disponibilidad del elemento aleante (grafeno). Basándose en los criterios de selección y de muestreo por conveniencia, además de relaciones con estudios e investigaciones previas, se determina el número mínimo requerido de probetas, que para el presente caso de estudio es de tres para cada tipo.

En la tabla 7-2 se especifica los parámetros del procedimiento como temperatura de sinterización, presión de compactación y su respectiva norma para el ensayo de dureza mediante ASTM E10.

**Tabla 1-2:** Muestras de estudio.

Ensayo	Norma	Grafeno (%)	P. Compactación (MPa)	T. Sinterización (°C)	No. Probetas
Dureza Brinell	ASTM E10	0	154	590	3
		1	154	590	3
		2	154	590	3
		3	154	590	3

Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

## 2.5 Operacionalización de las variables

**Tabla 2-2:** Operacionalización de las variables

Variable	Concepto	Indicador	Índice	Instrumento
Concentración de grafeno	Adición del material aleante	Porcentaje en peso de grafeno	1%, 2% y 3%	Balanza digital
Dureza	Ensayo para determinar la dureza Brinell	Resistencia a la penetración	15-40 HB	Durómetro Brinell

Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

## 2.6 Matriz de consistencia

**Tabla 3-2:** Matriz de consistencia.

Problema general	Objetivo general		Hipótesis general	
¿Existe variación en la dureza del aluminio por la adición de tres diferentes concentraciones de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia?	Determinar la variación en la dureza del aluminio por la adición de tres diferentes concentraciones de grafeno mediante un proceso de pulvimetalurgia.		Existe variación en la dureza del aluminio por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables	Métodos de análisis

¿Qué concentración en peso de grafeno es la óptima para mejorar la dureza de compuestos de aluminio producidos por el método de metalurgia de polvos?	Producir mediante el método de pulvimetalurgia compuestos metálicos de aluminio – grafeno en tres concentraciones distintas de 1, 2 y 3 % en peso de grafeno.	A mayor cantidad de grafeno utilizado, el aluminio presentará mayor dureza.	Independiente: Concentración de grafeno	Porcentaje en peso
¿Existe influencia del grafeno en la dureza de compuestos metálicos de aluminio producidos por pulvimetalurgia?	Determinar la dureza de los compuestos producidos y un blanco de prueba mediante el ensayo de dureza Brinell.	La dureza del aluminio se ve afectada por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.	Dependiente: Dureza	Ensayo de dureza Brinell
¿Qué tratamiento utilizado es el mejor para producir compuestos de aluminio con una elevada dureza?	Establecer la influencia del porcentaje en peso de grafeno utilizado en cada compuesto mediante tratamiento estadístico y determinar la muestra con mayor dureza producida.	El tratamiento con mayor porcentaje en peso de grafeno será el más adecuado para la producción de compuestos metálicos de aluminio-grafeno.	Inventario	ANOVA

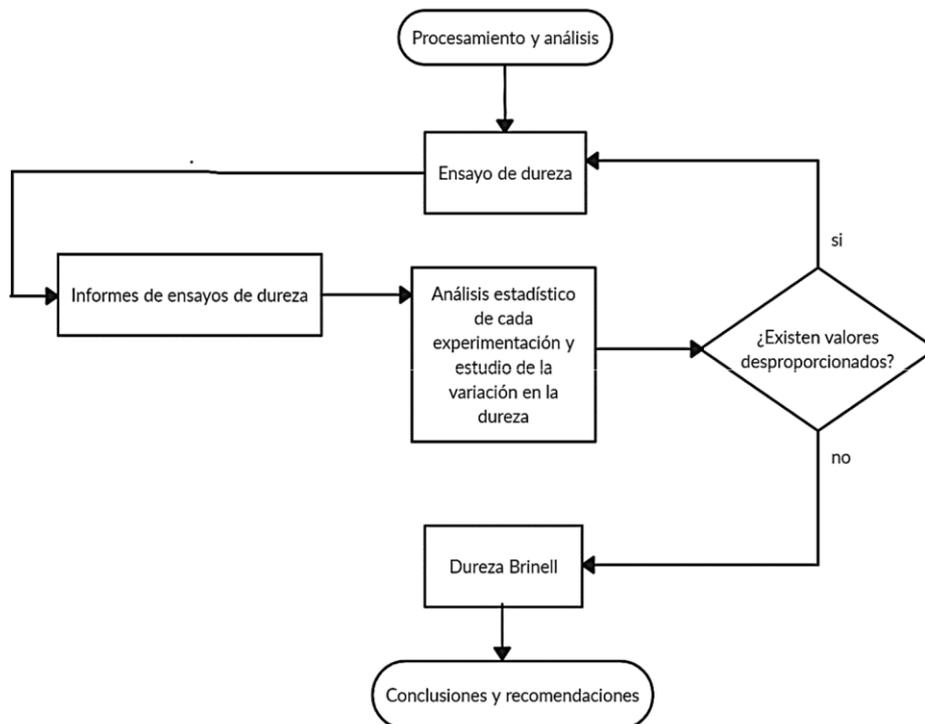
**Realizado por:** Goyes Jhonatan, 2020

## 2.7 Recolección de información

Se estudian tres casos de nanocompuestos para compararlos con un blanco de prueba, mediante la técnica de documentación se recopiló información de diferentes fuentes como: libros, tesis relacionadas y artículos técnicos. Se tomó un primer contacto con lo referente a la obtención de compuestos de aluminio y ensayos de dureza en los respectivos laboratorios de la facultad de ingeniería mecánica. Una vez considerada la información suficiente, se procede al almacenamiento de los datos más representativos. El objetivo de esta recolección de información es disponer de información validada y actualizada en lo referente a nanocompuestos de matriz metálica que sirvan como un parámetro de entrada en la investigación.

## 2.8 Procesamiento y análisis de la información

A partir de los datos obtenidos de la fase experimental, es necesario clasificarla y organizarla de manera que se haga fácil su interpretación. Para ello se utiliza la técnica de análisis de varianza o ANOVA para comparar las medias de los grupos en estudio. Esta técnica estadística es la que mejor se acopla al experimento presentado ya que se puede comparar múltiples medias mediante el uso de las varianzas.

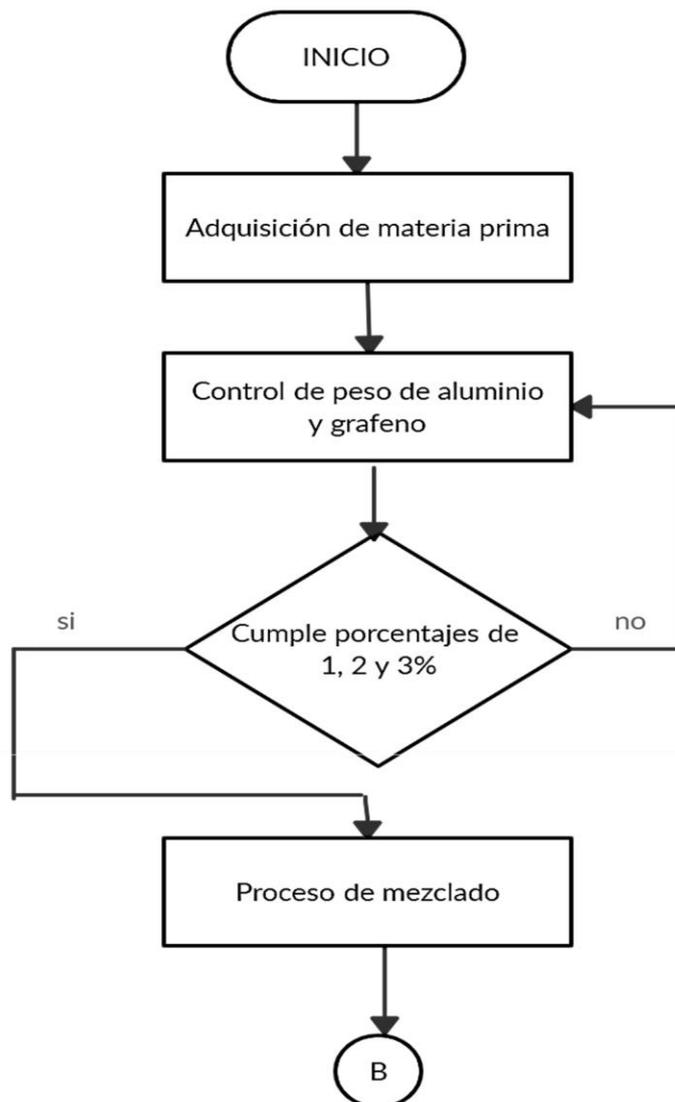


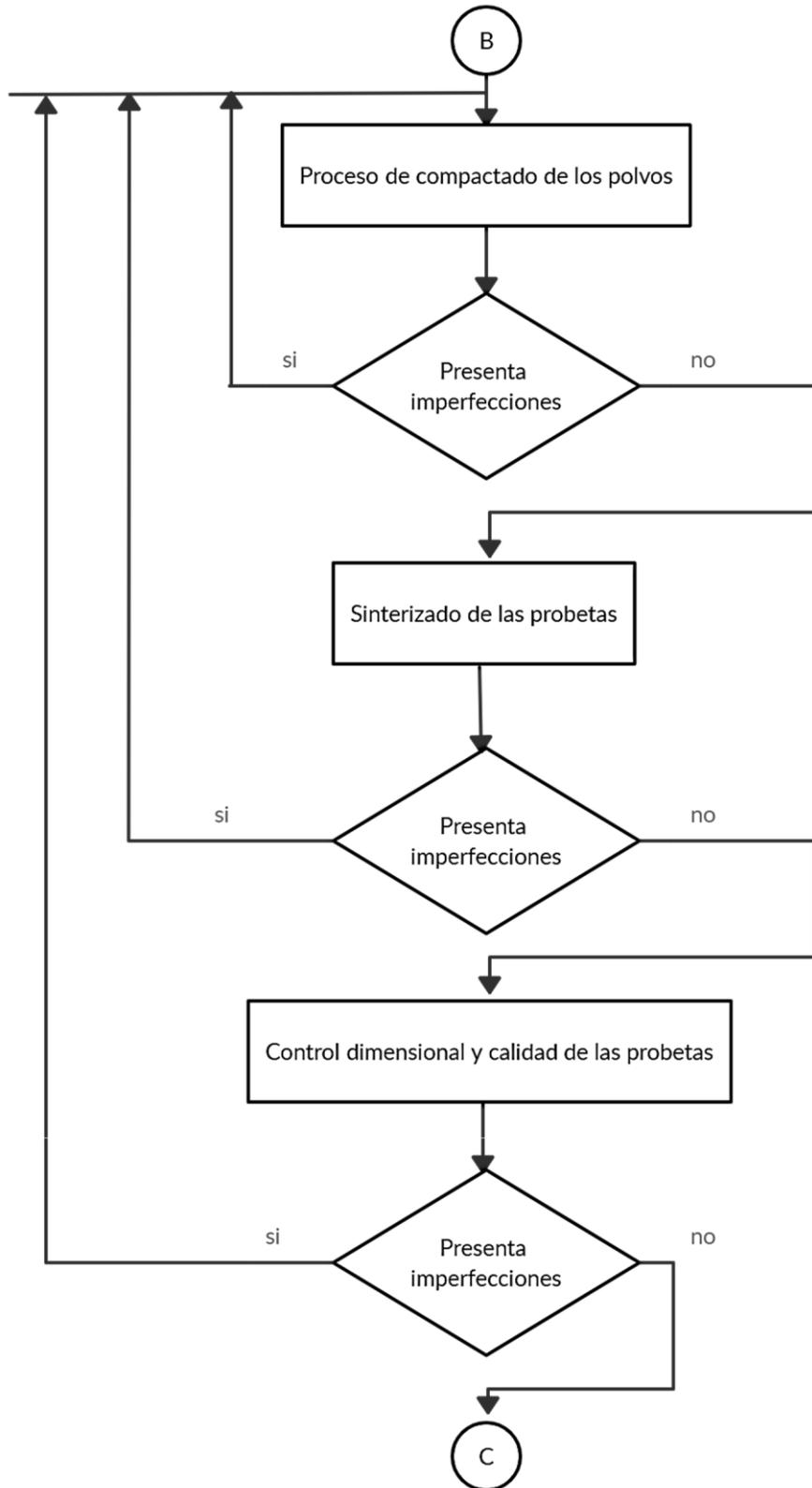
**Gráfico 1-2.** Proceso y análisis de los datos obtenidos.

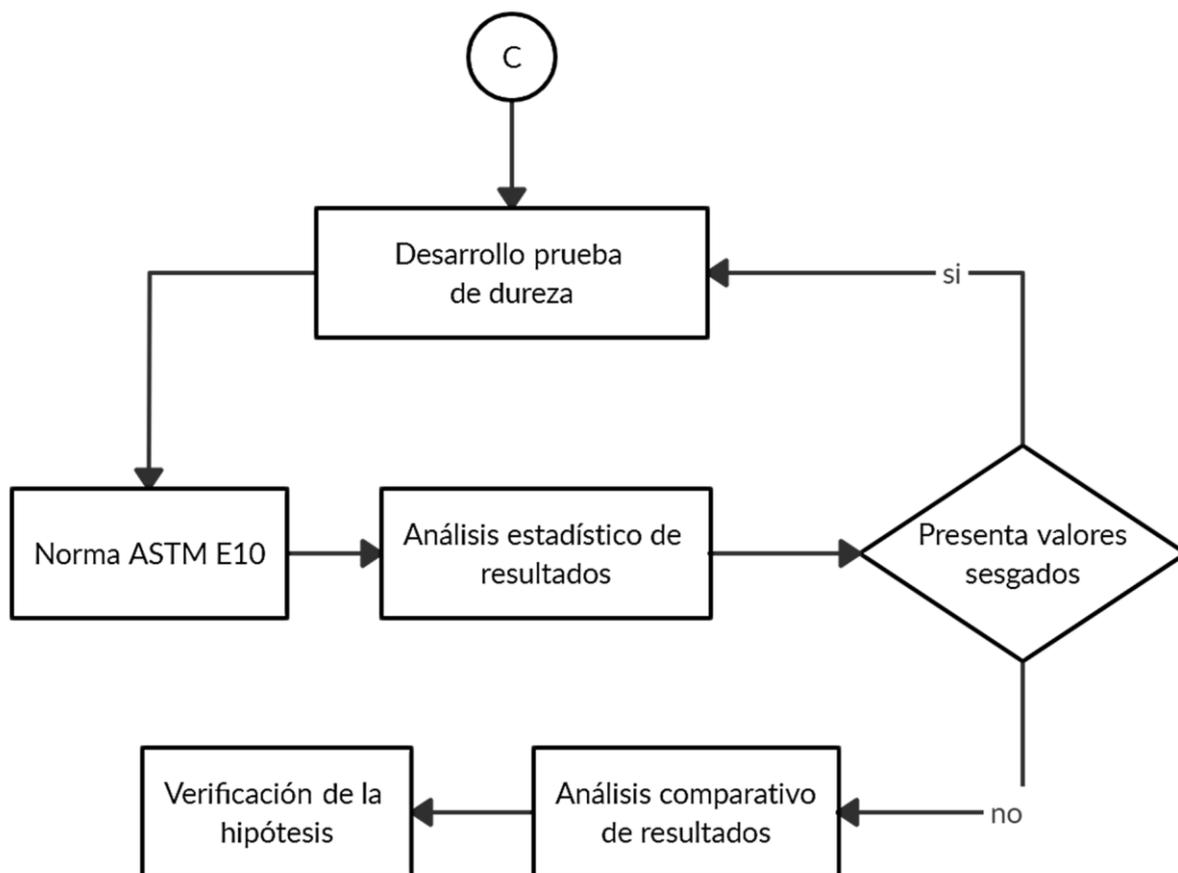
Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

## 2.9 Metodología del proceso experimental

Se presenta una metodología desarrollada sistemáticamente mediante un diagrama de flujo para facilitar el entendimiento de las partes que componen el presente trabajo de investigación, se detalla cada procedimiento y prueba para la obtención de las probetas, así como el análisis de los resultados de las mismas.







**Gráfico 2-2.** Proceso metodológico experimental.

Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

## 2.10 Equipos y materiales

### 2.10.1 Equipos

**Tabla 4-2:** Equipos utilizados.

Equipo	Procedimiento
Balanza digital	Peso del aluminio y grafeno
Máquina Universal	Compactado de las probetas
Horno de mufla	Sinterización
Durómetro Brinell	Medición de dureza

Realizado por: Goyes Jhonatan. 2020

### **2.10.2 Materiales**

Para la fabricación de las diferentes muestras se utilizaron los siguientes materiales:

- Polvo fino de aluminio extra puro
- Grafeno de alta pureza y pocas capas
- Molde de probetas
- Guantes
- Mascarilla
- Mandil
- Espátula
- Calibrador
- Contenedores de 75 g

### **2.11 Procedimiento experimental**

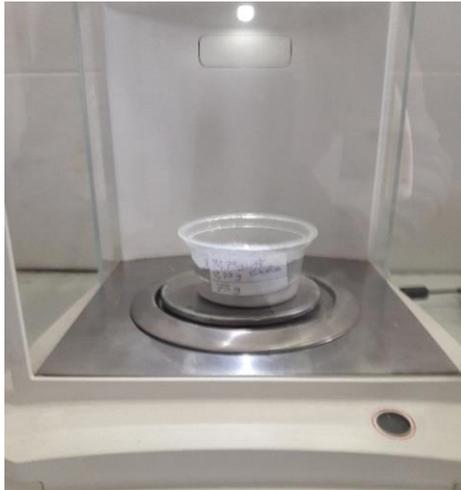
#### **2.11.1 Adquisición de la materia prima**

El material base es polvo fino de aluminio con una pureza de hasta el 98% adquirido a través de la empresa *Labdin Instruments* localizada en la ciudad de Quito, en el anexo A se muestra la ficha técnica del producto elaborado por *Loba Chemie* y todas sus propiedades.

El material aleante es polvo de grafeno con una pureza de 98% de pocas capas (entre 1 y 3 capas), lo que lo convierte en un grafeno de alta calidad. Este producto se importó de China con la empresa fabricante *Easchem Co. Limited*, en el anexo C se muestran todas las especificaciones y propiedades de este material.

#### **2.11.2 Pesaje de los elementos aleantes**

Una vez adquirida la materia prima se procede a pesar el aluminio y el grafeno en la balanza analítica de la siguiente manera: 74.25 g de aluminio y 0.75 g de grafeno para los compuestos al 1%, 73.5 g de aluminio y 1.5 g de grafeno para los compuestos al 2%, 72.75 g de aluminio y 2.25 g de grafeno para los compuestos al 3%, y finalmente, 75 g de aluminio para los blancos de comparación.



**Figura 1-2.** Pesaje de los compuestos

**Realizado por:** Goyes. Jhonatan. 2020

### ***2.11.3 Mezclado de los elementos aleantes***

Una vez definida las masas para cada caso de estudio, se procede a realizar la mezcla de los elementos con un agitador manual por un tiempo de 8 minutos, esto se realiza hasta que el observador note una dispersión lo más homogénea posible, evitando la concentración del elemento aleante en una zona específica, ya que esto puede traer resultados negativos en procesos posteriores.



**Figura 2-2.** Proceso de mezclado.

**Realizado por:** Goyes. Jhonatan. 2020

### ***2.11.4 Proceso de compactación***

En esta fase se busca compactar los polvos para obtener la forma final de las probetas deseadas, teniendo estas la capacidad para resistir la carga y descarga de los dispositivos de compactación,

además de resistir el proceso final de sinterización. Se realizó una compactación uniaxial bajo una presión de compactación de 154 MPa utilizando una prensa hidráulica. Las muestras compactadas tienen 45 mm de diámetro y 18 mm de longitud, llamadas muestras verdes compactadas (Madhava, 2016).



**Figura 3-2.** Proceso de compactación.

**Realizado por:** Goyes, Jhonatan. 2020

Una vez compactadas las 12 muestras de estudio se procede a una inspección visual de fallas como roturas, fracturas, compactación incompleta y dimensiones. Si cada una de las muestras cumplen los requisitos esperados pueden pasar a la siguiente fase de estudio.



**Figura 4-2.** Muestras verdes compactadas.

**Realizado por:** Goyes, Jhonatan. 2020

### ***2.11.5 Proceso de sinterización***

El objetivo del proceso de sinterización es obtener una retención sólida entre partículas, de manera general, este proceso se basa en el calentamiento total de los polvos compactados. Las muestras verdes se colocan en el horno de mufla a una temperatura de 590 °C durante un período de 5 horas, luego se apaga el horno y se espera a que las muestras alcancen la temperatura ambiente para poder ser manipuladas. El resultado de este proceso es favorecer a la calidad mecánica, la densidad y su control dimensional.



**Figura 5-2.** Selección de la temperatura de sinterización en el horno de mufla.

**Realizado por:** Goyes. Jhonatan. 2020

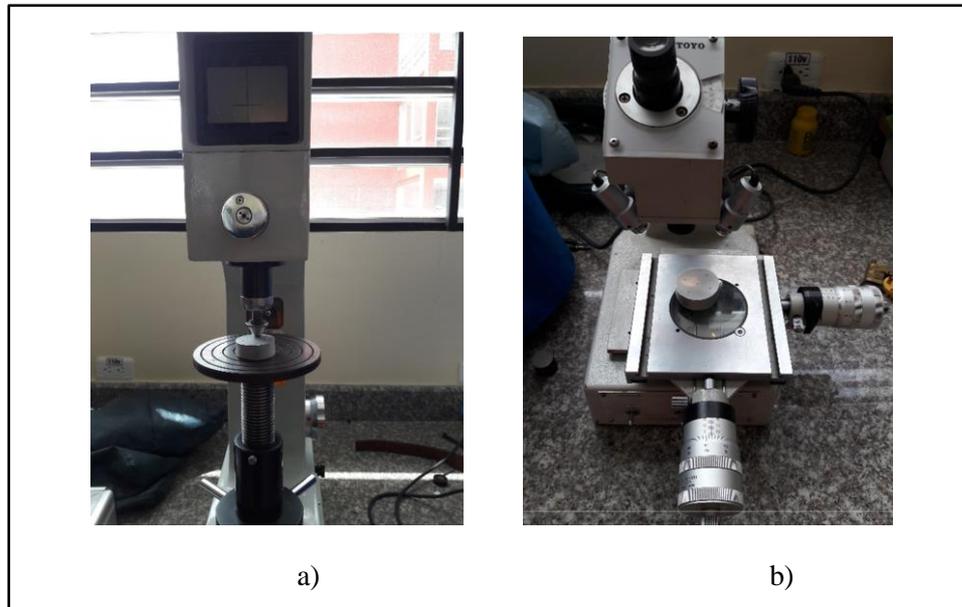
### ***2.11.6 Preparación de las muestras obtenidas***

Las muestras se preparan de acuerdo a los requerimientos de tamaño, grosor y acabado superficial que establece la norma ASTM E10 para un adecuado desarrollo del ensayo de dureza. Cada una de las muestras fueron limadas y pulidas con material abrasivo de modo que cumplan estas condiciones, especialmente un buen acabado superficial para poder identificar las indentaciones y facilitar la lectura de sus medidas. Finalmente, se evidencia que las muestras no presentan defectos ni protuberancias que puedan incidir negativamente en la aplicación de la fuerza para realizar la muesca en la medición de la dureza.

### ***2.11.7 Ensayo de dureza Brinell***

Las pruebas de dureza se realizaron conforme a los requisitos establecidos en la norma ASTM E10. Se utilizó un diámetro de bola de 2.5 mm, una carga de 306 N por un tiempo estimado de 10

a 15 segundos. Se optó por tomar 5 medidas en cada muestra para mejorar el procesamiento y análisis de resultados. La distancia entre hendiduras y distancia al borde cumple con el requerimiento de al menos ser 2.5 veces el diámetro de la muesca. De igual manera, la lectura de medidas de diámetros, se realizó con el microscopio para lectura de huella, tomando los dos diámetros en ángulo recto entre sí y sacando un valor promedio para el cálculo de dureza.



**Figura 6-2.** a) Ensayo de dureza, b) Medición de huella.

**Realizado por:** Goyes. Jhonatan. 2020

## 2.12 Tipo y diseño de la investigación

Un diseño completamente al azar (DCA) y el análisis de la varianza (ANOVA) se utilizaron para la presente investigación, ya que este tipo de diseño permite comparar dos o más tratamientos analizando la fuente de variabilidad y el error aleatorio. Se fabricaron 12 probetas por el método de pulvimetalurgia con tres niveles diferentes de grafeno (1%, 2% y 3%), comparando los resultados obtenidos con probetas de aluminio sin contenido de grafeno. Se asignó 3 muestras para cada tratamiento, manteniendo constantes las variables de presión y temperatura en todos los tratamientos, y únicamente variando el contenido de grafeno para su respectivo caso. Se tiene entonces claramente identificada la variable de respuesta que es la propiedad mecánica de dureza, la unidad experimental es la probeta metálica de aluminio-grafeno, y el factor la dosificación de grafeno.

Las repeticiones experimentales se realizan en orden completamente aleatorio, ya que no se tienen en cuenta demás factores de interés. Los ensayos hechos a las probetas se realizan al azar, con el

fin de que los efectos ambientales, temporales e instrumentales se vayan repartiendo de manera equitativa en todos los tratamientos de estudio. A continuación, se describe el modelo estadístico de carácter lineal aditivo:

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij}$$

Donde:

$x_{ij}$  = Variable en observación

$\mu$  = Media global

$\alpha_i$  = Efecto de los tratamientos

$\beta_{ij}$  = Efecto de las perturbaciones o error experimental

En la tabla 5-2, se resume el esquema del experimento, con sus respectivos tratamientos y codificaciones.

**Tabla 5-2:** Esquema del experimento.

Tratamiento	Codificación	Medidas de dureza	Tamaño de la unidad experimental	Muestras
Pulvimetalurgia 100% Al	T0	5	1	3
Pulvimetalurgia 1% Gr	T1	5	1	3
Pulvimetalurgia 2% Gr	T2	5	1	3
Pulvimetalurgia 3% Gr	T3	5	1	3
Total probetas				12

**Realizado por:** Goyes Jhonatan. 2020

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de datos de los resultados obtenidos en las pruebas de Dureza Brinell se realizó el estadístico ANOVA de un factor, para ello, se determinó en primera instancia la normalidad de la distribución de las medias mediante una prueba Kolmogorov-Smirnov en las muestras, para posteriormente aplicar el análisis de varianza, adicionalmente, una vez obtenido un grado de significancia alto en el estadístico ( $P < 0.05^{**}$ ) se complementó el mismo con una prueba estadística Scheffé, la cual, nos brinda la posibilidad de una comparación múltiple entre los distintos tratamientos aplicados. También se proporciona un análisis de regresión lineal a la prueba de Dureza Brinell.

#### 3.1. Análisis de los tratamientos

##### 3.1.1. Análisis de la Dureza Brinell

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de la prueba mecánica realizada a las distintas probetas producidas con los cuatro tratamientos; a cada probeta se le realizó cinco pruebas de dureza, las cuales son promediadas en la tabla 5-3 para la realización del estadístico.

**Tabla 1-3:** Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento cero T0.

Tratamiento	Muestra nº	Diámetro promedio (mm)	Dureza Brinell (HB)
T0	1	1,91	8,96
		1,92	8,84
		1,93	8,73
		1,96	8,38
		1,94	8,60
		1,90	9,08
		1,91	8,96
		1,91	8,96
		1,96	8,38
		1,93	8,73
		2	1,91
	1,90		9,08
	1,94		8,60
	1,93		8,73
	1,93		8,73
	1,94		8,60
	1,91		8,96
	1,92		8,84

		1,94	8,60
		1,94	8,60
	3	1,95	8,49
		1,93	8,73
		1,92	8,84
		1,90	9,08
		1,89	9,20
		1,92	8,84
		1,92	8,84
		1,95	8,49
		1,94	8,60
		1,90	9,08

Realizado por: Jhonatan Goyes, 2021.

**Tabla 2-3:** Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento uno T1.

Tratamiento	Muestra n°	Diámetro promedio (mm)	Dureza Brinell (HB)
T1	1	1,89	9,20
		1,88	9,32
		1,90	9,08
		1,88	9,32
		1,87	9,45
		1,88	9,32
		1,87	9,45
		1,88	9,32
		1,90	9,08
		1,89	9,20
	2	1,88	9,32
		1,87	9,45
		1,87	9,45
		1,88	9,32
		1,89	9,20
		1,90	9,08
		1,89	9,20
		1,89	9,20
		1,90	9,08
		1,89	9,20
	3	1,88	9,32
		1,90	9,08
		1,89	9,20
		1,90	9,08
		1,87	9,45
		1,88	9,32
		1,90	9,08
		1,89	9,20
		1,90	9,08
		1,87	9,45

Realizado por: Jhonatan Goyes, 2021.

**Tabla 3-3:** Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento dos T2.

Tratamiento	Muestra n°	Diámetro promedio (mm)	Dureza Brinell (HB)
T2	1	1,85	9,71
		1,87	9,45
		1,88	9,32
		1,89	9,20
		1,84	9,84
		1,89	9,20
		1,86	9,58
		1,86	9,58
		1,87	9,45
		1,88	9,32
	2	1,85	9,71
		1,89	9,20
		1,87	9,45
		1,85	9,71
		1,86	9,58
		1,88	9,32
		1,85	9,71
		1,85	9,71
		1,87	9,45
		1,89	9,20
	3	1,91	8,96
		1,86	9,58
		1,88	9,32
		1,85	9,71
		1,87	9,45
		1,86	9,58
		1,84	9,84
1,85		9,71	
1,88		9,32	
1,89	9,20		

Realizado por: Jhonatan Goyes, 2021.

**Tabla 4-3:** Resultados de las pruebas de Dureza Brinell a las unidades de experimentación del tratamiento tres T3.

Tratamiento	Muestra n°	Diámetro promedio (mm)	Dureza Brinell (HB)
T3	1	1,80	10,38
		1,82	10,11
		1,83	9,97
		1,85	9,71
		1,85	9,71
		1,83	9,97
		1,85	9,71
		1,83	9,97
		1,85	9,71
		1,80	10,38
	2	1,86	9,58
		1,83	9,97
		1,85	9,71
		1,81	10,24
		1,86	9,58

		1,82	10,11
		1,85	9,71
		1,83	9,97
		1,83	9,97
		1,84	9,84
	3	1,82	10,11
		1,85	9,71
		1,82	10,11
		1,84	9,84
		1,81	10,24
		1,85	9,71
		1,85	9,71
		1,84	9,84
		1,83	9,97
		1,84	9,84

Realizado por: Jhonatan Goyes, 2021.

**Tabla 5-3:** Resultados promedios de las pruebas de Dureza Brinell.

Tratamiento	Muestra n°	Dureza Brinell promedio (HB)
T0	1	8,76
	2	8,77
	3	8,81
T1	1	9,27
	2	9,22
	3	9,22
T2	1	9,46
	2	9,50
	3	9,36
T3	1	9,94
	2	9,86
	3	9,91

Realizado por: Jhonatan Goyes, 2021.

### 3.1.2. Análisis estadístico

Para la realización del análisis estadístico mediante el software SPSS se procedió primero a la determinación de la normalidad en la distribución de las medias mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov tabla 6-3, según la cual, se determinó que la distribución de las muestras es efectivamente normal, por lo que, se efectúa un análisis de varianza paramétrico; este análisis de varianza ANOVA demuestra que la adición de grafeno al aluminio bajo las condiciones de pulvimetalurgia reportan diferencias estadísticas significativas en cuanto a los resultados de las pruebas de dureza efectuadas ( $P < 0.05^{**}$ ), tabla 7-3. Una vez determinado que existen diferencias significativas entre las medias de los distintos tratamientos se procede a realizar un análisis de comparaciones múltiples utilizando el método de Scheffe, con el cual, se efectúa un procedimiento para determinar diferencias significativas específicas entre grupos, de esta manera, se obtuvo que existen diferencias estadísticas significativas entre todos los tratamientos aplicados tabla 8-3. De

manera adicional al análisis estadístico realizado se le suma la estadística descriptiva, con el fin de darle una mejor perspectiva al investigador referente al conjunto de datos evaluado, se describe de esta manera las características de los grupos analizados como son: media, desviación estándar, tamaño de la muestra, tabla 9-3.

**Tabla 6-3:** Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra		
		DUREZA_BRINELL
N		12
Parámetros normales	Media	9,3400
	Desviación estándar	,42336
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,145
	Positivo	,145
	Negativo	-,140
Estadístico de prueba		,145
Sig. asintótica (bilateral)		,200

Fuente: SPSS, 2021.

**Tabla 7-3:** Análisis de varianza a la Dureza Brinell por efecto de la adición de diferentes niveles de grafeno al aluminio por proceso de pulvimetalurgia.

ANOVA – DUREZA					
DUREZA_BRINELL					
	Suma de cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,955	3	,652	311,533	,00000001
Dentro de grupos	,017	8	,002		
Total	1,972	11			

Fuente: SPSS, 2021.

**Tabla 8-3:** Comparaciones múltiples – Método de Scheffe.

Comparaciones múltiples				
Variable dependiente: Dureza				
Scheffe				
(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
T0	T1	-,45667*	,03734	,000
	T2	-,66000*	,03734	,000
	T3	-1,12333*	,03734	,000
T1	T0	,45667*	,03734	,001
	T2	-,20333	,03734	,005
	T3	-,66667*	,03734	,000
T2	T0	,66000*	,03734	,000
	T1	,20333	,03734	,005
	T3	-,46333*	,03734	,000
T3	T0	1,12333*	,03734	,000
	T1	,66667*	,03734	,000
	T2	,46333*	,03734	,000

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

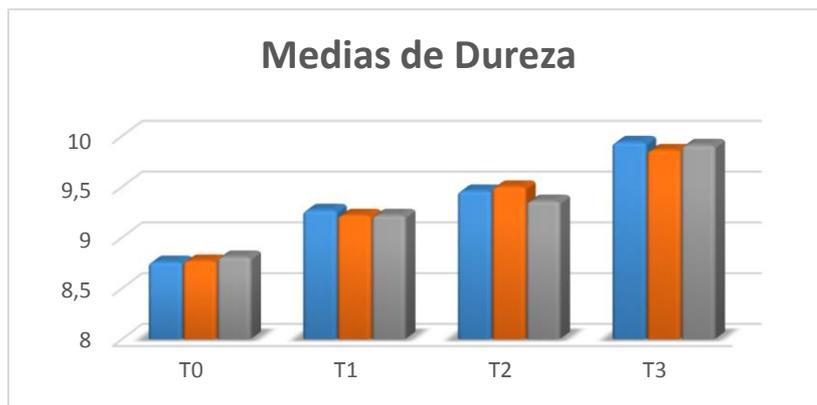
Fuente: SPSS, 2021.

**Tabla 9-3:** Estadística descriptiva.

Descriptivos - Dureza								
	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
T0	3	8,7800	,02646	,01528	8,7143	8,8457	8,76	8,81
T1	3	9,2367	,02887	,01667	9,1650	9,3084	9,22	9,27
T2	3	9,4400	,07211	,04163	9,2609	9,6191	9,36	9,50
T3	3	9,9033	,04041	,02333	9,8029	10,0037	9,86	9,94
Total	12	9,3400	,42336	,12221	9,0710	9,6090	8,76	9,94

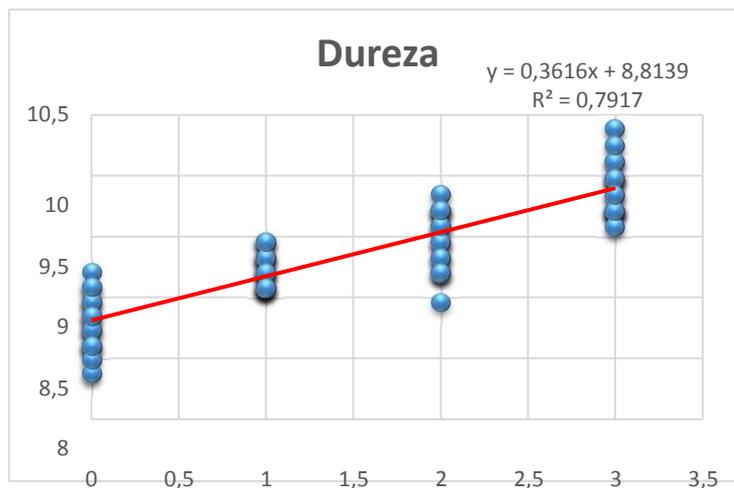
Fuente: SPSS, 2021.

Continuando con el análisis numérico de los datos, se reportaron medias máximas de 8,81 HB en la prueba de Dureza Brinell cuando no se añadió grafeno a las probetas, mientras que al adicionar 1% de grafeno mediante el proceso de pulvimetalurgia se reportó una máxima de 9,27 HB, de manera seguida se tiene al tratamiento con 2% de grafeno en peso que obtuvo un valor máximo de 9,50 HB y finalmente el de mayor escala de dureza que fue el tratamiento con 3% de grafeno en peso con un valor de 9,94 HB; considerándose así que, el mejor tratamiento es el T3 dado que reporta la mayor escala de dureza reportada, lo cual, se ilustra en el gráfico 1-3. En la prueba de regresión realizada a la Dureza Brinell, gráfico 2-3, se evidencia una tendencia lineal en donde partiendo de un intercepto de 8,813 las medias aumentan en 0,3616 puntos por porcentaje de grafeno añadido, la regresión reportó un coeficiente de correlación igual a 79,17 % mientras tanto que el restante 20,83% depende de factores no controlados en la investigación como por ejemplo condiciones climáticas, atmosféricas, la pureza y calidad de las sustancias químicas adicionadas, etc., tomando en cuenta estos factores la ecuación aplicada para la regresión de la Dureza Brinell fue:  $y = 0,3616x + 8,813$ .



**Gráfico 1-3.** Dureza Brinell de las diferentes concentraciones.

Realizado por: Goyes Jhonatan, 2021.



**Gráfico 2-3.** Regresión de la prueba de Dureza Brinell.

Realizado por: Goyes Jhonatan, 2021.

### 3.2. Discusión de resultados

En el análisis de resultados se evaluó que al aumentar la cantidad de grafeno en las probetas de aluminio mediante el método de pulvimetalurgia se alcanzan mejores características en las propiedades, como es la dureza en este caso particular, esta fue medida mediante el método de Dureza Brinell según la cual se evidenció que a mayor cantidad de grafeno mayor es la cantidad de dureza que las probetas presentan, llegando así, a determinarse una mejora en el rendimiento en comparación con el blanco de prueba el cual no posee grafeno en su composición, esta mejora fue de aproximadamente el 5.22 % respecto al T1, 7.83 % al T2 y 12.86 % al T3, el objetivo de la investigación fue conseguir un material con una buena resistencia mecánica y una vez conseguido se puede prever una formación y distribución de grafeno uniforme y dispersa en toda su sección transversal de las probetas con lo cual se lograría un compuesto de alta calidad. Estos rendimientos alcanzados mediante pulvimetalurgia se comparan con otros como es el realizado por (Yolshina et al., 2016) : “Nuevos compuestos metálicos de aluminio-grafeno y aluminio-grafito: síntesis y propiedades” propuesta en la cual se utiliza la interacción química con el fin de alcanzar mejorar las propiedades del compuesto ; para determinar la mejora en cuanto a la propiedad de dureza llevaron a cabo una prueba de dureza “Vickers” en las cuales se manejó dos concentraciones de grafeno, una de 1% que reporto una mejora del 171,05% respecto al blanco y una de 2% de grafeno con 242% en referencia al aluminio prístino, cabe recalcar que los métodos utilizados aquí para la producción de compuestos son más complejos con lo que hace referencia a la necesidad de mayor tecnología y economía para los mismo, no así con el método aplicado en el presente estudio el cual provee de una metodología evidentemente de bajo costo y fácil aplicación.

Siguiendo con los métodos de reforzamiento de metales mediante la adición de grafeno podemos citar el realizado por (Zhang et al., 2018)., en el cual utilizó la reducción de óxido de grafeno in situ en partículas de aluminio para la formación de compuestos, se llevó a cabo pulvimetalurgia al igual que en el presente trabajo ; para la determinación de la escala de dureza de los distintos tratamientos se realizaron pruebas de dureza Vickers a las muestras, logrando un máximo de incremento de la dureza del 21.1% respecto al aluminio prístino, lo cual evidencia que existe una mejora notable en la propiedad físico – mecánica de los compuestos al trabajarlos por pulvimetalurgia, comparado igualmente con el alcanzado en esta investigación de 12.86 %, sin embargo, en contraposición con la metodología de interacción química anteriormente mencionada presenta una desventaja importante ya que a pesar de promover mejoras en la escala de dureza , estas se mantienen alejadas de los resultados alcanzados con la metodología de interacción química llegando a no ser ni el 50% de los valores alcanzados en esta. Otro trabajo realizado para el reforzamiento del aluminio fue el presentado por (Manuel Mendoza-Duarte et al., 2016). , en el cual, se utilizó grafito, aluminio y cobre en forma de polvo utilizando sinterización y molienda para la producción de los compuestos, una vez obtenidos los mismos se procedió a realizar pruebas de dureza Rockwell reportando una mejora de la propiedad físico – mecánica del 36% respecto al blanco de prueba; con esto podemos determinar que los trabajos de pulvimetalurgia que utilizan el grafeno para la mejora de la propiedad físico – mecánica del aluminio son eficientes en torno al 12% a 36% , porcentaje evidenciado en los distintos trabajos realizados, este porcentaje puede ser menor o mayor dependiendo del uso y modificación de otras variables independientes como son: sustancias químicas en el proceso, como el cobre, o los tiempos de distintos procesos como es el fresado en el segundo estudio mencionado, es así, que se puede prever mejores resultados al presente trabajo cambiando condiciones de trabajo como son: tiempos, temperaturas, sustancias químicas utilizadas, entre otros.

Finalmente, se menciona otro estudio que si bien no es de reforzamiento de aluminio muestra claramente la importancia en la selección de la metodología para obtener un resultado importante en la escala de dureza de los materiales, y es el propuesto por Chen L. et al., (2012), en la cual se buscó un nuevo método de incorporación de grafeno en una matriz de magnesio haciendo uso de procesos combinados de ultrasonido en estado líquido y remoción en estado sólido, una vez obtenido el compuesto se realizó las pruebas de micro dureza que evidenciaron que con el uso de 1.2 % vol. de grafeno se puede obtener un compuesto 78 % más duro que la muestra de magnesio prístino. Es claro que teniendo varios métodos disponibles de producción de compuestos metal-grafeno es importante saber trabajar con cada una de sus variables dependientes para llegar un resultado fiable, y ahondando más en la metodología es recomendable usar no solo la variación de variables sino también la combinación de los distintos métodos tanto de producción de grafeno como de sinterización de composites , ya que es claro que un solo proceso nos da lugar a

compuestos con mejora en su propiedad de dureza de entre 12% a 36% pero que la combinación de procesos y variables llega a incrementar en más del 100% la efectividad de la dureza como es el caso del primer estudio analizado cuyo rendimiento máximo fue del 242% . De igual manera se contempla que el incremento en la dureza en los compuestos se da de manera secuencial y positiva en cuanto mayor es el contenido de grafeno utilizado, teniendo así en el presente trabajo: T0: 8,76 HB, T1: 9,27 HB, T2: 9,50 HB, T3: 9,94 HB, lo que representa una mejora del 5.22%, 7,83% y 12,86 % respectivamente, que comparados con estudios anteriores muestran la misma secuencia lineal, pero habrá que analizar hasta que medida esta variable aporta los beneficios buscados.

Una vez obtenidos los datos de las pruebas de dureza Brinell se complementa la investigación con una regresión estadística, la cual muestra una tendencia evidentemente lineal, ya que por cada punto de grafeno añadido a la composición de las probetas se obtiene una mejora en la propiedad de dureza de 0.36 puntos, es así que, se reconoce que el aluminio prístino cuya dureza presentada fue de 8,76 HB es mejorado llegando en esta investigación al valor de 9,94 HB lo cual es un incremento de 1,18 puntos en la escala de dureza, dándonos a entender que con una cantidad mínima de grafeno se puede mejorar a los compuestos, sin embargo, se hace evidente que la variable más importante en estos procesos no es el grafeno sino más bien el resto de variables de experimentación como son presión de compactación, la temperatura de sinterización, la pureza de los elementos.

### **3.3. Pruebas de Hipótesis**

#### **3.3.1. Hipótesis general**

$H_0$  = No existe variación en la dureza del aluminio por adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

Se rechaza la  $H_0$ , y se afirma que la cantidad de grafeno utilizado influye directamente sobre la característica de dureza ( $P < 0.05^{**}$ ). Aceptándose la hipótesis de trabajo:

$H_i$  = Existe variación en la dureza del aluminio por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

#### **3.3.2. Hipótesis específicas**

A mayor cantidad de grafeno utilizado, el aluminio presentará mayor dureza

Se acepta la hipótesis, y se afirma que los mejores resultados de las medias obtenidas en los diferentes análisis de Dureza Brinell lo presentaron el tratamiento T3 con 3 % de grafeno, con 9,94 HB seguido del T2 con 2% de grafeno, con 9,50 HB.

La dureza del aluminio se ve afectada por la adición de grafeno en el proceso de pulvimetalurgia.

Se acepta la hipótesis, y se evidencia que la dureza del compuesto aluminio-grafeno es influenciada directamente por el porcentaje en peso de grafeno utilizado en el proceso de pulvimetalurgia, ya que se presentaron diferencias estadísticas significativas entre sus medias ( $P < 0.05^{**}$ ). Todos los tratamientos presentaron diferencias significativas entre sí. ( $P < 0.05$ )

El tratamiento con mayor porcentaje en peso de grafeno será el más adecuado para la producción de compuestos metálicos de aluminio-grafeno.

Se acepta la hipótesis, y se afirma que al realizar la separación de medias se determina que todos los tratamientos con adición de grafeno superan en función de su dureza al tratamiento blanco T0 que no posee grafeno, presentando mayor efectividad el T3 con 3% del mismo, teniendo así, que este proceso es adecuado para reemplazar al aluminio prístino.

## CONCLUSIONES

Se produjo compuestos metálicos de aluminio grafeno mediante el método de pulvimetalurgia de acuerdo a la planificación establecida, considerando tres concentraciones distintas de 1, 2 y 3% en peso de grafeno. Además, la temperatura de sinterización de 590 °C y la presión de compactación de 154 MPa se mantuvo constante durante todo el experimento y en cada tratamiento.

El parámetro físico-mecánico de dureza medido en las probetas producidas con distintos niveles de grafeno mediante el método de pulvimetalurgia presentaron medias máximas crecientes en orden secuencial, teniendo así, de menor a mayor: T0: 8,76 HB, T1: 9,27 HB, T2: 9,50 HB, T3: 9,94 HB, logrando de esta manera una mejora evidente en cada compuesto aluminio – grafeno.

Los resultados obtenidos en la evaluación de la dureza mediante la prueba de Dureza Brinell en el proceso de adición de diferentes niveles de grafeno mediante pulvimetalurgia son superiores a los resultados de las probetas de aluminio prístino, logrando así mejorar la producción de placas de aluminio sin adición. Se establece que en base a las medias obtenidas el mejor tratamiento a utilizar es el T3 con 3% de grafeno.

El rendimiento de la dureza medida mediante la prueba de Dureza Brinell a los diferentes tratamientos presento diferencias significativas entre sus medias, siendo el de principal escala de dureza el tratamiento en el que se adiciono la mayor cantidad de grafeno, con 3% del mismo, el cual, alcanzo valores iguales a 9,94 HB. Este resultado representa un 12.86 % de aumento en la propiedad de dureza respecto al blanco T0, que no contiene grafeno.

El rendimiento de dureza medida mediante la prueba de Dureza Brinell de todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí.

## RECOMENDACIONES

En próximas investigaciones o producciones de compuestos de aluminio – grafeno se recomienda que el intervalo de adición de porcentaje de grafeno en peso sea mayor al 3% con el fin de verificar hasta qué punto la adición de este refuerzo presenta resultados positivos en la propiedad medida. También se recomienda no solo la modificación de esta variable, sino, la contemplación de combinación de métodos para la obtención del compuesto.

Aumentar la presión de compactación hasta el máximo recomendado para el aluminio de 275 MPa, para elevar la densidad, ya que mientras más alta sea esta, mayor será su resistencia mecánica y módulo elástico.

Se recomienda aumentar la temperatura de sinterización hasta un máximo de 650 °C como lo recomienda la norma ASTM B925 donde se establecen prácticas estándar para la producción y preparación de muestras de prueba de metalurgia de polvos.

Complementar y combinar el proceso de pulvimetalurgia con un proceso de infiltración con o sin presión. Este proceso implica la infiltración del metal fundido en la preforma de refuerzo obtenida en esta investigación, es decir, fundir un metal o aleación en la parte superior de la preforma haciendo que el líquido fluya hacia la parte inferior.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADAMIAN, J.** “Novos materiais: Tecnologia e aspectos econômicos”, 2009, (Brasil: Coppe).
- AMAT, R.**, “Análisis de varianza para comparar múltiples medias”. [en línea], (2016), [Consulta: 08 agosto 2020], Disponible en: [https://www.cienciadedatos.net/documentos/19\\_anova](https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova)
- ASHBY, M.** *Materials Selection in Mechanical Design*, 4ta. ed. Burlington, Estados Unidos: Elsevier, 2011.
- ASM Metal Handbook**, *Powder Metal Technologies and Applications*, Advisory Board, vol 7, 1997, p. 89-323
- ASTM E10** *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*
- BACKES, C. et al.** “Production and processing of graphene and related materials. 2D Materials”, [en línea], 2019, [Consulta: 08 agosto 2020], IOP Publishing, In press. hal-02144563
- BANERJEE, R. et al.**, “Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded titanium-vanadium alloys”, *Acta Materialia*, 51 (2003) 3277. P.3-4
- BUDYNAS, R.**, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 8na ed., México, McGrawHill Companies, 2008, pp. 51
- CAMPOS, B.** “Síntesis y caracterización de los sistemas eu<sub>2</sub>o<sub>3</sub> y gd<sub>2</sub>o<sub>3</sub> por molienda mecánica”, 2011. P. 4-8
- CASTAÑEDA, M.**, “Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS”. (2010), Brasil, Porto Alegre:Edipucrs, p. 15
- CHEN, L.** “Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites”, 2012, pp. 2-4
- ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN LA SOLDADURA**, Temas para la Educación, [en línea], 2011, pp. 1–4, [Consulta: 08 agosto 2020], ISSN: 1989-4023, Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf>
- ESPARZA, A.** “Trazabilidad y Unificación de las escalas de Dureza en México. Centro Nacional de Metrología”, 1998, México, pp. 2-3.
- GONSALVES, K et al.**, “Biomedical Nanostructures”, 1ra. ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley, 2008.
- GOPAGONI et al.**, “Microstructural evolution in laser deposited nickel titanium carbon in situ metal matrix composites”, *Journal of alloys and Compounds*. 509 (2011) 1255. p. 2
- GRAPHENANO**, El grafeno propiedades y aplicaciones, 2017

**GUERRERO, V et al**, *Nuevos materiales, aplicaciones estructurales e industriales*, [en línea], Quito-Ecuador, 2011, pp. 11-19 [Consulta: 06 enero 2021], Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4532>

**HERRADÓN, B.** “Hall y la producción electrolítica de aluminio”, [blog]. [consulta 14 julio de 2020], Disponible en: <https://educacionquimica.wordpress.com/2016/02/23/hall-y-la-produccion-electrolitica-de-aluminio/>

**HUG, R.** “Obtencion de materiales con estructura tipo grafeno por exfoliacion mecanica empleando el metodo de ball milling”, 2017, Paraná-Brasil.

**KALPAKJIAN, S., & SCHMID, S.** “Manufactura, ingeniería y tecnología”, 5 Edición. *México DF*: Pearson Education. 2008. P. 20-499

**KHAN, M.** “Graphene based metal and metal oxide nanocomposites synthesis, properties and their applications”, *Journal of materials chemistry*, 2015

**KUMAR, H.** “Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC) A Review”, 2014, Vellore-India.

**LEVY, F.** “Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia”, 1ra. ed. São Paulo, 2006, Brasil: Edgard Blücher.

**LI, J.** “Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling, Beijing-China”, 2015, pp. 2-6

**LÓPEZ, S.** “Proceso electrolítico de obtención del aluminio”, 1995

**MADHAVA, D.** “Development and characterization of aluminum -graphene metal matrix composites using powder metallurgy route”, 2016, Bangalore-India, pp.2-3

**MAZUMDAR, S.** “Composites manufacturing: Materials, product and process engineering”, 1ra. ed. Estados Unidos: CRC Press, 2002.

**MENDOZA-DUARTE, J. et al.** “Mechanical and Microstructural Response of an Aluminum Nanocomposite Reinforced with Carbon-Based Particles”. *Mat. Res.* [online]. 2016, vol.19, suppl.1 [cited 2019-12-22], pp.2-6.

**MIJANGOS, C.**, “*Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*”. España: CSIC, 2007.

**MIKELL, P.**, “Fundamentos de la manufactura moderna”, 3ed, 1997. P.52-112

**MITJANA, L. R., & RUIZ MITJANA, L.** *Prueba de Kolmogórov Smirnov: qué es y cómo se usa en estadística.* [blog], España, [Consulta:14 enero 2021] Disponible en: <https://psicologiyamente.com/miscelanea/prueba-kolmogorov-smirnov>

**PINEDA, G.** Estudio de la aleación mecánica de aluminio 1060 con porcentajes controlados en peso de zinc, mediante un proceso de pulvimetalurgia y su incidencia en las propiedades mecánicas. (trabajo de titulación) (Maestría), universidad técnica de Ambato, Ambato-Ecuador, 2019. p.9-19

**PRADEEP, T.** “Nano: The Essentials; Understanding Nanoscience and Nanotechnology”. Nueva York, Estados Unidos: MacGraw- Hill, 2007.

- RAMESH B.T.** “Characterization of Al based Nano composites Using Powder Metallurgy Technique”, Department of Mechanical Engineering, STJ Institute of Technology, Rannebennur, Vol.2, Feb 2014, pp 131-147
- RETSCH LAB EQUIPMENT.** Haan. Alemania. 2018 disponible en: [www.retsch.es](http://www.retsch.es)
- RODRIGUEZ, A.** “Grafeno síntesis, propiedades y aplicaciones biomédicas”, Trabajo fin de grado, Universidad Complutense, 2016
- SENESCYT,** “Política nacional de ciencia, tecnología e innovación 2007-2010”, septiembre 2007, pp. 2-10
- TJONG, S.** “Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets”, Jeddah-Saudi Arabia, 2013. p.11-12
- UQUILLAS, A.** “Modelo Económico Industrial en el Ecuador”, 2011  
[Online]. <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2008/au.htm>
- VACACELA, C et al,** “Preparation of Few-Layer Graphene Dispersions from Hydrothermally Expanded Graphite”. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2539. pp. 2-8
- WANG, J et al,** “Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites”. *Scripta Materialia*, 2012, 66 (8), 594-597, pp. 4-6
- WITKIN, D.** “Synthesis and mechanical behavior of nanostructured materials via cryomilling”, Universidad de California, Davis- Estados Unidos, 2006, pp. 5-35
- XU, Z et al,** “Wetting and oxidation during ultrasonic soldering of an alumina reinforced aluminum-copper-magnesium (2024 Al) matrix composite”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(3), 2012, 407–414.
- YOLSHINA, L et al,** “Novel Aluminum-Graphene and Aluminum-Graphite Metallic Composite Materials: Synthesis and Properties”, *Journal of Alloys and Compounds* (2016). pp. 2-6
- YOUNG, R et al,** “The mechanics of graphene nanocomposites: a review”. 2012, *Compos Sci Technol* 72:1459, pp. 2
- ZHANG, L et al,** “Aluminum/ graphene composites with enhanced heat-dissipation properties by in-situ reduction of graphene oxide on aluminum particles”, *Journal of Alloys and Compounds* (2018), pp. 5-12
- ZHOU, S.** “Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique”, 2007, p. 2



Firmado electrónicamente por:  
JHONATAN RODRIGO  
PARREÑO UQUILLAS

## **ANEXOS**

ISO 9001-2008 REGISTERED

**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

Product Name : - ALUMINIUM FINE POWDER EXTRA PURE  
Formula : - Al  
At. Weight : - 26.98  
Code no. : - 00880  
CAS no. : - 7429-90-5  
Lot no. : - L225261703  
Mfg date : - MAR-2017  
Exp date : - FEB-2022

Analyzed on: - 07/03/17

<u>Sr. no.</u>	Tests	Specifications	Results
1	Description	Gray powder	Gray powder
2	Assay	Min. 98.0%	98.41%
3	Silicon (Si)	Max. 0.1%	<0.1%
4	Copper (Cu)	Max. 0.02%	0.0015%
5	Nitrogen content (as N)	Max. 0.001%	0.001%
6	Insoluble in dil. HCl	Max. 0.005%	0.005%
7	Iron (Fe)	Max. 0.1%	0.1%
8	Manganese (Mn)	Max. 0.02%	0.0020%
9	Titanium (Ti)	Max. 0.03%	<0.03%

*This above product complies as per the specifications of **LOBA CHEMIE PVT. LTD.***

*This document has been produced electronically and it is valid without signature.*

**Loba Chemie Pvt. Ltd.**

Works : Plot No. D-22, MIDC, Tarapur Industrial Area, Boisar, Taluka- Palghar, District - Palghar, Pin - 401506 Tel: 91 02525- 300000/300030  
Regd office : 107 Wode House Road, Jehanghir Villa, Colaba, Mumbai – 400005 Tel: 91 22 6663 6663, Fax: 91 22 22151099

[info@lobachemie.com](mailto:info@lobachemie.com) • [www.lobachemie.com](http://www.lobachemie.com)

# PROFORMA INVOICE

Reference No.: N/A

Invoice No.: INV-200615EC-TJA

To:

Date: June 15, 2020

Jhonatan Goyes

Contract No.: EX-200615EC-TJA

Add: 060108 RIOBAMBA, ECUADOR, CHIMBORAZO 36-02 AND JUAN MONTALVO

Tel: 593984937563

Fax: N/A

Shipment: By Courier From: Changsha, China. To: RIOBAMBA, ECUAD Via: N/A

Delivery: Within 10 working days time

Payment: T/T Advance

Remark:

Name&Description of Goods, Number&Kind of Package	Quantity (g)	Unit Price (USD/CPT)	Amount (USD)
Graphene Powder (ES-G2) Spec: 98%Min, Particle Size :D50 7-12um 20g Bag 1 Bag	20.00	US\$9.25	US\$185.00
<b>TOTAL Amount(CPT Courier to RIOBAMBA, ECUADOR)</b>			<b>US\$185.00</b>

Say Total One Hundred Eighty Five Dollars

Banking Account: \_\_\_\_\_

Only

Beneficiary account number: 1029 2005 0646 6

Swift code: CITIHKHXXXX or CITIHKHX

Beneficiary country/region: Hong Kong, China

Beneficiary name: Changsha Easchem Co., Limited

Beneficiary address: 26/F TOWER ONE TIME SQUARE 1 MATHESON STREET CAUSEWAY BAY HK

Beneficiary bank: Citibank, N.A., Hong Kong Branch

Beneficiary bank address: Citibank Tower, Citibank Plaza, 3 Garden Road, Central, Hong Kong

Bank code: 006

Branch code: 391



# 产品质量分析报告单

## CERTIFICATE OF ANALYSIS

**EASCHEM.com**  
 NEW MIND / NEW WAY  
 CHANGSHA EASCHEM CO., LIMITED  
 2/F-4/Bld Colorful Palace, No.605 Changsha  
 Ave, Yuhua Area 410129 Changsha Hunan China  
 TEL:+86-731-89722861 FAX:+86-731-89748861  
 URL:http://www.easchem.com

产品名称 Name of Product	石墨烯粉 (ES-G2) Graphene Powder	批号 Batch No.	ES200507
生产日期 Manf Date	2020年5月7日 7 May 2020	检验日期 Tes Date	2020年5月8日 May 9, 2020
包装 Packing	1.5公斤纸板桶 1.5KGs Paper Drum	数量 Quantity	200公斤 200KGs

### 检测项目/INSPECTION ITEM

检测项目 ITEM	质量指标 SPECIFICATIONS	检测结果 TEST RESULTS
Appearance	Black grey powder	Black grey powder
C(% ,Min)	>98	Conform
其他指标 Other Index		
Bulk density (g/ml)	0.01-0.02	Conform
Powder resistance (mΩ·cm)	9.2	Conform
Moisture content (%)	≤2	Conform
Thickness (layer)	1-3	Conform
Single rate(%)	>80	Conform
Grafted oxygen content	Very Low	Conform
Average Diameter-thickness	9500	Conform
BET(m <sup>2</sup> /g)	50-200	Conform
Additive	2% dispersing agent	Conform
Particle size (D50, um)	7-12	Conform
Particle size (D90, um)	11-15	Conform
检验结论 Conclusion	检测质量符合企业标准。 The product complies with Inner Standard.	





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

<b>CÓDIGO:</b>	T0-1	<b>HOJA:</b>	01 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		

**COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN**

<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	Ninguno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C

**CONDICIONES DEL  
ENSAYO**

<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	18 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	

**RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

Número	Diámetro Prom. d (mm)	Dureza Brinell (HB)
HB-01	1,91	8,96
HB-02	1,92	8,84
HB-03	1,93	8,73
HB-04	1,96	8,38
HB-05	1,94	8,60
HB-06	1,90	9,08
HB-07	1,91	8,96
HB-08	1,91	8,96
HB-09	1,96	8,38
HB-10	1,93	8,73
<b>Promedio</b>		<b>8,76</b>

**Elaborado por:** Goyes Jhonatan

**Aprobado por:** Ing. Carlos Serrano

**Validado por:** Ing. Carlos Serrano

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T0-2	<b>HOJA:</b>	02 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	Ninguno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	18 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,91	8,96	
HB-02	1,90	9,08	
HB-03	1,94	8,60	
HB-04	1,93	8,73	
HB-05	1,93	8,73	
HB-06	1,94	8,60	
HB-07	1,91	8,96	
HB-08	1,92	8,84	
HB-09	1,94	8,60	
HB-10	1,94	8,60	
<b>Promedio</b>		<b>8,77</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T0-3	<b>HOJA:</b>	03 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	Ninguno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	20 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,95	8,49	
HB-02	1,93	8,73	
HB-03	1,92	8,84	
HB-04	1,90	9,08	
HB-05	1,89	9,20	
HB-06	1,92	8,84	
HB-07	1,92	8,84	
HB-08	1,95	9,49	
HB-09	1,94	9,60	
HB-10	1,90	9,08	
<b>Promedio</b>		<b>8,81</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T1-1	<b>HOJA:</b>	04 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	1% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	19 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,89	9,2	
HB-02	1,88	9,32	
HB-03	1,90	9,08	
HB-04	1,88	9,32	
HB-05	1,87	9,45	
HB-06	1,88	9,32	
HB-07	1,87	9,45	
HB-08	1,88	9,32	
HB-09	1,90	9,08	
HB-10	1,89	9,20	
<b>Promedio</b>		<b>9,27</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T1-2	<b>HOJA:</b>	05 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	1% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	20 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,88	9,32	
HB-02	1,87	9,45	
HB-03	1,87	9,45	
HB-04	1,88	9,32	
HB-05	1,89	9,20	
HB-06	1,90	9,08	
HB-07	1,89	9,20	
HB-08	1,89	9,20	
HB-09	1,90	9,08	
HB-10	1,89	9,20	
<b>Promedio</b>		<b>9,22</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)

<b>CÓDIGO:</b>	T1-3	<b>HOJA:</b>	01 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		

COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN

<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	1% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C

CONDICIONES DEL  
ENSAYO

<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	20 mm
<b>Distancia al borde</b>	$\geq 2$ mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	$\geq 2$ mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)

Número	Diámetro Prom. d (mm)	Dureza Brinell (HB)
HB-01	1,88	9,32
HB-02	1,90	9,08
HB-03	1,89	9,20
HB-04	1,90	9,08
HB-05	1,87	9,45
HB-06	1,88	9,32
HB-07	1,90	9,08
HB-08	1,89	9,20
HB-09	1,90	9,08
HB-10	1,87	9,45
<b>Promedio</b>		<b>9,22</b>

Elaborado por: Goyes Jhonatan

Aprobado por: Ing. Carlos Serrano

Validado por: Ing. Carlos Serrano

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T2-1	<b>HOJA:</b>	07 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	2% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	18 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,85	9,71	
HB-02	1,87	9,45	
HB-03	1,88	9,32	
HB-04	1,89	9,20	
HB-05	1,84	9,84	
HB-06	1,89	9,20	
HB-07	1,86	9,58	
HB-08	1,86	9,58	
HB-09	1,87	9,45	
HB-10	1,88	9,32	
<b>Promedio</b>		<b>9,46</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

<b>CÓDIGO:</b>	T2-2	<b>HOJA:</b>	01 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		

**COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN**

<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	2% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C

**CONDICIONES DEL  
ENSAYO**

<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	19 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	

**RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

Número	Diámetro Prom. d (mm)	Dureza Brinell (HB)
HB-01	1,85	9,71
HB-02	1,89	9,20
HB-03	1,87	9,45
HB-04	1,85	9,71
HB-05	1,86	9,58
HB-06	1,88	9,32
HB-07	1,85	9,71
HB-08	1,85	9,71
HB-09	1,87	9,45
HB-10	1,89	9,20
<b>Promedio</b>		<b>9,50</b>

**Elaborado por:** Goyes Jhonatan

**Aprobado por:** Ing. Carlos Serrano

**Validado por:** Ing. Carlos Serrano



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

<b>CÓDIGO:</b>	T2-3	<b>HOJA:</b>	09 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		

**COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN**

<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	2% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C

**CONDICIONES DEL  
ENSAYO**

<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	19 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	

**RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

Número	Diámetro Prom. d (mm)	Dureza Brinell (HB)
HB-01	1,91	8,96
HB-02	1,86	9,58
HB-03	1,88	9,32
HB-04	1,85	9,71
HB-05	1,87	9,45
HB-06	1,86	9,58
HB-07	1,84	9,84
HB-08	1,85	9,71
HB-09	1,88	9,32
HB-10	1,89	9,20
<b>Promedio</b>		<b>9,36</b>

**Elaborado por:** Goyes Jhonatan

**Aprobado por:** Ing. Carlos Serrano

**Validado por:** Ing. Carlos Serrano

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T3-1	<b>HOJA:</b>	10 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	3% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	18 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,80	10,38	
HB-02	1,82	10,11	
HB-03	1,83	9,97	
HB-04	1,85	9,71	
HB-05	1,85	9,71	
HB-06	1,83	9,97	
HB-07	1,85	9,71	
HB-08	1,83	9,97	
HB-09	1,85	9,71	
HB-10	1,80	9,38	
<b>Promedio</b>		<b>9,94</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

<b>CÓDIGO:</b>	T3-2	<b>HOJA:</b>	11 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		

**COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN**

<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	3% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C

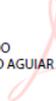
**CONDICIONES DEL  
ENSAYO**

<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	19 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	

**RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)**

<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>
HB-01	1,86	9,58
HB-02	1,83	9,97
HB-03	1,85	9,71
HB-04	1,81	10,24
HB-05	1,86	9,58
HB-06	1,82	10,11
HB-07	1,85	9,71
HB-08	1,83	9,97
HB-09	1,83	9,97
HB-10	1,84	9,84
<b>Promedio</b>		<b>9,86</b>
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano

	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
<b>ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>CÓDIGO:</b>	T3-3	<b>HOJA:</b>	12 de 12
<b>FECHA:</b>	14/01/2021	<b>CIUDAD:</b>	Riobamba
<b>LABORATORIO:</b>	Laboratorio de Materiales Ingeniería Mecánica ESPOCH		
<b>EQUIPO:</b>	Hardness Tester Model HBRV-187,5		
<b>NORMA:</b>	ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials		
<b>COMPOSICIÓN - CARACTERÍSTICAS ALEACIÓN</b>			
<b>Material base</b>	Aluminio extra fino	<b>Material aleante:</b>	3% grafeno
<b>Presión Compactado</b>	294 KN	<b>Temperatura Sinterizado</b>	590°C
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>			
<b>Diámetro bola (D)</b>	2,5 mm	<b>Espesor probeta</b>	18 mm
<b>Distancia al borde</b>	≥ 2 mm	<b>Dist. entre penetraciones</b>	≥ 2 mm
<b>Carga aplicada (F)</b>	306 N	<b>Modelo matemático (HB)</b>	
<b>RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE DUREZA BRINELL (HB)</b>			
<b>Número</b>	<b>Diámetro Prom. d (mm)</b>	<b>Dureza Brinell (HB)</b>	
HB-01	1,82	10,11	
HB-02	1,85	9,71	
HB-03	1,82	10,11	
HB-04	1,84	9,84	
HB-05	1,81	10,24	
HB-06	1,85	9,71	
HB-07	1,85	9,71	
HB-08	1,84	9,84	
HB-09	1,83	9,97	
HB-10	1,84	9,84	
<b>Promedio</b>		<b>9,91</b>	
<b>Elaborado por:</b> Goyes Jhonatan		<b>Aprobado por:</b> Ing. Carlos Serrano	
		<b>Validado por:</b> Ing. Carlos Serrano	


 Firmado digitalmente por  
 CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR  
 Fecha: 2021.04.28 10:56:14 -05'00'

Ing. Carlos Serrano Laboratorio de  
 materiales Facultad de Mecánica  
 -ESPOCH.



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO  
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS  
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**FECHA DE ENTREGA:** 03 / 05 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>NOMBRES – APELLIDOS:</b> JHONANTAN FERNANDO GOYES ROBALINO
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>FACULTAD:</b> MECÁNICA
<b>CARRERA:</b> INGENIERÍA MECÁNICA
<b>TÍTULO A OPTAR:</b> INGENIERO MECÁNICO
<b>F. ANALISTA DE BIBLIOTECA RESPONSABLE:</b> <b>ING. CPA. JHONATAN RODRIGO PARREÑO UQUILLAS. MBA.</b>
 <p>03-05-2021 0966-DBRAI-UTP-2021</p>