



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



FACULTAD DE MINAS, METALURGIA Y  
GEOLOGÍA

**“EFECTO DE LA PRESIÓN DE LÍQUIDO  
SOBRE LAS PROPIEDADES  
MICROESTRUCTURALES Y MECÁNICAS DEL  
MATERIAL”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO METALÚRGICO

PRESENTA

KARLA MARIANA RODRIGUEZ LOZANO

ASESOR

DR. JOEL MORENO PALMERIN

Guanajuato, Gto., noviembre de 2018

Asunto: **Aprobación de Trabajo  
de Titulación.**

**DR. LUIS ENRIQUE MENDOZA PUGA  
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS  
CAMPUS GUANAJUATO  
P R E S E N T E.**

Los que suscriben, revisores del trabajo, que como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

**C. Karla Mariana Rodríguez Lozano**

Pasante del Programa Educativo de Ingeniero Metalúrgico de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la modalidad de **Trabajo de Tesis** con el Título:

**"Efecto de la Presión del Líquido Sobre las Propiedades  
Microestructurales y Mecánicas del Material"**

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúen con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustente examen.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

**Atentamente  
"La Verdad Os Hará Libres"**

Dr. Joel Moreno Palmerín  
Director del Trabajo



---

Dra. Ma. Mercedes Salazar Hernández  
Sinodal del Trabajo



---

Dr. Martín Caudillo González  
Sinodal del Trabajo



---

Dr. Israel López Báez  
Sinodal del Trabajo



---

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS GUANAJUATO**

Ex-Hacienda San Matías s/n, 36000, Guanajuato, Gto., Tels. (473) 732 22 91, Fax (473) 732 38 64

## AGRADECIMIENTOS

Les agradezco a todos mis profesores por haberme compartido sus conocimientos a lo largo de mi estancia en la universidad, por el apoyo y proporcionarme las bases para el desarrollo profesional dentro de la sociedad.

A la empresa SAESA (Safran Aircraft Engine Services America) y al Ingeniero Oscar Rivera, por brindarme la confianza de realizar este proyecto de tesis, ya que sin ellos no hubiera sido posible.

Se agradece el apoyo al Laboratorio Nacional de LIDTRA y al laboratorio de LICAMM para el desarrollo de este proyecto de tesis.

A mi Asesor de Tesis Dr. Joel Moreno Palmerin, por su paciencia.

A mis sinodales, Dra. Mercedes Salazar, Dr. Martín Caudillo y Dr. Israel López, por regalarme de su tiempo para revisar mi tesis.

Gracias a mis amigos de la universidad, que en el tiempo de mi trayectoria estuvieron conmigo, compartiendo momentos difíciles y felices.

## DEDICATORIAS

Esta tesis la dedico a Dios, por haberme brindado la fuerza, la sabiduría y la paciencia para resolver las dificultades que se presentaban día a día sin perder la fe, por no dejarme desfallecer y poder concluirla satisfactoriamente.

A mi mami Josefina Rodríguez, gracias por apoyarme incondicionalmente, por animarme cuando estaba por rendirme, por creer en mí, convencerme de que, lo que yo me proponga lo podré lograr, soy dichosa de tenerte en mi vida, te amo.

A mi abuelita<sup>†</sup>, a la cual le debo mis valores, mi carácter y parte de lo que soy, gracias por alentarme siempre, sé que me cuidas desde el cielo.

A mi familia, por sus consejos y por impulsarme a seguir adelante.

A Fernando Salas, por existir en mi vida, por tu impulso.

## RESUMEN

El efecto de la presión de líquido como método de limpieza sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en diferentes aleaciones, fue estudiado por microscopía óptica para analizar la microestructura, mediciones de microdureza Vickers, estimación del tamaño de grano y medición de la rugosidad. Las aleaciones utilizadas para el desarrollo del trabajo fueron Ti 6%Al – 4%V, Inconel 718, Acero inoxidable 321, Aluminio 6061, las cuales fueron proporcionadas por la empresa aeronáutica Safran Aircraft Engines. Las aleaciones fueron expuestas a presiones de limpieza de 500, 1000 y 1500 psi, con un margen de 50 pasadas o 25 ciclos a una distancia establecida de manera constante de 30 cm.

Los resultados de microscopía óptica, mostraron la microestructura antes y posterior a las pruebas de limpieza, en las cuales no se observó un efecto considerable de la presión sobre la microestructura, así mismo no hubo formación de segundas fases o precipitados atribuidos al proceso de deformación. Por su parte, los resultados de microdureza Vickers corroboran lo observado en microscopía óptica, ya que los valores de dureza para cada material se mantienen en un rango establecido por los valores de la desviación estándar calculados. El tamaño de grano no sufre alteraciones ya que para cada material y cada valor de presión se mantuvo sobre el rango de los valores iniciales de las muestras originales. Por último, la rugosidad presenta variaciones sobre sus valores en función de la presión de limpieza utilizada, sin embargo, no se observó una tendencia clara con el incremento de la presión de limpieza.

ÍNDICE

		Página
Agradecimientos		I
Dedicatorias		II
Resumen		III
Índice		IV
Lista de figuras		VIII
Lista de tablas		X
Lista de gráficas		XI
<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	
Introducción		1
Justificación		2
Hipótesis del trabajo		3
Objetivo general		4
Objetivo específico		4
<b>Capítulo 2</b>	<b>Antecedentes</b>	5
2.1	Titanio	6
	Aleaciones desarrolladas con Titanio	
2.1.1	(Ti)	7
2.1.2	Aleación de titanio 6%Al – 4%V	8
2.1.3	Aplicaciones y usos	9
2.2	Níquel	11
2.2.1	Aleaciones desarrolladas con Níquel	12
2.2.2	Superaleación Inconel 718	13
2.2.3	Aplicaciones y usos	14
2.3	Aceros inoxidables	15
2.3.1	Tipos de aceros inoxidables	16
2.3.2	Acero inoxidable 321	20
2.3.3	Aplicaciones y usos	22

2.4	Aluminio	22
	Aleaciones desarrolladas con	
2.4.1	Aluminio	24
2.4.2	Aleación Aluminio 6061	25
2.4.3	Aplicaciones y usos	27
2.5	Motor de avión	28
2.6	Limpieza	29
2.6.1	Limpieza superficial	29
2.7	Métodos de limpieza química	32
2.7.1	Limpieza alcalina	32
2.7.2	Limpieza electrolítica	33
2.7.3	Limpieza con emulsión	33
2.7.4	Limpieza con solventes	34
2.7.4.1	Desengrasado con vapor	34
2.7.5	Limpieza acida	35
2.7.5.1	Baño acido	36
2.7.6	Limpieza ultrasónica	36
2.8	Métodos de limpieza mecánica	36
2.8.1	Acabado a chorro y granallado	38
2.8.2	Acabados masivos	38
2.8.2.1	Acabado vibratorio	39
2.8.2.2	Rotación a tambor	39
2.9	Limpieza con plasma	40
	Limpieza con agua a baja presión	
2.10	(steam cleaning)	42
	Mecanismos de endurecimiento en	
2.11	metales	52
1.11.1	Endurecimiento por deformación	52
	Endurecimiento por reducción del	
2.11.2	tamaño de grano	53

2.11.2.1	Tamaño de grano	53
2.11.2.2	Límites de grano	53
2.11.3	Endurecimiento por disolución sólida	55
2.11.4	Endurecimiento por segundas fases	55
<b>Capítulo 3</b>	<b>Desarrollo experimental</b>	<b>57</b>
3.1	Obtención de los materiales	57
3.2	Medición de las láminas de los materiales	57
3.3	Preparación metalográfica	58
3.4	Medición de microdureza Vickers (HV)	63
3.5	Microscopía óptica	63
3.6	Estimación del tamaño de grano	64
3.6.1	Estimación del tamaño de grano por el método de intersección lineal	64
3.7	Medidas de rugosidad	65
3.8	Pruebas de limpieza con agua a baja presión	66
<b>Capítulo 4</b>	<b>Resultados</b>	<b>67</b>
4.1	Dimensiones de las láminas	67
4.2	Profundidad de erosión	68
4.3	Rugosidad	75
4.4	Estimación de tamaño de grano	76
4.5	Medición de microdureza	78
<b>Capítulo 5</b>	<b>Discusión de resultados</b>	<b>80</b>
5.1	Espesor de las láminas	80
5.2	Profundidad de erosión	82



5.3	Rugosidad	84
5.4	Tamaño de grano	86
5.5	Microdureza	87
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>89</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Componentes de aleación Ti 6Al - 4V en avión comercial	10
2	Componentes de aleación Inconel 718 en transbordador espacial	15
3	Metales que componen un motor	28
4	Tanque de limpieza alcalina electroquímica	33
5	Limpieza con solvente, técnica de rociado	34
6	Tanque de limpieza, desengrasado con vapor	35
7	Formas y figuras de abrasivos a) medios abrasivos convencionales, b) formas de acero para pulido	37
8	Mecanismo de rotación a tambor	39
9	Proceso de limpieza con plasma	41
10	Chorro de agua aplicado manualmente	43
11	Zonas del chorro de agua	45
12	Factores en el proceso de limpieza con chorro de agua	48
13	Medición dimensional de cada una de las láminas.	58
14	Secciones cortadas de cada lámina.	59
15	Muestra de la probeta para cada material.	60
16	Plantilla de acetato de 16 x 12 cm con 15 líneas intersectadas	65
17	Aplicación de método de limpieza a presión con respectivas zonas del chorro.	66
18	Microestructura obtenida por microscopía óptica de la aleación Titanio 6%Al - 4%V. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde 1500 psi.	71
19	Microestructura obtenida por microscopía óptica de la aleación Inconel 718. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde a 1500 psi.	72

- 20**      **Microestructura obtenida por microscopia óptica de la aleación Acero inoxidable 321. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde 1500 psi.**      **73**
- 21**      **Microestructura obtenida por microscopia óptica de la aleación Aluminio 6061. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde a 1500 psi.**      **74**

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>A</b>	<b>Composición química, aleación Ti 6Al – 4V</b>	<b>8</b>
<b>B</b>	<b>Propiedades mecánicas aleación Ti 6Al – 4V</b>	<b>9</b>
<b>C</b>	<b>Composición química, aleación Inconel 718</b>	<b>13</b>
<b>D</b>	<b>Propiedades mecánicas aleación Inconel 718</b>	<b>14</b>
<b>E</b>	<b>Composición química, acero inoxidable 321 y 321H</b>	<b>21</b>
<b>F</b>	<b>Propiedades mecánicas de acero inoxidable 321</b>	<b>22</b>
<b>G</b>	<b>Serie de aleaciones forjadas de Aluminio</b>	<b>24</b>
<b>H</b>	<b>Composición química aleación 6061</b>	<b>26</b>
<b>I</b>	<b>Propiedades mecánicas aleación 6061</b>	<b>26</b>
<b>J</b>	<b>Reactivos para ataque químico</b>	<b>62</b>
<b>K</b>	<b>Medidas dimensionales de láminas originales.</b>	<b>67</b>
<b>L</b>	<b>Medidas de espesor de las diferentes laminas</b>	<b>68</b>
<b>M</b>	<b>Promedio de profundidad de erosión de las aleaciones en el borde, sección transversal</b>	<b>70</b>
<b>N</b>	<b>Valores de rugosidad superficial, sección longitudinal de cada aleación.</b>	<b>76</b>
<b>Ñ</b>	<b>Promedio de tamaño de grano sección longitudinal (TG - ASTM)</b>	<b>78</b>
<b>O</b>	<b>Promedio de valores de microdureza, área longitudinal.</b>	<b>79</b>

**LISTA DE GRÁFICAS**

<b>Gráfica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	<b>Espesor de las cuatro aleaciones sometidas a diferentes cantidades de presión</b>	<b>81</b>
<b>2</b>	<b>Porcentaje de la pérdida de espesor correspondiente a las cuatro aleaciones a diferentes cantidades de presión.</b>	<b>82</b>
<b>3</b>	<b>Medidas de la profundidad de erosión de las cuatro aleaciones.</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>Medidas en porcentaje de la profundidad de erosión de las cuatro aleaciones.</b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>Medidas de rugosidad de las cuatro aleaciones a medida que va aumentando la presión.</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>Grafica correspondiente al tamaño de grano de cuatro aleaciones a diferentes cantidades de presiones.</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>Grafica de las respectivas durezas de las cuatro aleaciones a diferentes presiones.</b>	<b>88</b>

## CAPITULO 1

### 1.- INTRODUCCIÓN

El proceso de limpieza de superficies es de gran importancia en las piezas utilizadas dentro de una gran variedad de industrias como la metal mecánica, automotriz, aeronáutica, alimentos, etc., esto se debe a que las piezas durante su fabricación, reparación o mantenimiento son expuestas a distintos procesos en los cuales suelen adherirse residuos contaminantes, partículas de polvo, partículas metálicas, grasas, capas de óxido, entre otros, que afectan de manera significativa la calidad del acabado final, es decir, si la pieza es pintada, cromada, recubierta electrostáticamente, se debe alcanzar una limpieza apropiada que será compatible con los procesos finales, de igual manera puede afectar el procedimiento de ensamblaje y el desempeño en servicio de la pieza. Cabe mencionar que aproximadamente un 75% de recubrimiento superficial falla debido a que no se llevó a cabo una limpieza adecuada o se anuló este paso para ser directamente tratadas de manera superficial.

Existen diferentes metodologías por las cuales se puede realizar el proceso de limpieza, tales como: vapor desengrasante, limpieza por inmersión o aspersion, limpieza alcalina, limpieza con emulsiones, limpieza con solventes, limpieza abrasiva, entre otros. La selección del proceso de limpieza adecuado, está en función principalmente por el tipo de residuos a ser removidos, grado de limpieza requerido, costo, tamaño y forma de las piezas de trabajo, rara vez influye el tipo de solución utilizada, pero se puede

determinar el método de limpieza, como la inmersión o el rociado (aspersión) y las técnicas de manipulación que se emplean.

Actualmente la industria aeronáutica, automotriz y metal mecánica han implementado rigurosos programas sobre las pruebas de limpieza. Uno de los procesos más empleados por este tipo de industrias es el de aspersión, con el cual se logran remover una gran variedad de residuos de aceites, grasas, ceras, pintura e inclusiones de partículas que se adhieren a la superficie de las piezas debido a su procesamiento (piezas nuevas), reparación o mantenimiento. Sin embargo, la naturaleza del proceso involucra condiciones de presión y temperatura que en ocasiones pueden llegar a generar daños superficiales, dimensionales, microestructurales, deformación y por ende sobre las propiedades mecánicas. El daño que puede llegar a generarse, está en función de las diversas variables como: presión y temperatura del fluido, distancia de aplicación, número de pasadas, velocidad de aplicación, tipo de fluido a utilizar, etc., así como del tipo de material al cual se aplicará el proceso de limpieza, es por ello que se requiere una comprensión cuidadosa de los mecanismos básicos de limpieza.

### **Justificación**

La investigación propuesta esta aplicada en determinar que tanto se perjudica a diferentes tipos de aleaciones en cuanto a su microestructura y propiedades mecánicas con el aumento de la presión de líquido como método de limpieza. Hoy en día, no se tiene evidencia clara del grado de daño que puede provocarse y el tipo de cambios que pueden sufrir los materiales u aleaciones con

las variables involucradas en este proceso (limpieza por lavado a presión).

Las cuatro aleaciones se analizarán en cuanto a sus propiedades mecánicas que inicialmente poseen, posteriormente se someterán a diferentes valores de presión y se observará si existe cambio alguno.

La investigación busca proporcionar información que será útil a todas las empresas en el sector automotriz, de alimentos y aeronáutico, para mejorar el conocimiento sobre los efectos que se tiene en dicho proceso de limpieza con respecto a las aleaciones a utilizar y si no se ajusta con lo que ellos requieren, debido a que poseen un alto índice de responsabilidad con la sociedad.

Contribuye a ampliar los datos sobre el método de limpieza, lavado a presión, para compararlos con otros tipos de procesos de limpieza y analizar diversas variantes, según la aleación, la solución química a utilizar, la distancia de aplicación, los ciclos de lavado y las cantidades de presión a utilizar.

### **Hipótesis del trabajo**

En el método de limpieza de lavado a presión se aplica un valor de 100 psi, no alterando su microestructura y propiedades mecánicas de las aleaciones, entonces al incrementar los valores de presión a 500, 1000 y 1500 psi se podría generar algún cambio en sus propiedades.



### **Objetivo general**

Consiste en realizar un estudio del efecto de la presión de líquido como método de limpieza sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en diferentes aleaciones tales como; Titanio 6%Al – 4%V, Inconel 718, Acero inoxidable 321, Aluminio 6061, debido a que son materiales que se emplean con mayor frecuencia en las distintas ramas de la ingeniería.

### **Objetivo específico**

Hacer un análisis de caracterización antes y después de aplicar las cantidades de presión a las que se someten con el líquido de limpieza, así mismo observar el comportamiento en su dureza, analizar si existe cambio en el tamaño de grano a diferencia con la muestra original, medir la deformación en el borde donde se expuso la fuerza a presión y estudiar la diferencia de rugosidad en cada aleación.

## CAPITULO 2

### 2.- ANTECEDENTES TEÓRICOS

En diferentes industrias como en la automotriz, aeronáutica y alimentaria, se requieren de metales u aleaciones que cumplan con diversas características para la elaboración de sus respectivos componentes o piezas. Estas deben cumplir con ciertas características como resistencia específica, en donde el metal se resiste al paso de la corriente eléctrica, resistencia térmica, en donde el metal se contrapone al paso de calor, no permitiendo que altere sus propiedades físicas en dimensiones (límite elástico), resistencia a la fatiga, el metal puede recibir cierta cantidad de cargas cíclicas (viento, térmicas) sin llegar a ocasionar grietas y suficiente resistencia a la corrosión, ya que mediante algunos líquidos corrosivos (agua salina) van degradando y desarrollando grietas o picaduras, provocando fallas prematuras. La influencia que se tiene con el medio ambiente es de importancia porque las piezas o componentes están expuestas y es donde desempeñan su función, los efectos que causa la temperatura, son el cambio de su resistencia a elevadas temperaturas y se vuelve frágil a bajas temperaturas. Atmosfera; con el contenido de oxígeno e hidrógeno pueden reaccionar, se pueden llegar a desintegrar y son frágiles. Carga; se debe diseñar para que no cause deformación permanente ya sea cíclica o por impacto [26].

De manera particular, se describe cada uno de los componentes químicos principales de las aleaciones utilizadas en el presente trabajo.

### **2.1.- Titanio**

El titanio (Ti) con número atómico correspondiente a 22, ocupa el noveno lugar en la corteza terrestre. Su producción es complicada ya que presenta una alta reactividad con el oxígeno, es por ello que su costo es elevado [30].

Se trata de un metal muy duro de color blanco plateado [41], no magnético [9], como características principales se tiene que su densidad es de  $4.5 \text{ g/cm}^3$  la cual es baja, por lo cual se considera dentro del grupo de metales ligeros [41], este valor se encuentra intermedio con la del acero y el aluminio [30]. Su punto de fusión es de  $1670 \text{ }^\circ\text{C}$  [8], mientras que el límite de temperatura en donde sus propiedades físicas y químicas pueden variar esta entre el rango de  $300$  a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  [9]. Tiene un esfuerzo de fluencia de  $200,000 \text{ psi}$  antes de provocar una deformación permanente [3]. Debido a la gran resistencia mecánica que posee, las fuerzas que se le aplican no le ocasionan fractura fácilmente [41] y por ende es difícil de maquinarlo [30]. Se caracteriza por su relación resistencia – peso, ya que por sus propiedades posee buena resistencia a comparación de su bajo peso, es un 40% menos en igualación con el acero [30], llega a sustituir al aluminio por su ligereza y por su resistencia a la corrosión [41].

El titanio puro se aplica principalmente en equipos de industria química [9], por la resistencia al ataque de ácido nítrico, cloro húmedo, ácidos orgánicos, disoluciones de cloruros, sulfatos, sulfuros, entre otros, generalmente su aplicación va desde prótesis

(dentales y óseas) [8] estructuras arquitectónicas, aparatos de manejo de fluidos (tubos), herrajes marinos (cerraduras y herrería), componentes aeroespaciales (discos de aviones, alabes, palas de turbina, fuselajes) [30], tubos de condensador donde se hace pasar gas en forma de vapor convirtiéndolo en estado líquido y ánodos de diversos tipos o placas, son fundamentales en los procesos electrolíticos [48].

### **2.1.1.- Aleaciones desarrolladas con Titanio (Ti)**

El titanio se considera como un metal alotrópico, conforme se elevé o disminuya su temperatura varia su arreglo atómico [3], puede mezclarse o alearse con diferentes elementos como el aluminio, vanadio, estaño y molibdeno [41]. Las aleaciones de titanio se dividen en tres tipos y corresponden a aleaciones alfa ( $\alpha$ ), alfa/beta ( $\alpha/\beta$ ) y beta ( $\beta$ ) [30]:

- Aleaciones alfa ( $\alpha$ )

Tiene presencia de elementos estabilizadores como el aluminio, oxígeno e hidrogeno, provocando la disminución de su temperatura de transición beta [37], su estructura cristalina es hexagonal compacta (HC) [8]. Debido a la composición química de los elementos antes mencionados, llegan a adquirir una resistencia a la tracción (estirado) de 5,075 a 10,150 psi (35 a 70 MPa) [37]. Las aleaciones que se encuentran en este grupo permiten la soldabilidad, pero no pueden ser tratadas térmicamente [22].

- Aleaciones alfa/beta ( $\alpha/\beta$ )

Sus principales componentes se tratan de estabilizadores beta, entre ellos están el vanadio, el molibdeno y el niobio [3]. Posee dos fases alfa, beta, por lo tanto, comparten una estructura

hexagonal y cubica centrada en el cuerpo respectivamente [9], dentro de este grupo las diferentes aleaciones se pueden exponer a tratamientos térmicos, dando como resultado la capacidad de 203,000 psi (1400 MPa) de resistencia a una temperatura ambiente, más sin embargo si se llega a una temperatura de 882 °C con un rango de  $\pm 2$  puede cambiar drásticamente a otro grupo de aleación alfa ( $\alpha$ ) o beta ( $\beta$ ), según sea el caso [8].

- Aleaciones beta ( $\beta$ )

Predominan los elementos como el manganeso, cromo y hierro [37]. Su estructura corresponde a una cubica centrada en el cuerpo, se logra obtener estas aleaciones por encima de la temperatura de transición de 882 °C [8]. Para generar otro tipo de propiedades mecánicas se someten a tratamientos térmicos [37] y son aptos para soldadura [22].

### 2.1.2.- Aleación de titanio 6%Al – 4%V

Con lo anteriormente mencionado, corresponde al grupo de aleación  $\alpha/\beta$ , en cuanto a su estructura cristalina comparten la hexagonal compacta ( $\beta$ ) y cubica centrada en las caras ( $\alpha$ ) [9]. Este tipo de aleación contiene como principales elementos un 6% de Aluminio y un 4% de vanadio [30], en la tabla A, se muestra el contenido en cuanto a su composición química [9].

**Tabla A.- Composición química, aleación Ti 6Al – 4V [9].**

Composición química								
Elemento	Al	V	Fe	C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Ti
Mínimo	5.5	3.5	-	-	-	-	-	
Máximo	7.0	4.5	0.25	0.08	0.07	0.20	0.0125	resto

Presenta una densidad de 4.43 g/cm<sup>3</sup>, a diferencia con el titanio puro disminuye, pero es una cantidad muy poco representativa, limite elástico de 127,600 psi (880 MPa) donde llegando a esta cantidad aún puede llegar a obtener su forma original sin deformarse [9]. Debido a su gran ligereza es óptimo para usos aeronáuticos y automotrices, es resistente a la corrosión [2]. Estando en una temperatura aproximada de 700 a 920 °C se vuelve demasiado blando, a tal grado que puede ser conformado [9], difieren sus propiedades haciéndolo más dúctil, generando grandes deformaciones antes de llegar a su ruptura [8]. Algunas de sus propiedades mecánicas se aprecian en la tabla B, que viene a continuación [3]:

**Tabla B.- Propiedades mecánicas aleación Ti 6Al – 4V [3].**

Material	Propiedades mecánicas		
Aleaciones Ti alfa/beta	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de alargamiento
6%Al - 4%V	150 000	140 000	8

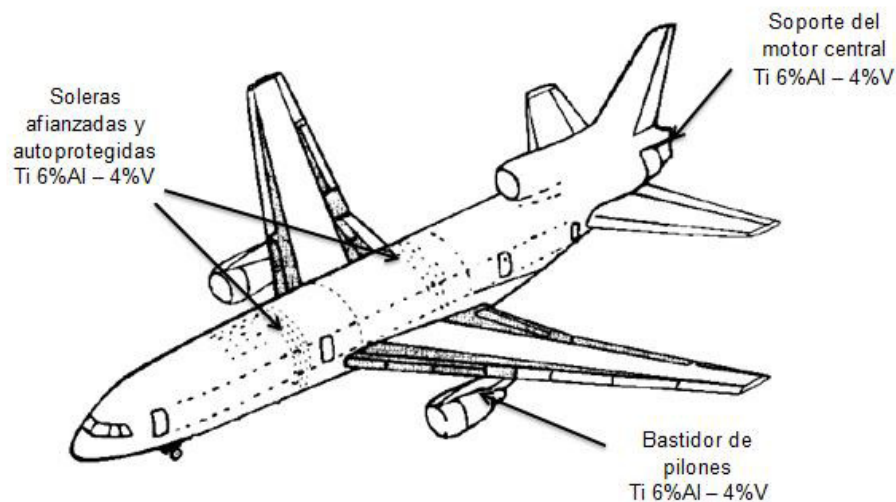
### 2.1.3.- Aplicaciones y usos

- **Industria aeronáutica**

Se dice que en el año de 1970 la sociedad de Rusia puso en práctica y desarrollo la utilización de las aleaciones de titanio en unidades y componentes de aeronaves, poco después algunos otros países pertenecientes a Europa se enfocaron en una aleación resistente, la cual corresponde a la que se mencionó con anterioridad Ti 6%Al – 4%V [28].

Las diferentes aleaciones de titanio, se aplican en las piezas de aeronaves como en la estructura, marcos que se sitúan en las alas, cilindros hidráulicos y chasis [28].

Con respecto a la aleación de interés, es empleada en helicópteros y en aviones comerciales. Las piezas que los componen de acuerdo con este material (Ti 6%Al - 4%V) se muestran en la figura 1 [14]:



**Figura 1.- Componentes de aleación Ti 6Al - 4V en avión comercial [14].**

También es utilizado en la estructura de empuje, tubos de soporte del fuselaje medio, portezuelas de aletas [14] componentes de fijación y en la sección que corresponde a la turbina en la carcasa de abanico [9].

- **Industria automotriz**

Este tipo de aleación es utilizado por su gran capacidad para absorber la energía que se genera en un choque por impacto y entre sus principales componentes están los pistones de frenos,

barras estabilizadoras, chasis, válvulas, tubos de escape, tornillos de rueda, cigüeñales y tornillos [22].

- **Industria alimenticia y biomédica**

En cuanto a la alimenticia se utiliza en equipos como intercambiadores de calor, válvulas y tanques de procesos de alimentos líquidos, debido a que el titanio es muy resistente a la corrosión [30]. Implantes para la cadera/rodilla, tornillos, endoprótesis vasculares, herramientas o componentes del área de la medicina dental e instrumental quirúrgico [22].

## **2.2.- Níquel**

Es un metal cuyo símbolo es Ni, tiene un número atómico 28, su color es blanco plateado, con una estructura cristalina FCC (Cubica centrada en las caras [3] y fue descubierto en 1751 por Axel Frederick Cronstedt cuando extraía cobre del mineral niquelina [21]. En cuanto a su producción, se aplica a diferentes aceros los cuales necesitan el Ni como elemento aleante [48] ya que proporciona protección contra la corrosión y resistencia a temperaturas elevadas [21] y aproximadamente un 60% se aplica en de aceros inoxidables [7].

El Ni en estado puro posee buena formabilidad a ser laminado, forjado, expuesto a la extrusión y estirado [3] presenta buena resistencia a temperaturas elevadas y a temperaturas bajas conserva su ductilidad, debido a fuerzas deforman el material permitiendo obtener alambre o hilo y la tenacidad, es una energía de deformación que se acumula en el material debido a acciones de impacto, las cuales generan dislocaciones hasta generar la rotura. Su utilización en las diferentes industrias va desde bobinas



de calentamiento, para construir evaporadoras en fabricación del jabón y en las industrias químicas [7].

### **2.2.1.- Aleaciones desarrolladas con Níquel**

En el año de 1940 surgieron las primeras superaleaciones, poseían resistencia a alta temperatura, aproximadamente en 850 °C, conforme fue pasando el tiempo, en 1980 a 1995 duplicaron los valores de resistencia por medio de estudios y patentados que se realizaron hasta llegar a obtener los que ahora se comercializan [39].

Se tratan de aleaciones en donde su principal componente es el elemento níquel (Ni), se caracterizan por soportar altas temperaturas lo que los hace ser resistentes al calor en el medio que se expongan. El hierro (Fe), el cobalto (Co) es con los metales que se alea para obtener mejor resistencia a la corrosión y mecánicas [19]. Mientras desprende su desempeño a temperaturas críticas casi cercana a su punto de fusión, conserva sus propiedades como la tolerancia a ambientes severos, soporte en la carga que lleva y resistencia a la degradación mecánica [39].

#### 1) Superaleaciones base níquel (Ni):

La cantidad de Níquel que se encuentra va de 38 a 76%, cromo 27% y de Cobalto un 20%. Son las más frecuentes en el mercado y corresponden a Hastelloy [21]; contiene silicio y cobre, es una aleación de fundición fuerte, resistente al ácido sulfúrico a temperaturas elevadas [7], Inconel [21]; posee cromo y hierro, tiene resistencia a la corrosión, soportan diferentes temperaturas en un rango de 0 a 1 600 °F, sin convertirse en un metal frágil en donde se puede fracturar o desarrollar grietas en muy poca

deformación, existen otros como Moneles [7] Nimonic, Rene, Odimet, Astrolay y Waspalay [21].

### 2.2.2.- Superaleación Inconel 718

Denominado por la UNS (The unified numbering system) como N07718, es una aleación que corresponde al tipo de aleación de níquel (Ni) – cromo (Cr), posee una estructura cristalina cubica centrada en las caras (FCC), su composición química se puede apreciar en la tabla C, en donde se observan las cantidades que posee de cada uno de los elementos aleantes, el cromo (Cr) está en una cantidad considerable ya que su adición contribuye a la resistencia a la corrosión, después de este se encuentra el hierro (Fe) el cual ayuda a moderar su expansión térmica y mejorar la resistencia en ambientes de carburación (alto índice de carbono), donde se está en contacto con gases e hidrocarburos [23].

**Tabla C.- Composición química, aleación Inconel 718 [39].**

	Composición química							
Elementos	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	C	Ni
Composición (%)	19	3	5.1	0.5	0.9	18.5	0.04	Bal.

Algunas de sus propiedades físicas son, posee una temperatura de fusión que va de 1280 °C a 1336 °C y su densidad es de 8.19 g/cm<sup>3</sup>. Entre sus propiedades mecánicas esta su límite elástico de 50 000 psi, resistencia a la tracción de 144 000 psi y algunas más que se observan en la tabla D [23].

**Tabla D.- Propiedades mecánicas aleación Inconel 718 [21].**

		Propiedades mecánicas		
Aleación	Condición	Resistencia máxima a la tensión (psi)	Resistencia a la fluencia (psi)	Elongación en 50 mm (%)
Inconel 718	Forjable	49300	47850	88

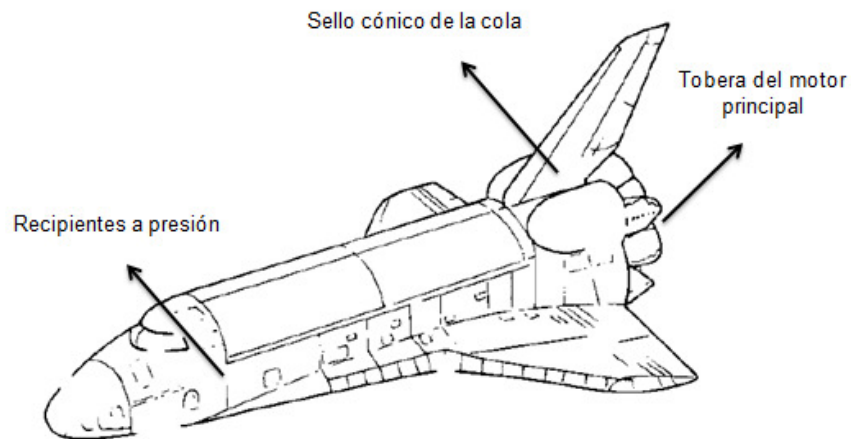
Su aplicación como material es amplio debido a su excelente resistencia a la corrosión, puede exponerse a ambientes críticos y no cambian sus propiedades [23].

### 2.2.3.- Aplicaciones y usos

- **Industria aeronáutica**

El inconel 718 es aplicado en la industria aeronáutica en partes como discos de turbina aplicada en componentes de motor [19], motores de turbina donde el fluido es gas, alabes de turbina en forma de paleta curva y también se utiliza en motores pequeños de 1000 lb en helicópteros [39] también en compresores en donde su cubierta exterior soporta esfuerzos extremos, en transmisiones y escape [13].

En un transbordador espacial, utilizado para el transporte de astronautas, se aplica la aleación correspondiente en el sello cónico de la cola, recipientes a presión, tobera del motor principal las cuales se observan en la figura 2, los sistemas de plomería y fiadores de alta resistencia no se ubican en la siguiente imagen ya que se encuentran en todo el transbordador [14].



**Figura 2.- Componentes de aleación Inconel 718 en transbordador espacial [14].**

- **Industria automotriz y alimenticia**

Sujetadores como pernos y postes ubicados en los autos [20], equipo de proceso en el manejo de alimentos a elevada temperatura [21].

### **2.3.- Aceros inoxidables**

Los aceros inoxidables se definen como aleaciones de hierro [11] en donde su principal elemento es el cromo (Cr) con un contenido mínimo de un 11%, aunque este se considera como un elemento muy reactivo, estando en contacto con otros elementos da lugar a nuevas sustancias con características y propiedades diferentes, en el caso de las aleaciones que lo contienen genera en su superficie una capa pasiva la cual está compuesta por óxido rico en cromo [34], presenta alta adherencia y es translúcido [38] mientras más alto sea el contenido de este [33] se generará una mayor resistencia ante la corrosión, por lo tanto se puede exponer a muchos ambientes [34].

A Harry Brearly se le conoce como el descubridor de este “metal milagroso”. En el periodo de 1905 a 1912 se descubrió de forma inesperada. Su primera aplicación fue en cuchillas finas, pero se detuvo a causa de la primera guerra mundial, cuando la fuerza aérea supo del material con el que estaban hechas, lo implementaron para hacer las válvulas de escape para los aeroplanos, gracias a esto se comenzó a comercializar, aunque en comparación con el acero este era muy caro. Para percibir mejor sus propiedades mecánicas y metalúrgicas León Guillet fue el primero en llevar a cabo estos estudios [11].

La composición química juega un papel muy importante [34], ya que mejora las propiedades microestructurales, físicas y mecánicas. Los elementos que se alean para llevar a cabo los diferentes tipos de aceros inoxidable son: níquel, cobre, aluminio, niobio, azufre, molibdeno, titanio, silicio, nitrógeno y selenio [38].

La aplicación de los aceros inoxidable comprende: estructuras arquitectónicas, utensilios de cocina y vajillas, aplicados ampliamente en la industria aeroespacial y en medios de transporte (automóviles, trenes) [11].

### **2.3.1.- Tipos de aceros inoxidable**

Los aceros inoxidable se dividen en cinco grupos: aceros inoxidable austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y aceros endurecidos por precipitación [38]. Los tres primeros grupos que se mencionan anteriormente con respecto a los tipos de aceros inoxidable, se le denominan conforme a una serie que comprende de 200, 300 y 400, establecido por AISI (American Iron and Steel Institute) [7].

- **Aceros inoxidables austeníticos:**

Son aceros al Cromo-Níquel-Manganeso y Cromo-Níquel [33], corresponde a las series de 200 y 300 [7]. Poseen una estructura cristalina cubica centrada en las caras (FCC) [38] y constituido por granos de austenita [34]. En cuanto a su contenido de Cromo (Cr) va de 16 a 26%, en el caso de Níquel (Ni) abarca de 8% hasta un 35% y por último el Manganeso (Mn) que se encuentra arriba de 2 al 15% [38]. Este tipo de aleación aparte de los elementos que se mencionaron, van en conjunto con el Carbono (C) y el Nitrógeno (N) los cuales estabilizan la fase austenítica [33].

Mediante el conformado en frio ya sea laminado, forjado entre otros [34], se llega a tener un acero con propiedades mecánicas diferentes pero benéficas [33], entre ellas la dureza, aumenta debido al conformado que se le aplique y no pueden ser tratados térmicamente solo si se encuentran en un estado de recocido [38].

En comparación con los aceros ferríticos y martensíticos su resistencia a la corrosión es muy buena, presentan alta resistencia tanto para la tensión como para el impacto [33].

Estos aceros son muy populares y reconocidos debido a que si su aplicación se requiere estar expuesta a altas temperaturas la buena resistencia que los caracteriza no cambia y son no magnéticos [38].

Su aplicación consiste en equipos que procesan alimentos [7] sistemas de conducción de agua de mar, construcción de elementos estructurales de plataformas [34].

- **Aceros inoxidables ferríticos:**

La serie que corresponde a estos aceros es la 400 [7]. Tiene un contenido de Cromo (Cr) que abarca de 10.5% a 30% [38] y de Níquel menor a 2% [34]. Su estructura cristalina se trata de una cubica centrada en el cuerpo (BCC) [38] y en cuanto a su microestructura está formada únicamente por ferrita [34]. Sus principales elementos estabilizadores aparte del cromo son los formadores de carburos como el Vanadio (V), Titanio (Ti) y Niobio (Nb), si se somete a calentamiento puede llegar a transformarse en austenita y por ende al crecimiento de grano [33].

Presentan magnetismo, son resistentes ante la corrosión [7] pero cabe mencionar que su resistencia no es tan buena como el austenítico [38] y se consideran los más económicos [34]. No pueden ser tratados térmicamente, pero en frío mejoran sus propiedades mecánicas [7], presentan buena ductilidad y formabilidad [38].

Estos aceros son aplicables en partes de hornos, tuberías de intercambiadores de calor, equipos de refinación de petróleo [7] recipientes en industrias alimenticias como en químicas [33] molduras de automóviles [7] y estampados profundos de piezas [33].

- **Aceros inoxidables martensíticos:**

Se trata de aleaciones de Cromo (Cr) y Carbono (C) [2] las cuales contienen una concentración de Carbón que va de 0.15% y 1%, en cuanto al Cromo abarca de 12% a 18% [34]. Su estructura corresponde a una cubica centrada en el cuerpo (BCC), mientras no es tratado térmicamente [38]. Corresponden a la serie 400,

pero solo están dentro de estos aceros 403, 410, 414, 416, 420, 431 y 440 [7].

Se efectúan tratamientos térmicos de temple y revenido para que adquieran una mayor resistencia a la corrosión, si comparamos este con respecto al austenítico no es buena ante este fenómeno [33], son magnéticos [7], su dureza está ligada con el contenido de carbón [34] y si se le llegase a colocar níquel en cantidades muy pequeñas se adquiere mejor resistencia a la corrosión [38].

Las aplicaciones en cuanto a este tipo de acero comprenden desde cubiertos, tijeras [7], cuchillería [33], partes de válvulas y bombas, instrumentos quirúrgicos, accesorios de aviones, motor de turbina [7], aletas para turbinas, rodets de turbinas hidráulicas [33] y herrajes marinos [7].

- **Aceros inoxidables dúplex:**

Los principales aleantes son el Cromo (Cr) – Níquel (Ni), pero pueden ser mezclados junto con el Wolframio (W), Nitrógeno (N), Silicio (Si), Molibdeno (Mo) y Cobre (Cu) [38]. Microestructuralmente está constituido por dos fases: ferrita y austenita [34], tienen una estructura combinada por lo antes mencionado, cubica centrada en el cuerpo (BCC) y cubica centrada en las caras (FCC) conforme al orden, obteniendo un balance con la misma cantidad para ambas fases y conseguir propiedades deseadas [38]. Presentan una alta resistencia a la corrosión, una elevada resistencia mecánica, un límite elástico de 700-900 MPa. Su aplicación va desde la industria alimentaria y tanques de almacenamiento para buques de carga [34].



- **Aceros endurecidos por precipitación:**

Son aleaciones Cromo (Cr) – Níquel (Ni), contienen elementos que forman precipitados como el Titanio (Ti), Aluminio (Al) y Cobre (Cu). Cuando se lleva a cabo un tratamiento térmico, se observa que estructura se formó y posteriormente se determina si es acero austenítico o martensítico ya que solo se asocia con estos dos tipos de aceros inoxidables [38].

### **2.3.2.- Acero inoxidable 321**

Los aceros austeníticos se pueden dividir en cinco [19]:

- 1) Austeníticos convencionales; 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 310, 316 y 317.
- 2) Composiciones estabilizadas; 321, 347 y 348.
- 3) Niveles bajos en Carbono; 304L, 316L Y 317L.
- 4) Grados de alto Nitrógeno; 201, 202, 304N, 316N y la serie Nitrógeno.
- 5) Altamente aleados; 317LM, 317LX, JS700, JS777, 904L. AL-4X, 2RK65, Carpenter 20Cb-3, Sanicro 28, AL-6X, AL-6XN Y 254 SMO.

El acero 321, es un acero inoxidable austenítico estabilizado, contiene un 16% de Cromo (Cr), 7% de Níquel (Ni) [29]. Para llevarse a cabo un tratamiento térmico en estado de recocido las temperaturas recomendadas son de 955 °C – 1065 °C (1750 °F - 1950 °F) [19], este proceso se lleva a cabo para obtener una resistencia máxima a la corrosión [38]; si es efectuado erróneamente se genera la precipitación de carburos de cromo ( $Cr_{23}C_6$ ) en un rango de temperatura entre 650 y 800 °C, teniendo como resultado una cantidad de Cromo de un 2 o 3% lo cual no

cumple con las expectativas de ser un acero inoxidable austenítico [29].

Entre sus propiedades mecánicas y físicas posee una densidad de  $7.9 \text{ g/cm}^3$ , su punto de fusión se encuentra de 1400 a 1425 °C, si esta se encuentra constante tiende a fundirse (metal líquido), tiene una resistencia a la tracción de 72,500 a 217,500 psi (500 a 1500 MPa) y su dureza es de 160 a 190 Brinell [38], en la tabla E se pueden observar los elementos que componen a este acero [19].

**Tabla E.- Composición química, acero inoxidable 321 y 321H [19].**

Tipo	UNS* Designación	Composición química (%)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Otros
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x %C min Ti
321 H*	S32109	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x %C min Ti

\*H: mayor cantidad de carbono para alta temperatura.

\*UNS: The unified numbering system (El sistema unificado de numeración)

Debido a su gran dureza es difícil maquinarlo [25] es no magnético en estado recocido, un imán no lo puede atraer [38], posee gran resistencia a la corrosión [25] sus propiedades a altas temperaturas son buenas, si se le aplica una fuerza en su sección transversal será difícil que sufra alguna deformación o ruptura ya que tiene buena resistencia al desplazamiento longitudinal y por tensión, en la tabla F se muestran otras propiedades importantes [38].

**Tabla F.- Propiedades mecánicas de acero inoxidable 321 [3].**

Acero	Propiedades mecánicas			
Austenítico	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de elongación	Condición
321	85 000	35 000	55	Recocido

### 2.3.3.- Aplicaciones y usos

- **Industria Aeronáutica**

Sistemas de plomería [14], transmisiones y escape, que están situados en la parte del motor [13].

- **Industria automotriz y alimenticia**

Cámaras de combustión, defensas traseras y delanteras, molduras, sistema de escape y filtros que se ubican en la industria automotriz. Equipo para la cocina, barriles de cerveza para almacenaje, transporte y disposición, equipos de proceso de alimentos y bebidas, tarjas, lavavajillas, ollas y sartenes [45].

### 2.4.- Aluminio

Es un elemento químico, su símbolo corresponde a Al y le corresponde un número atómico de valor 13, comprende el 8% de la corteza terrestre, se encuentra en la vegetación y en algunas rocas, su color es blanco [44]. Su estructura cristalina corresponde a una cubica centrada en las caras (FCC) [12]. Posee una densidad de  $2.70 \text{ g/cm}^3$  esta cantidad lo posiciona como un metal ligero [28], este valor solo abarca una tercera parte de la densidad del acero [7]. Entre sus propiedades físicas se encuentra que su punto de ebullición es de  $2467 \text{ }^\circ\text{C}$  y fusión de  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  [12] debido a que es bajo no es recomendable que se exponga a temperaturas

elevadas. Posee una característica la cual contribuye a su utilización, ya que no presenta una transición de dúctil a frágil, sus propiedades se mantienen iguales a ser sometido a diferentes temperaturas [28]. Tiene buena conductividad térmica y eléctrica [7]. Es no magnético, su resistencia a la oxidación es muy buena [28] ya que estando en contacto con la atmosfera crea una delgada capa invisible de óxido [7] conocida como alúmina u oxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) debido a su dureza es fuerte ante la corrosión [12].

Con respecto a sus propiedades mecánicas, es maleable el cual permite llegar a generar láminas muy delgadas con un espesor mínimo [7], su resistencia a la tensión es de 13 000 psi [28], la más importante es su conformado por mecanizado con máquinas [7] ya que con gran facilidad puede adquirir cualquier forma que se le designe [28].

El aluminio no es toxico [7], es por ello que en la actualidad su reciclaje mediante el uso de contenedores de bebidas, industrias que producen mercancías forjadas [44] solo requiere del 5% de energía que se consume en su producción inicial proveniente de la bauxita, es una roca, compuesta en su mayoría por óxidos de aluminio ( $Al_2O_3$  alúmina) [28]. Su precio en la actualidad se iguala con el del cobre [44].

Su aplicación en estado puro es en reflectores fotográficos [7] en la industria del transporte, empaquetamiento de comidas y bebidas, construcción [28] ya que por ello se le denomina como el metal estructural más abundante [44] utensilios de cocina y el más común de uso cotidiano hablamos del papel de aluminio [7].

### 2.4.1.- Aleaciones desarrolladas con Aluminio

Para obtener mejores características físicas y mecánicas de las que posee el aluminio puro, se lleva a cabo la mezcla con diferentes elementos como son: cobre, manganeso, silicio, magnesio y zinc para formar aleaciones [7]. La designación que se les da a las aleaciones de aluminio viene expuesta por The Aluminum Association usando cuatros dígitos al sistema, las cuales abarcan desde 1000 hasta la serie 7000. Cabe mencionar que esta designación solo corresponde a las aleaciones forjadas ya que comparadas con las fundidas presentan un grano más fino, son más fuertes y presentan mayor resistencia a la fatiga y al impacto. En la tabla G se aprecia la designación de aleaciones con sus respectivos aleantes [30].

**Tabla G.- Serie de aleaciones forjadas de Aluminio [30].**

Serie	Aleante principal
1XXX	99% Aluminio
2XXX	Cobre (Cu)
3XXX	Manganeso (Mn)
4XXX	Silicio (Si)
5XXX	Magnesio (Mg)
6XXX	Magnesio (Mg) y Silicio (Si)
7XXX	Zinc (Zn)

Cualquier tipo de serie puede venir acompañada por una designación de tratamiento térmico separada por un guion o enseguida. Se encuentran cuatro diferentes tipos, los cuales se designan por letras y son [7]:

**F:** condición de fabricado

**O:** recocido

**H:** endurecido por deformación

- H1: solo endurecido por deformación.
- H2: templado por deformación y posteriormente recocido.
- H3: endurecido por deformación y estabilizado.

**W:** tratado térmicamente en solución

**T:** tratado térmicamente según la aleación

- T3: tratado térmicamente a solución y posterior trabajo en frio.
- T4: tratado térmicamente a solución y envejecida naturalmente.
- T5: envejecido artificial.
- T6: tratamiento térmico, solución luego envejecida artificialmente.
- T7: tratamiento térmico y solución estabilizada.
- T8: tratamiento térmico, trabajo en frio y envejecimiento artificial.
- T9: tratado térmicamente en solución, envejecimiento artificial y posterior trabajo en frio.
- T10: envejecimiento artificial y trabajo en frio.

#### **2.4.2.- Aleación Aluminio 6061**

Este tipo de aleación corresponde a la serie 6XXX, sus principales aleantes que lo componen son el Silicio (Si) 0.5% y el Magnesio (Mg) 0.5% [43], dando como resultado de su mezcla, el precipitado de siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) [7]. Estos dos elementos al ser

combinados con el aluminio, aumentan su resistencia mecánica [12], debido a que este tipo de aleación endurece por tratamiento térmico, también conocido como endurecimiento por envejecido, se trata de la existencia de precipitados en segundas fases, los cuales son partículas diminutas generadas por una solución sólida sobresaturada en enfriamiento [42]. En la tabla H se puede observar la composición química de dicha aleación [43].

**Tabla H.- Composición química aleación 6061 [43].**

Elementos químicos	Si	Cu	Mg	Cr	Fe	V	Ti	Al	Otros
Composición (% en peso)	0.618	0.302	0.836	0.039	0.269	0.008	0.014	97.873	0.042

Este tipo de aleación se considera la más versátil porque se adapta fácilmente a la aplicación que se le otorgue [30], es muy resistente a la corrosión [7], accede a la utilización de recubrimientos [43], posee buena soldabilidad y se puede tratar térmicamente para que adquiera distintas propiedades mecánicas [30]. En la tabla I se pueden apreciar distintos valores que corresponden a sus propiedades mecánicas [7].

**Tabla I.- Propiedades mecánicas aleación 6061 [7].**

Aleación	Propiedades mecánicas			
	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de elongación*	Condición
6061	18 000	8 000	30	Recocido
	45 000	40 000	17	Envejecido

\*Muestra de ½ pulgada de diámetro.

Este tipo de aleación 6061 es utilizada en perfiles arquitectónicos, marcos de bicicletas, estructuras soldadas y en la fabricación de equipos de transporte [35].

#### **2.4.3.- Aplicaciones y usos**

- **Industria aeronáutica**

Desde el año de 1914 fecha en que comenzó la segunda guerra mundial, se maneja el aluminio en las aviaciones [44].

Su aplicación en la industria aeronáutica de la aleación 6061 es comúnmente utilizada en mallas de refuerzo, las que se ubican en las pistas de aterrizaje [7] componentes secundarios de fuselaje [12] en las alas costillas, conductos, tanques, carenado y en el armazón [31], accesorios, pasadores de bisagras, pistones hidráulicos y de freno [43].

Cabe señalar que dependiendo el modelo del avión existe el empleo de esta aleación de aluminio, El avión Boeing 777, es un avión comercial en donde viajan más de 500 pasajeros, el 65% fue echo de aluminio [12], pero para un avión J1 el cual se trata de un avión para solo un pasajero, abarca desde el recubrimiento del ala y de la cola, vigas de las alas y costillas que se encuentran en las superficies de control y en el recubrimiento del motor [32].

- **Industria automotriz y alimenticia**

Pistones de freno e hidráulicos, pasadores de bisagras [7] y marcos de vehículos [30]. En cuanto a la aplicación de alimentos está en el almacenamiento de alimentos, utensilios de cocina como ollas, cazuelas, vajillas, cubiertos [7] y en las latas comerciales para las bebidas y en empaques de alimentos para su comercialización [28].



## 2.5 Motor de avión

En la figura 3 podemos observar los diferentes metales y aleaciones de estos mismos, que componen un motor de avión, dentro de estos se encuentran diferentes aleaciones como las de titanio, inconel, acero inoxidable y aluminio. Debido a su importante aplicación de estos, es necesario determinar un método de limpieza apto para no provocar algún tipo de deformación o cambio en sus dimensiones.

El siguiente motor se trata de un modelo Trent 800, se considera uno de los motores más ligeros, entro en servicio en abril de 1996 para tipos de aviones comerciales [39].

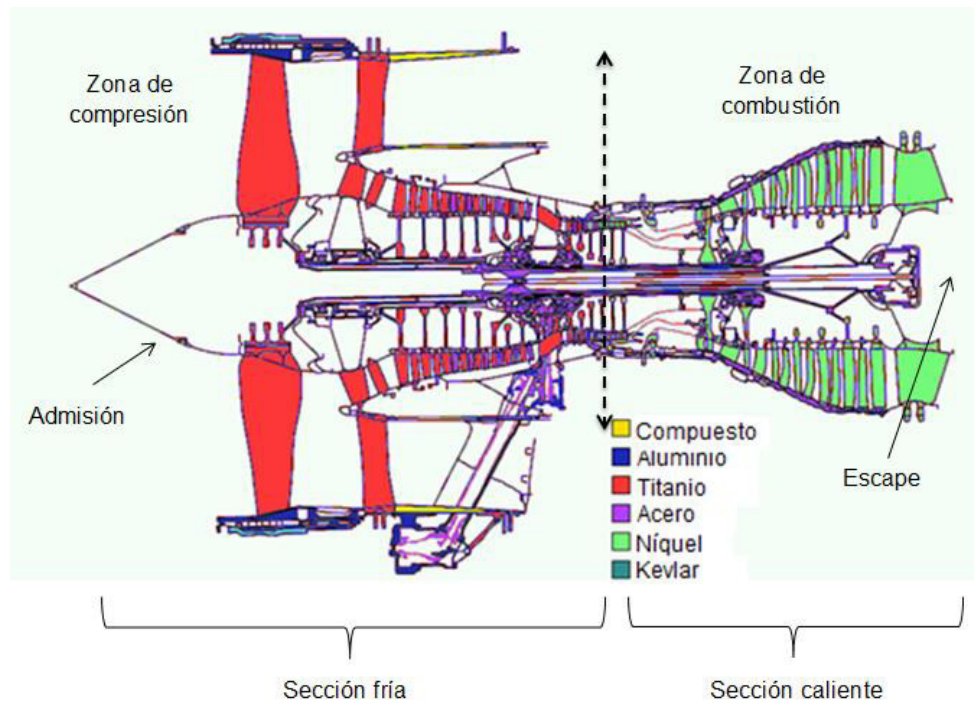


Figura 3.- Metales que componen un motor [39].

## **2.6.- Limpieza**

Las piezas de metales con forma, tamaño y diferente presentación, deben ser sometidas al proceso de limpieza. Contribuye de manera positiva debido a que libera de las superficies diversos contaminantes como partículas de polvo, virutas, grasas, aceites, óxido, etc., de esta manera obtendremos un acabado superficial con calidad en cuanto a pintura, soldadura y cualquier tipo de recubrimiento. La limpieza se divide en cuatro tipos, los cuales son: limpieza química, limpieza mecánica, limpieza con plasma y limpieza con agua a baja presión (steam cleaning), dependiendo de la suciedad a remover y el tipo de metal que lo posee, se selecciona un método o hasta dos para que se tenga una superficie eficaz para un posterior proceso.

### **2.6.1.- Limpieza superficial**

La limpieza es un proceso mediante el cual se elimina cualquier tipo de suciedad superficial, se debe incluir dentro de la manufactura o maquinado en donde se les da forma y tamaño a las piezas en diferentes sectores como en la industria alimenticia, aeroespacial, automovilística, siderúrgica entre otras [17].

Es de importancia llevarlo a cabo para tener una superficie limpia que cumpla con los estándares para una aplicación correcta de pintura, adhesivos o tratamientos superficiales como nitruración, galvanizado, cromado u otro tipo de proceso en su acabado final, también pueda ser el caso en donde la misma suciedad que está en contacto con la superficie reaccione de forma negativa, provocándole incrustaciones de la misma suciedad [17], además va a depender de una buena unión con adhesivos, estos se utilizan cuando presentan algún error en la unión de metales en el

ensamblado [24], en el proceso de soldadura y para obtener un mejor desempeño de la pieza en el momento en que desarrolle su función [21].

Este proceso se aplica para remover cualquier residuo o suciedad, sólidos, líquidos y semisólidos que se encuentre en la superficie de la pieza [21] ya sea por el medio ambiente donde se encuentre y en donde se elabora, la manipulación que hacen los trabajadores, el mecanizado que se va haciendo con anterioridad. Las principales suciedades que se pueden encontrar en los metales son: partículas sólidas; como polvo en el ambiente, virutas del mismo material que se generan por la acción de mecanizado por extrusión, laminado, forja, etc., en donde se van desprendiendo parte del material que es sobrante de las dimensiones que se quieren llegar a obtener. Aceites y grasas; los primeros son utilizados como lubricantes en el mecanizado de la pieza para que al momento en que se esté llevando a cabo el corte o conformado no se caliente el metal y la maquina tenga más tiempo de vida, en cambio con respecto al segundo se tienden a cubrir las piezas con grasa ya que protege a corto tiempo el fenómeno de corrosión. Otro tipo de suciedad son el óxido o cascarilla de herrumbre; conforme la pieza este en el medio ambiente en contacto con oxígeno, sin ningún tipo de pintura anticorrosiva u otra especie de protección, se comenzará a formar una capa o película de óxido delgada hasta llegar a extremos severos de picaduras y degradación del material. Compuestos para abrillantado; para obtener un acabado final homogéneo, la pieza de metal se tiene que pulir lo cual arroja a la misma superficie, partículas del mismo dejándolas como suciedad, por la fricción del pulido se puede incrustar si no se tiene de forma

constante un método de limpieza y compuestos pigmentados; recubrimiento de pintura, en cuanto se coloca en la pieza y la reacción con el metal, genera una capa dura protectora en un lapso de tiempo [4].

Existen diferentes factores que se toman en cuenta antes de comenzar la selección del proceso de la limpieza, el principal es detectar el tipo de suciedad que se tiene en la superficie, algunos de ellos se mencionaron anteriormente, las piezas necesitaran un grado de limpieza dependiendo del proceso que se procederá a realizar, esto difiere de una industria con otra ya que no todas llevan el mismo tipo de mecanizado, después, el tipo de material al que se le aplicara la limpieza, se puede tratar de metales, aleaciones, cerámicos, plásticos, entre otros, como sabemos tienen propiedades físicas, químicas y mecánicas diferentes, también dependerá del tamaño, la forma y los puntos ciegos que tenga de esto dependerá la técnica que se usara si es por aspersion en donde se esparcen partículas muy finas de líquido sobre la superficie, inmersión es cuando la pieza se introduce por completo en un líquido, frotamiento manual o desengrasado con vapor. Al momento de seleccionar la solución de limpieza deberá cumplir con requisitos de seguridad para los trabajadores que estén a cargo de esta área, usar su equipo de protección adecuada para que no repercuta en su salud, no sea tan agresivo para el medio ambiente y cumpla con normativas específicas para su uso, finalmente los costos que se generaran para montar los equipos necesarios, recipientes y los productos que se consumirán al momento de la producción [17].

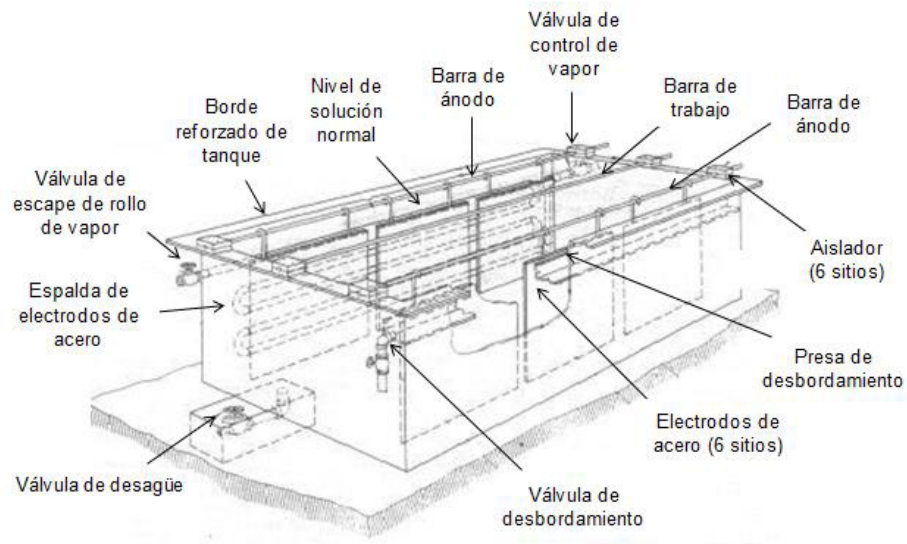
La limpieza se puede llevar a cabo mediante tres tipos de procesos, la primera se trata de una limpieza química en donde se

utilizan productos químicos, el segundo método se trata de una limpieza mecánica en donde se hace contacto con la pieza mediante mecanismos de movimiento y los terceros que cambian las propiedades superficiales y por lo tanto sus propiedades físicas, a continuación, se mencionan las técnicas que se utilizan para cada uno de ellos [17]:

### **2.7- Métodos de limpieza química:**

#### **2.7.1.- Limpieza alcalina:**

Es el método más empleado en las industrias debido a sus bajos costos en las soluciones químicas que emplean, las cuales constan de bases fuertes como el hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), generalmente se calientan en un rango de temperatura que va de 50 a 95 °C, en donde la pieza se trata por inmersión o aspersion. Las suciedades que se remueven con este tratamiento son: ceras, grasas, aceites y partículas que se encuentren en la superficie como sílice, carbono y restos del propio metal [17]. En la figura 4, se puede observar el proceso de limpieza alcalina, mediante la técnica electroquímica, esta limpieza es muy usada debido a que genera mucha eficiencia a la hora de que el metal se someta a un recubrimiento de un metal precioso, mejor conocido como (chapado). Se trata de un proceso un poco riesgoso debido a las temperaturas que manejan y al choque de burbujas de hidrogeno y oxigeno que se generan en la superficie del líquido (alcalino), es por ello que se tiene que mantener en ventilación por los gases que se desprenden [4].



**Figura 4.- Tanque de limpieza alcalina electroquímica [4].**

### **2.7.2.- Limpieza electrolítica:**

Llamada también como electrolimpieza, a diferencia de la anterior, se le debe aplicar una corriente con valores de 3 a 12 voltios (V) [17], generando burbujas abrasivas que se van colocando en la superficie de la pieza a limpiar, las cuales van desprendiendo la suciedad (óxido) [21].

### **2.7.3.- Limpieza con emulsión:**

Se utiliza tanto en metales como en no metales, como líquido de limpieza aplican solventes orgánicos los cuales son inmiscibles en agua o jabón, es por ello que tienden a generar dos fases. Al momento de estar en contacto con la suciedad (grasa y aceite) de la superficie, comenzará a disolverla, dejando una capa de hidrocarburos para evitar la oxidación, posteriormente se necesitará una limpieza alcalina para eliminar los solventes orgánicos que se hayan adherido a la pieza [17].

### 2.7.4.- Limpieza con solventes:

Elimina grasas y aceites de las superficies de metales, la solución disuelve la suciedad dejando la pieza libre [17]. Es importante mencionar que estos líquidos a emplear son inflamables y tóxicos, se debe tener precaución al utilizarlos [21]. Cuando se trata de piezas pequeñas que su intención no es limpiarlas a profundidad sino solamente eliminar residuos de pulido, se llevan a un equipo como el que se observa en la figura 5, debido a que la aplicación es rápida, precisa y mediante la capucha ventilada y el deshumidificador pueden tratar fácilmente los gases tóxicos y flamables porque se utiliza poca cantidad del solvente [4].

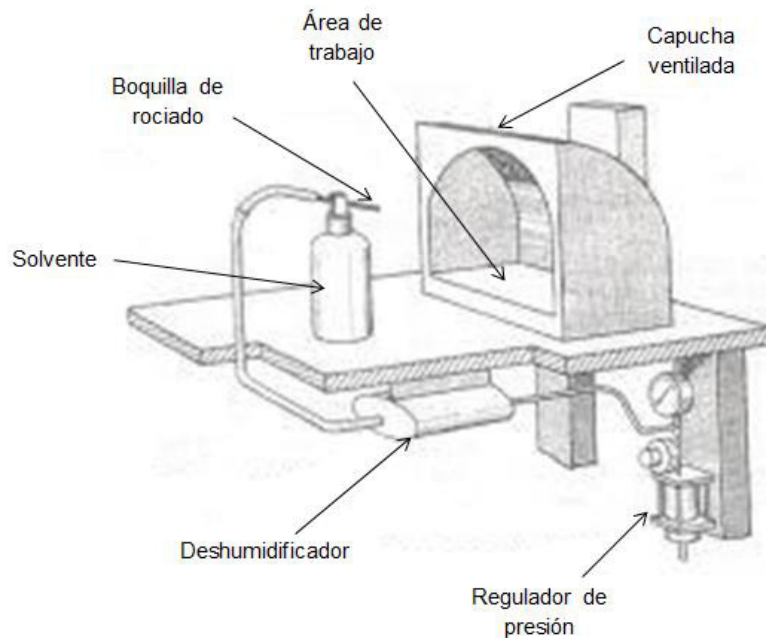
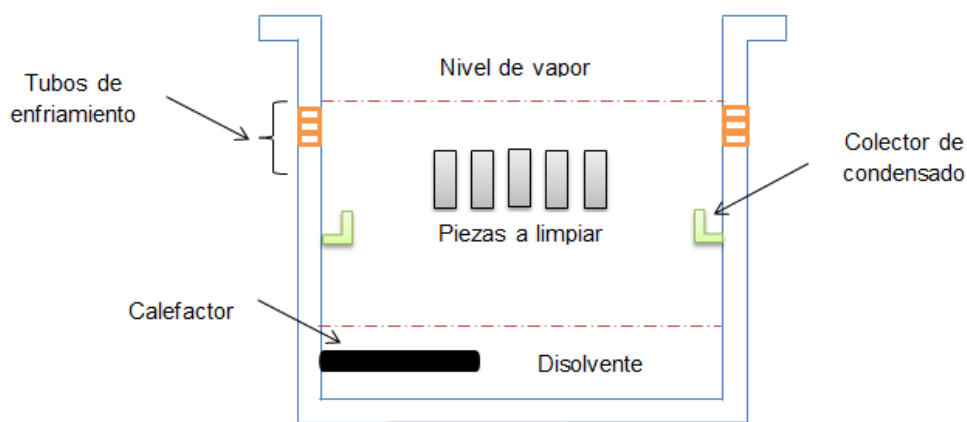


Figura 5.- Limpieza con solvente, técnica de rociado [4].

#### 2.7.4.1.- Desengrasado con vapor:

Esta técnica se lleva a cabo con soluciones cloradas como el percloroetileno ( $C_2Cl_4$ ), cloruro de metileno ( $CH_2Cl_2$ ) y el

tricloroetileno ( $C_2HCl_3$ ), en donde deben calentarse hasta su punto de ebullición el cual es bajo, por ende, es rápido el proceso. Posteriormente las piezas se sumergen en el contenedor donde se encuentra el vapor, removiendo la suciedad haciéndola más espesa y dirigiéndola a la parte inferior del recipiente. Se trata de un tanque abierto, el cual contiene un solvente clorado en la parte inferior calentándolo (hervir), de tal manera que producirá un vapor caliente, figura 6. El vapor al estar en contacto con la pieza fría, comienza a disolver la suciedad de la superficie, los colectores de condensado cumplen con la función de no dejar escapar el vapor, finalmente la pieza se extrae y se deja secar [17]. Aparte de que es un proceso fácil las piezas ya no necesitaran someterlas a otro tipo de limpieza y la suciedad se desprende con el líquido en vapor [21].



**Figura 6.- Tanque de limpieza, desengrasado con vapor [24].**

### 2.7.5.- Limpieza acida:

A comparación con los métodos que se mencionaron con anterioridad aparte de eliminar aceites también remueve óxidos que se generan en la superficie del metal a lo que se le conoce



como corrosión y partes cubiertas con pastas pesada [21]. Como su nombre lo dice usa sustancias acidas, entre ellos tenemos los ácidos clorhídricos (HCl), sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nítrico (HNO<sub>3</sub>) y fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), aplicados con técnicas de frotado, inmersión, aspersión y con brocha ya sea que se encuentren a temperatura ambiente o elevadas, sin embargo se debe de prevenir los gases tóxicos que se emiten a temperaturas elevadas [17].

#### **2.7.5.1.- Baño acido:**

Es un método más agresivo generando en el metal picaduras, degradación y ataque en la superficie provocando daños irreparables en sus propiedades físicas. Se enfoca a desprender de la superficie incrustaciones gruesas y óxidos [17].

#### **2.7.6.- Limpieza ultrasónica:**

Se trata de una limpieza que involucra una solución alcalina junto con un mecanismo de agitación. Se lleva a cabo mediante la provocación de ondas vibratorias con una frecuencia alrededor de 20 a 45 Kilohertz (KHz), remueve la suciedad que está adherida por medio del choque que se genera por la onda, es importante tener la solución a una temperatura elevada de 65 a 85 °C [17].

#### **2.8.- Métodos de limpieza mecánica:**

Estos métodos se caracterizan por estar en relación, mediante la acción de frotamiento, con el tipo de suciedad que posee la superficie [21]. La pieza junto con diferentes abrasivos provoca una acción de frotamiento o un impacto a presión entre ambos para obtener la limpieza deseada. Existen diferentes tipos de abrasivos, se trata de los naturales también conocido como

suaves, utilizados para un acabado superficial libre de birutas, comprenden el corindón, piedra caliza o granito, cascarras de nuez, perlas de nylon, mientras desempeñan su función se desgastan, por lo tanto su tamaño varía unos con otros, teniendo partículas muy pequeñas que se pueden atrancar en la pieza en puntos ciegos que llegase a tener, otros serían los sintéticos o duros, dentro de este grupo tenemos el óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y carburos de silicio (SiC) aplicados para incrementar la dureza de las superficies, por último, los de acero, se utilizan para el pulido de piezas (brillo), poseen formas de esfera, cono, perno, esto depende del tipo del material y la pieza que se desee pulir. En la figura 7, se muestran las diferentes formas que puede tener el medio abrasivo [17]. Es importante tener en cuenta el tamaño de granulometría del abrasivo a utilizar, si este no tiene el tamaño adecuado puede provocar surcos y puntos de corrosión los cuales por su profundidad facilitan el incremento de grietas en el metal [24].



**Figura 7.- Formas y figuras de abrasivos a) medios abrasivos convencionales, b) formas de acero para pulido [17].**

Los métodos que se llevan a cabo se enumeran a continuación:

### **2.8.1.- Acabado a chorro y granallado:**

Ambos métodos se llevan a cabo mediante abrasivos que salen a presión a una velocidad considerable, impactándose sobre la superficie a limpiar. Sus principales suciedades a remover son óxidos y escamas de este mismo, residuos de soldadura y pintura envejecida [17].

En el proceso de acabado a chorro se emplean abrasivos duros y suaves junto con agua, dependiendo del metal que se vaya a someter a este tipo de limpieza. El abrasivo de carburo de silicio (SiC), es mejor conocido como chorro de arena y es el más empleado por su bajo costo [17].

En el caso del granallado utiliza como medio abrasivo los perdigones, los cuales se tratan de esferas de acero fundido, esferas de diámetros pequeños que impactan al metal, su principal objetivo es obtener una mejor resistencia a la fatiga, teniendo como segundo término la limpieza del metal [17].

### **2.8.2.- Acabados masivos:**

Las piezas que son sometidas a estos procesos de acabado son piezas maquinadas, en condición de fundidas, forjadas y extrusiones para remover de su superficie rebabas, virutas, incrustaciones.

Este método consiste en la mezcla de un medio abrasivo y las piezas a limpiar dentro de un contenedor, en donde los dos efectúan una acción de frotamiento teniendo como resultado el acabado deseado de la pieza. En el contenedor se colocan varias piezas ya que si la limpieza se hace individualmente sería muy costoso, es por ello que solo se aplica para piezas pequeñas.

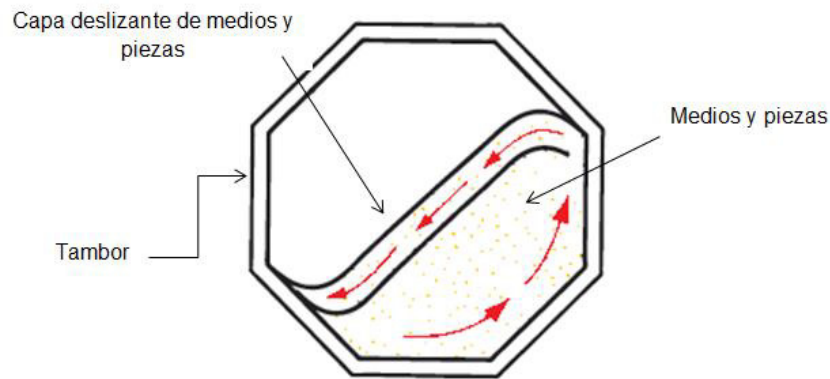
Existen varias técnicas en donde se aplican fuerzas centrífugas como:

**2.8.2.1.- Acabado vibratorio:**

Utiliza un equipo vibratorio en donde la fuerza vibratoria produce el frotamiento de las piezas y el abrasivo, se comienzan a limpiar las piezas pequeñas tanto en su superficie externa como en puntos ciegos que esta pueda tener. Se requiere de muy poco tiempo por ello no se produce tanto ruido y es fácil observar el grado de limpieza ya que el equipo está abierto [17].

**2.8.2.2.- Rotación a tambor:**

También conocido como acabado en barril por rotación. El contenedor en forma horizontal que se utiliza en este proceso se trata de un prisma hexagonal u octagonal, dentro de este, se coloca las piezas y el medio abrasivo, el movimiento es de sube y baja en forma repetitiva, obteniendo piezas con un acabado superficial en la parte exterior. En la figura 8 se puede apreciar el mecanismo, se realiza en sentido contrario de las manecillas del reloj y con una vista lateral. Cabe mencionar que para colocar este equipo se necesita un espacio grande, para obtener una pieza con un acabado ideal se llevara muchas horas en comparación con el método de vibración y por el movimiento de rotación el ruido que genera es molesto [17].



**Figura 8.- Mecanismo de rotación a tambor [17].**

### 2.9.- Limpieza con plasma

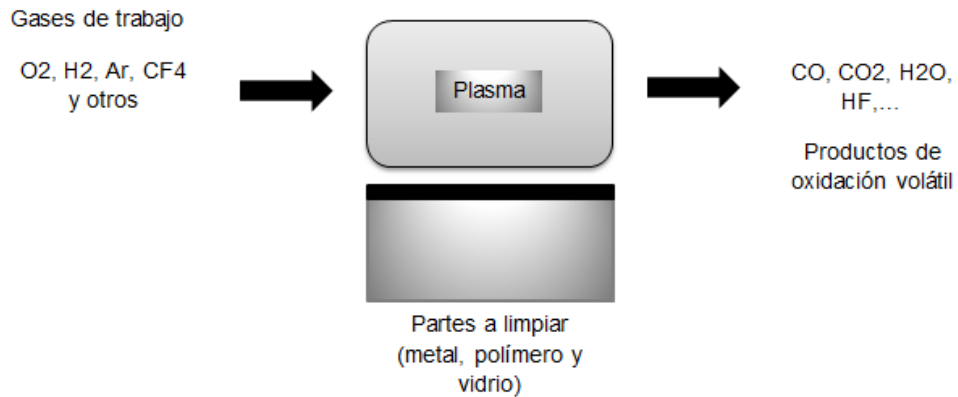
Los diferentes materiales que se pueden someter a este tipo de limpieza son metal, vidrio, cerámicos y polímeros (plásticos), su principal función es eliminar películas orgánicas de espesor considerablemente fino como grasa, cera y pigmentos. Su proceso el cual se muestra en la figura 9, consiste en un cilindro con un volumen alrededor de  $5 \text{ m}^3$  el cual se encontrara al vacío, con un peso máximo de 400 Kg, utilizando una potencia de 18Kw, los gases que se manejan son el oxígeno, hidrogeno, argón y fluoruro de carbono, en donde los iones penetran materiales porosos con formas complicadas haciendo que la suciedad se desprenda en forma de gas generando agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), entre otros, estos tipos de gases en la actualidad son fáciles de tratar para no ocasionar contaminación atmosférica.

Si se tratan de películas de suciedad arriba de 0.2 mm de espesor no se podrá utilizar este tipo de proceso, sin embargo, se tendrá que llevar a cabo una pre limpieza en húmedo ya sea por cualquier solución química que sea adecuada para el metal a limpiar. Cuando se efectúa la limpieza correctamente se puede

tener un finalizado excelente de adhesión, pintura, soldadura etc., la aplicación es segura, limpia, es económica y cumple con estándares industriales.

Se aplica en la industria aeronáutica con la limpieza superficial de titanio, aluminio y sus aleaciones, aplicaciones médicas para la limpieza, esterilización de prótesis, en microelectrónica en la limpieza de inyectores. [36]

Se define como grado de limpieza a la suciedad que puede llegar a quedarse en la superficie de la pieza que se sometió a cualquier método de lavado. Si se tratan de partículas de polvo, grasa u otras suciedades que sean visibles y fáciles de retirar, se necesitara de frotar la superficie de la pieza con una tela blanca y limpia, percibiendo si esta retiene alguna mancha o suciedad que con anterioridad pudimos observar [17], otra prueba que se puede llevar a cabo para verificar si está libre de grasa y aceites es mediante una capa de agua, si las gotas se sitúan espaciadamente e individualmente en la superficie quiere decir que no está limpia [21], también existen normas como las SSPC (Steel Structures Painting Council) en donde especifican la forma correcta de limpiar la superficie de los metales, si se sigue a pie de la letra no será necesario tratar de cuantificar el grado [40].



**Figura 9.- Proceso de limpieza con plasma [36].**

### **2.10.- Limpieza con agua a baja presión (steam cleaning)**

Método de limpieza y preparación superficial, utiliza agua a altas presiones provocando un chorro en forma de abanico hacia la suciedad a remover [15]. Su primera aplicación fue en la industria siderúrgica en la época de 1920, en donde los moldes como las piezas que se obtenían, se limpiaban bajo el efecto de líquido presurizado, eliminando partículas no deseadas que podían afectar en el vaciado del metal fundido y en el terminado correcto de la pieza [27].

Los materiales como el acero, concreto, piedra, asfalto, metales y vidrio, pueden poseer una superficie libre de suciedad con este método ya que toma actuar químicamente ante el método que se vaya a exponer la pieza provocando una mala adhesión sin tener un resultado homogéneo en la pieza. Los tratamientos superficiales son aplicados para proteger a los metales de la corrosión para que dure un periodo de tiempo (años) sin perder sus propiedades físicas y brinde un mejor servicio a la hora de iniciar su función, algunos de ellos son el galvanizado, cromado, niquelado, pintura, barniz, entre otros, dependiendo del material

de interés [17]. Las principales suciedades que elimina de los metales son recubrimientos así sean capas gruesas de pintura, como la de aceite, esta es utilizada para proteger contra la corrosión, pinturas a base de epoxi, su función es tapar los poros que pueda poseer la superficie [15], incrustaciones del mismo metal (polvo), suciedad soluble en agua como la sal, diferentes capas de óxido por estar en contacto con el medio ambiente, grasa y aceite los cuales se utilizan como protectores y lubricantes [27].

El principal líquido que lleva a cabo la función de limpiar la pieza de trabajo es agua limpia ( $H_2O$ ), pero para que la superficie cumpla las expectativas de la industria, se le agrega al agua un cierto porcentaje de concentración de productos químicos como ácidos, solventes, álcalis, desengrasantes, desincrustantes y desinfectantes [47].

Es necesario contar ya sea con una bomba con intensificador, e hidrolavadora (Kärcher), en donde se regulará la cantidad de presión a la cual saldrá el agente de limpieza por una boquilla de tamaño adecuado [15]. El chorro del líquido presurizado toma la forma de abanico [27]. La técnica que se desarrolla en este proceso es de aspersión en donde gotas de tamaño muy fino se impactan en la superficie de la pieza [17], provocando que se introduzca hasta los microporos que tenga el sustrato (metal) [47].

Se puede realizar en estado estático, donde la boquilla esta fija y la pieza a limpiar se puede mover en eje X (izquierdo - derecho) y en eje Y (arriba – abajo), estableciendo con anterioridad la distancia de separación entre la salida del chorro y la pieza, también puede ser utilizado en desplazamiento en donde la



persona calificada para realizar este tipo de proceso se mantiene a una cierta distancia moviendo manualmente la pistola de presión de arriba abajo o de un lado a otro, sobre la superficie. En la figura 10 se muestra el método aplicado manualmente, este proceso fue el que llevamos a cabo en las diferentes laminas [15].

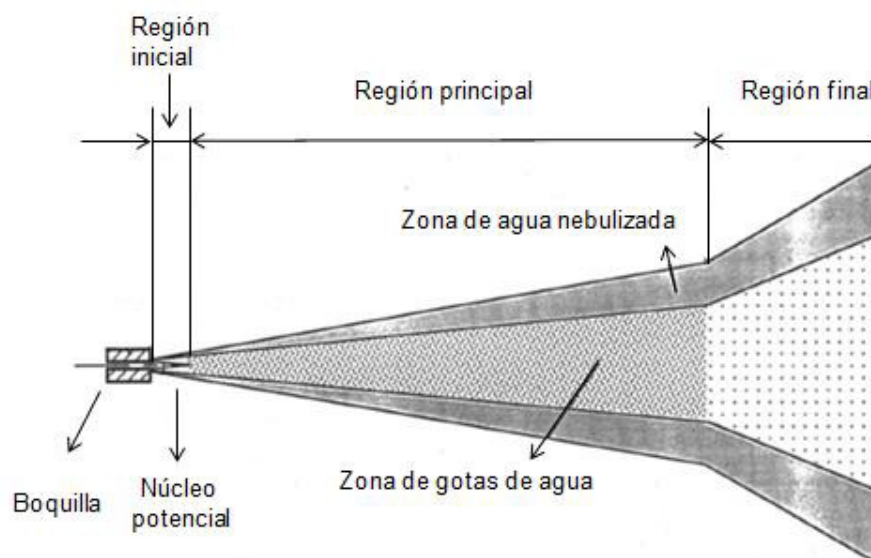


**Figura 10.- Limpieza con agua abaja presión aplicado manualmente [fuente propia]**

La forma del chorro contribuye en gran parte, al aire que se encuentre en el lugar donde se efectúa este tipo de limpieza, ya que si no se encuentra en un lugar cerrado o apto, podría alterar la forma del chorro resultado una limpieza mal aplicada, posee tres tipos de zonas: inicial, principal y final, en la figura 11 se aprecian. La inicial se considera desde que el líquido sale de la boquilla, mientras es constante el fluido toma una forma de remolino debido a la interacción del agua junto con el aire circundante, este último, aunque se presente en poca cantidad, es el responsable en desordenar el chorro en partículas de agua junto con los constituyentes (otras sustancias químicas) que se le adicionaron al agua y al calor (temperatura) [15]. Dentro de esta fase se encuentra una pequeña sección denominada núcleo potencial, adquiere una forma de prisma triangular, conserva la misma

velocidad con la que emergió del orificio de salida [18]. La región principal se constituye por una zona de gotas, debido a la fuerza dinámica (velocidad y densidad) del aire que interacciona con el agua y la distancia que recorre va destruyendo las gotas en unas más pequeñas, esta zona es la ideal para la limpieza, debido a que las gotas aun llevan velocidad para impactarse [15].

La velocidad que solía tener en un inicio va disminuyendo poco a poco durante el trayecto, el chorro se va a esparcir provocando una forma de abanico, en ambos costados se formara una franja de niebla en donde el tamaño de gota será diminuto y la velocidad que tengan será nula [18]. La final denomina también como zona de difusión, en donde el chorro por completo se separa para obtener diminutas partículas del agente de limpieza [15], con una velocidad insignificante [18]. En la figura 11, se aprecia las zonas que anteriormente se explicaron [15].



**Figura 11.- Zonas del chorro de agua [15].**

Para llevar a cabo una limpieza mediante esta metodología, capaz de eliminar la suciedad por completo se debe tomar en cuenta cuatro factores a considerar, se observan en la figura 12 y son: la presión de líquido, distancia de separación, ancho de limpieza, radio de la boquilla, ambos se relacionan para generar un chorro efectivo [15].

- *Presión del líquido*

Se considera uno de los puntos más importantes a tratar, la presión que se va a suministrar dependerá de la suciedad a eliminar y el espesor que posea. Se dividen en cuatro y se describen a continuación [47]:

a) Limpieza con agua a baja presión (LP WC).

Utiliza presiones por debajo de la cantidad de 5,000 psi, nombrada también como lavado a presión. Prepara la superficie dejándola libre de suciedades como polvo y algunos que sean solubles.

b) Limpieza con agua a alta presión (HP WC).

Solo eliminara suciedades como cascaras y desprendimiento de recubrimientos antiguos. Las presiones que se aplican son valores de 5, 000 a 10,000 psi, si se mantienen las boquillas fijas pueden llegar a cortar placas de metales y concreto.

c) Chorro de agua a alta presión (HP WJ).

En conjunto con abrasivos (partículas sólidas) llegan a cortar diversas placas de metal a una presión de 10,000 a 30,000 psi.

d) Chorro de agua a ultra presión (UHP WJ).

Las presiones son de 30,000 psi en adelante, en la actualidad lo más que se ha podido determinar son 50,000 psi. Entre la suciedad que elimina va desde incrustaciones de óxido hasta grasa y capas de sal.

El líquido presurizado en el momento que sale de la boquilla surgirá con una determinada velocidad, se considera para el proceso de limpieza (< 4,931 psi) este dentro de un rango entre 80 – 200 m/s [37], la velocidad es proporcional a la cantidad de presión aplicada [15].

Algunas de las suciedades más importantes a eliminar son grasa, aceite y oxido en donde se aplica una presión menor de 10,150 psi, pero si se trata de capas más duras, gruesas, como recubrimientos, se necesitarán presiones por arriba de dicha cantidad anteriormente mencionada [27].

- *Distancia de separación*

Esta distancia se toma en cuenta desde la boquilla donde sale el chorro de líquido hasta donde se encuentra la superficie de la pieza, dependerá mucho de la cantidad de presión que se suministre ya que, si es poca, la distancia de separación también podrá generar el corte la pieza [15]. Establecer una distancia correcta es importante porque si se encuentra demasiado lejos no va a desprender el contaminante, si se encuentra demasiado cerca el chorro rebotará de la superficie obteniendo una pieza no del todo limpia [18]. Se considera que 5 cm es una distancia efectiva, pero si rebasa de 50 cm no se logrará una buena limpieza [47].

- *Ancho de limpieza*

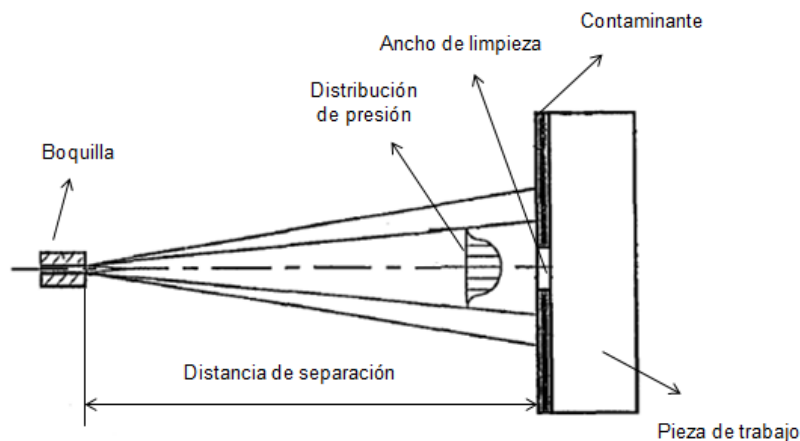
Es una pequeña sección dentro del chorro de agua, su tamaño es aproximado al diámetro de la boquilla y conforme se aumente la presión también se agrandará. Dentro de este se encuentra una presión lineal que conserva la misma velocidad con la que salió de

la boquilla, conforme se va ampliando el chorro la velocidad va disminuyendo, esta sección es la que efectúa la eliminación por el impacto fuerte del líquido [15].

- *Radio de la boquilla*

La selección del diámetro de la boquilla repercutirá en la distancia de separación pues a mayor diámetro y presión se alcanzarán distancias mayores en cuanto al ancho de limpieza será más apropiado para eliminar suciedad, lo contrario ocurrirá mientras se va disminuyendo el tamaño de la boquilla [15].

Existe otro factor, el cual no se puede mostrar en la figura 12, ya que se trata del ángulo de aplicación. Si la aplicación del líquido sobre la superficie se lleva a cabo dentro de un ángulo de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , estos valores se consideran pequeños y pueden reaccionar como esfuerzos cortantes, provocando en el metal pequeños microcortes en la superficie, sin embargo, cuando está en un ángulo de  $90^\circ$  llega a generar deformación plástica por el choque repentino [46].



**Figura 12.- Factores en el proceso de limpieza con chorro de agua [15].**

Existe un fenómeno físico que se involucra en la eliminación del contaminante, llamado erosión, inicia cuando la superficie de un metal (sólido) se expone a una cierta cantidad de fuerzas de impacto de partículas sólidas (abrasivos) y líquidos, causando desgaste, lo que a su vez es pérdida del material, donde la norma ASTM G40-99 hace referencia [6]. La erosión por líquidos comienza cuando las gotitas de tamaño muy diminuto van con una velocidad aproximada de 100 m/s [46], cuando se topan con la superficie su inesperada desaceleración causa fuerzas de impacto y compresión [15].

La ecuación 1 describe el fenómeno de la erosión, establece que la erosión es inversamente proporcional a la dureza [46].

Ecuación 1:

$$E = k\rho \frac{v^2}{2H}$$

Dónde:

E= erosión

k: fracción de material removido como material de desgaste

$\rho$ : densidad del material erosionado

v: velocidad del chorro

H: dureza (constante de indentación)

Debido a las fuerzas que se generan en forma constante y repetitivas, el metal puede ser dañado causando deformación elástica que mientras esta en el proceso surja alguna deformación, pero posteriormente vuelva a su estado inicial, si es más severo puede causar daños irreparables como deformaciones plásticas

donde ya no puede regresar a su forma original, adquiriendo propiedades diferentes y más si se tratan en su resistencia. El segundo sería la propagación de la onda de fatiga originada por la constante repetición de fuerzas de impacto, que desgasta al material más rápido provocando grietas en la superficie. La última, por penetración hidráulica, dependerá mucho de la cantidad de presión que se le aplique al metal de interés, si es demasiado y rebasa su límite elástico provocara en la superficie picaduras y las grietas que ya llegase a tener, se incrementarían más en dimensión. En el metal puede surgir más de un daño en la superficie [18].

Se debe determinar qué tan adherido este el contaminante de la superficie, por medio de enlaces químicos, el tipo de carga; atracción o repulsión y también si la suciedad es absorbida de manera positiva en la superficie. Para lograr un buen desprendimiento se necesita provocar fatiga en la capa de suciedad, las fuerzas de impacto llevan una cierta velocidad al toparse con el contaminante genera compresión el cual surge por el paro inesperado de la gota, posteriormente sigue deformándose ya que son cargas que se suministran constantemente y en este caso de limpieza por chorro son infinitas dando como resultado una deformación plástica en la capa del contaminante. Las fuerzas que se aplican deben ser menores que el límite de resistencia del metal base, en este punto resiste las fuerzas aplicadas sin deformarse (límite elástico), si sobrepasa puede generar deformaciones permanentes causando daños irreversibles [18].

Para la preparación superficial se establecen ciertas normas y lograr obtener una pieza que cumpla con el grado de limpieza que requiera la industria. Las técnicas las rige; SSPC (Steel Structures

Painting Council) y la NACE (National Association of Corrosion Engineers) [40]. Dichas normas se indican a continuación:

SSPC-SP WJ-1 / NACE WJ-1: Limpieza a metal desnudo. Después de la limpieza con chorro de agua se obtendrá una superficie opaca (sin brillo), las suciedades que se eliminan son grasa y óxidos.

SSPC-SP WJ-2 / NACE WJ-2: Limpieza muy exhaustiva. Si la superficie es mate, se removerá suciedad visible como grasa, aceite y oxido, pero quedaran manchas de corrosión.

SSPC-SP WJ-3 / NACE WJ-3: Limpieza profunda. La superficie resultante será opaca, aparte de que eliminara grasa y aceite, se observaran manchas por doquier de capas de pintura muy delgada y oxido.

SSPC-SP WJ-4 / NACE WJ-4: limpieza ligera o superficial. Solo elimina partículas desprendidas como deslaminación de pintura antigua, cascaras de óxido, así como grasa y suciedad que sea visible.

Su aplicación industrial como en aeronáutica, elimina aceite y grasa de las superficies de las piezas que manipulan para el proceso de ensamblaje de los aviones, aplicaciones médicas como en la rama de la odontología para la limpieza de dientes para desprender partículas diminutas de sarro, en canales donde en su interior el óxido que se genera debe ser removido [27], en estructuras metálicas que van desde tanques, edificios, muelles, hasta cascos de barcos. Lo implementan en sus procesos porque no genera residuos peligrosos, es amigable con el medio ambiente, no es costoso y el tiempo de operación es breve. Mas



sin embargo existe una desventaja, que conforme se va limpiando con agua, la pieza se encontrara en un medio húmedo, se debe esperar un poco para que se seque completamente antes de someterla a algún tipo de recubrimiento y esta espera puede propiciar a que se oxide [47].

### **2.11.- Mecanismos de endurecimiento en metales**

Los mecanismos de endurecimiento o también denominados de refuerzo, están relacionados al comportamiento mecánico y al movimiento de dislocaciones que se pueden generar en un metal u aleación [42].

Cuando un metal no puede regresar a su forma original después de someterle alguna carga o fuerza posee una deformación plástica la cual se genera por una gran cantidad de movimientos de dislocaciones haciéndolo blando y menos resistente, sin embargo, para que un material sea más duro y aumente su resistencia mecánica se debe de limitar este tipo de movimiento [42].

Con respecto a la limpieza con chorro de agua debido a las repetidas fuerzas de choque de las gotas puede llegar a generar algún tipo de daño superficial, provocando un cambio en la microestructura, por lo tanto, cambiar sus propiedades mecánicas y provocar endurecimiento por deformación.

#### **2.11.1.- Endurecimiento por deformación:**

Muchos de los metales endurecen por este proceso también denominado deformación en frío ya que se lleva a cabo a temperatura ambiente [42]. Consiste en el aumento de interacciones de dislocaciones lo cual provoca que se vaya

generando una deformación plástica en el metal [16] obteniendo una mayor dureza y mejor resistencia en el caso de un metal dúctil [42].

### **2.11.2.- Endurecimiento por reducción del tamaño de grano:**

#### **2.11.2.1.- Tamaño de grano:**

Todos los metales están compuestos por cristales individuales o también denominados granos, si se trata de un metal puro tendrá un solo tipo de monocristal (un tipo de cristal), pero si se trata de una aleación tendrá policristales (dos o más tipos de cristales). El tamaño, forma y su acomodo de grano es de suma importancia ya que dependiendo de estas características podemos percibir sus propiedades mecánicas [42] y su afectación al endurecimiento por deformación, ductilidad, tenacidad a la fractura, soldabilidad y temperatura de transición dúctil/frágil [16].

El tamaño de grano puede ser ajustado dependiendo si se llevó a cabo primero una deformación plástica se puede seguir con un tratamiento térmico o si es por solidificación en una fase líquida el factor importante a cuidar es la velocidad [42]. Se busca obtener un tamaño de grano fino o pequeño y de forma equiaxial [16], el área que presenta en su límite de grano es mayor, esto impide el movimiento de las dislocaciones, como resultado se tiene una mejor resistencia y mayor dureza en el metal. Otros dos fenómenos que ayudan en el impedimento de dislocaciones son los límites entre dos fases y las maclas [42].

#### **2.11.2.2.- Límites de grano:**

El límite de grano es una región estrecha que se encuentra entre dos granos, el tamaño de estos son los que establecen los límites

que se obtendrán dentro de un área [16]. En este lugar se lleva a cabo diferentes fenómenos como reacciones de precipitación, transformación de fases y difusión, es por ello que tiene una alta energía [42]. Existen dos clasificaciones de los tipos de límites que a continuación se mencionaran [16]:

- a) De ángulo alto: es cuando presentan una ubicación de un grano con otro arriba de 20 grados, presenta vacancias y dislocaciones.
- b) De ángulo bajo: tiene poca desorientación y se forman por el ensamble de dislocaciones.

Se consideran en el proceso de deformación como una barrera para el deslizamiento de dislocaciones, cuando un grano se comienza a deformar tiene que acomodar al grano vecino para su deformación ya que esta no será igual para ambos por motivo de su orientación por lo tanto su deformación es heterogénea y su ubicación son [16]:

- Interior de los granos: la deformación se considera media en uniformidad.
- Zona cercana al límite de grano: combina una serie de deslizamientos tanto de forma plana y ondulada, este último es el más común.
- Límite de grano: existen ondulamientos o deformaciones hasta obtener una semejanza a los dientes de una sierra.

Entre menos sea el movimiento de dislocaciones será más duro el metal, si el tamaño de grano es pequeño esto quiere decir que será mayor su densidad de dislocaciones y por lo tanto su deformación por endurecimiento crecerá [16].

### **2.11.3.- Endurecimiento por disolución sólida:**

Los metales puros presentan características de baja resistencia y se consideran blandos, por lo tanto, para mejorar sus propiedades de dureza, se mezclan homogéneamente con otro u otros metales hasta obtener una aleación. Este proceso comienza cuando los átomos del metal aleante se colocan de manera sustitucional (sustituye un átomo original) o intersticial (ocupa un lugar no definido) en la estructura cristalina del metal base [42] generan una aleación más dura, resistente y tenaz [16].

Los puntos más importantes en este proceso son; el porcentaje del elemento aleante, si se encuentra alrededor de un 50% habrá una dureza máxima y si sus átomos se colocan de manera intersticial, con este tipo de movimiento genera tres veces más su dureza que el sustitucional, los radios atómicos, entre mayor sea la diferencia de tamaño de radios mayor será la deformación y por lo tanto se tendrá una mayor resistencia mecánica [16].

Después de aplicar este tipo de endurecimiento en metales, mejora su resistencia a la termofluencia por lo tanto si se someten a temperaturas elevadas no provocan cambios críticos en sus propiedades, sus propiedades de ductilidad convertirlo en hilos y conductividad eléctrica son menores que el metal puro [42].

### **2.11.4.- Endurecimiento por segundas fases:**

Este método se lleva a cabo con la mezcla de dos o más fases, consisten en soluciones solidas saturadas con estructuras propias a las que llaman multifases y existen dos tipos de estas:

a) Agregados: el agrupamiento de los átomos que forman segundas fases tiene un tamaño similar al de la matriz, a causa de

esta deformación en la red cristalina evitara el deslizamiento de dislocaciones.

b) Dispersiones: el precipitado de la segunda fase son partículas finas dentro de los granos y sus límites, no posee la misma orientación cristalográfica y será difícil el movimiento de dislocaciones.

Con este tipo de endurecimiento se incrementa la dureza y la resistencia mecánica [16].

## **CAPITULO 3**

### **3.- Desarrollo experimental**

Para poder realizar el estudio del efecto de la presión de limpieza sobre la microestructura y las propiedades de diferentes materiales, fue necesario plantear la metodología que a continuación se presenta.

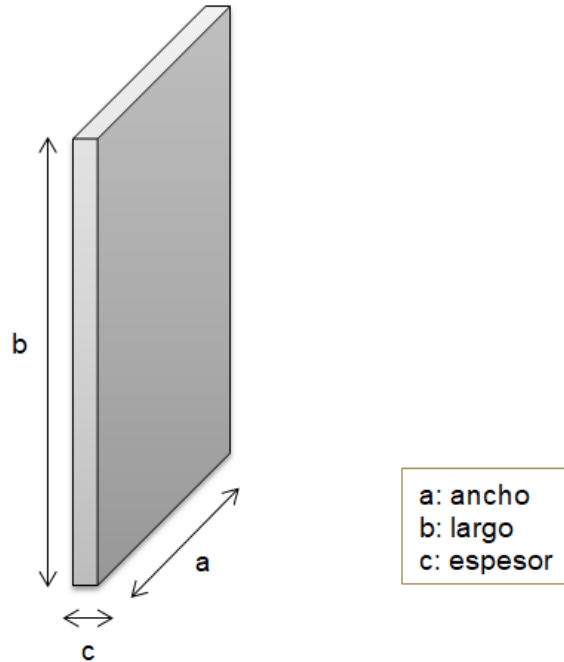
#### **3.1.- Obtención de los materiales**

Como primer paso, fue obtener los materiales a utilizar para el desarrollo de la experimentación. Los materiales fueron proporcionados por SAESA (Safran Aircraft Engine Services America), empresa relacionada a la industria aeronáutica, enfocada a la reparación y mantenimiento de motores de avión. Pertenece a grupo SAFRAN y está ubicada en el estado de Querétaro dentro del perímetro del aeropuerto. Dicha empresa, proporcionó 4 diferentes tipos de aleaciones en forma de lámina (espesor menor de 6mm); Titanio 6%Al – 4%V, Inconel 718, Acero inoxidable 321 y Aluminio 6061. Por lo tanto, el desarrollo de trabajo se enfocó principalmente en este tipo de aleaciones.

#### **3.2.- Medición de las láminas de los materiales**

Una vez proporcionadas las 4 aleaciones, se determinaron las dimensiones iniciales para cada una de ellas, obteniendo su largo, ancho y espesor con apoyo de un Vernier (fig. 13). Cabe mencionar que durante el desarrollo de las pruebas, para cada

valor de presión, las dimensiones eran evaluadas con el objetivo de observar cambios provocados por la presión utilizada.

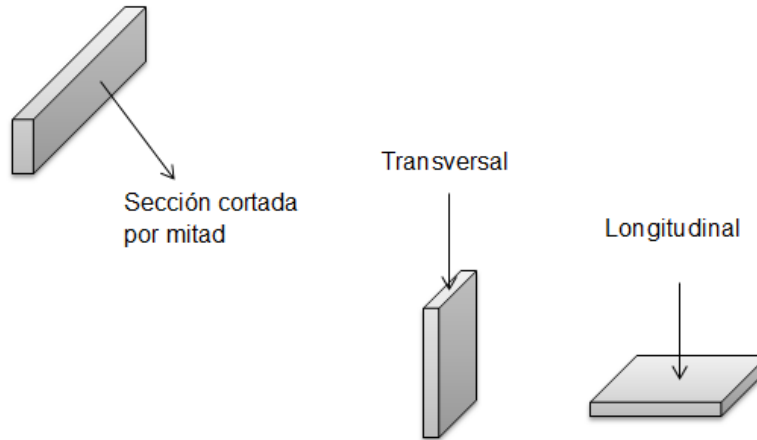


**Figura 13.- Medición dimensional de cada una de las láminas.**

### **3.3.- Preparación metalográfica**

Después de obtener las dimensiones iniciales de las láminas para cada aleación, se procedió a realizar la preparación metalográfica conforme la norma ASTM E – 3 establece. Inicialmente las placas se cortaron utilizando una máquina cortadora de alta precisión marca Buehler Isomet Low Speed Saw de 300 rpm, con disco de diamante de 5" de diámetro. Este tipo de cortadora no genera deformación y daño por calentamiento sobre la superficie de la muestra. Durante el corte de la muestra y el disco son enfriados por medio de la inmersión del disco en agua, además de utilizar bajas revoluciones a la hora de efectuar los cortes, lo cual disminuye en gran medida el calentamiento de ambas piezas. Las

láminas se cortaron aproximadamente de 1cm x 1cm sin afectar el espesor para cada material (figura 14).



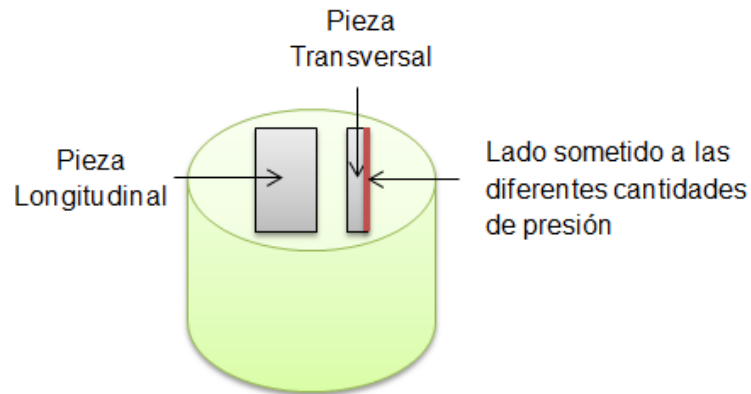
**Figura 14.- Secciones cortadas de cada lámina.**

Las condiciones se mantuvieron constantes para casi todos los materiales, a excepción de la aleación de iniconel, ya que por ser un material con mayor dureza que los demás fue necesario disminuir la velocidad de corte.

Una vez listos los cortes, se continuó con la etapa de montaje, la cual se realizó por medio de resina epóxica para montaje en frío. Se colocaron dos muestras por cada capsula en posición longitudinal y transversal para cada uno de los materiales como se muestra en la figura 15. Para colocar la pieza transversal fue necesario apoyarse de clips plásticos, lo que permitió mantener la muestra en posición transversal hasta el secado de la resina. La preparación de la resina epóxica, consiste en mezclar dos partes de resina por una de catalizador, ambas de la marca Extec Fast, posteriormente se vierte sobre el molde y después de un tiempo de espera, aproximadamente entre 15 y 20 minutos queda lista



para continuar con la siguiente etapa. Cabe mencionar que este tipo de resina no genera daño por calentamiento y/o deformación, a partir de que se mezcla la resina y el catalizador, promueve una reacción exotérmica liberando calor sin llegar al grado de generar algún daño por calentamiento, además de no requerir presión para la compactación de la resina, esta es resistente a ácidos, bases y disolventes.



**Figura 15. Muestra de la probeta para cada material.**

Posterior a la etapa de montaje, las muestras se desbastaron empleando lijas de SiC de diferentes grados (120, 180, 240, 320, 400, 600, 800 y 1200) para cada una de las etapas de desbaste. Es importante mencionar que conforme se incrementa el valor de la lija, el desbaste es más fino, lo que permitirá tener una superficie bien preparada para la etapa del pulido. Durante la etapa de desbaste las muestras deben ser sometidas a limpieza antes de pasar al siguiente grado de lija, esta limpieza es a través de agua convencional, sin embargo, para el caso de la aleación de titanio la limpieza se llevó a cabo con agua destilada, esto debido a que con agua corriente se formaba una capa opaca (óxido).

Para la etapa de pulido se utilizó alúmina de  $0.3 \mu\text{m}$ , agua y jabón líquido como lubricantes, una máquina pulidora de la marca Allied

High Tech Products, utilizando velocidades entre 200 - 250 rpm. Estas mismas condiciones fueron establecidas para casi todos los materiales, solo en el caso de la aleación inconel se utilizó pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ . La limpieza para las aleaciones de aluminio, inconel e inoxidable fue a partir de agua corriente, mientras que para titanio nuevamente la limpieza se realizó con agua destilada.

Como última etapa de la preparación metalográfica, las muestras fueron atacadas para revelar su microestructura, con el objetivo de obtener las condiciones iniciales de la microestructura antes de realizar las pruebas de limpieza a las distintas presiones y de esta manera poder registrar y comparar si hubo cambio alguno con cada una de las pruebas. Los materiales fueron atacados con diferentes soluciones químicas y por periodos de tiempos de acuerdo con las indicaciones de cada reactivo como se muestra en la tabla J. En el caso de las aleaciones de Inconel y del acero inoxidable se atacaron con la misma solución o reactivo, pero con diferentes condiciones de tiempo. El proceso de ataque se lleva a cabo a partir de colocar en un vidrio de reloj una cantidad suficiente del reactivo para cubrir la superficie de ataque de la muestra o el área pulida a espejo procurando sumergir de manera total la probeta para que el ataque sea homogéneo, posteriormente se coloca la probeta en la corriente de agua para detener el efecto del ataque, después con una piseta se aplica alcohol sobre la superficie del material para eliminar cualquier residuo de agua, finalmente se somete al secado con aire caliente u aire seco.

Tabla J.- Reactivos para ataque químico [1].

Aleación	Reactivo de ataque	Tiempo (s)
Titanio	Ácido nítrico 320 ml/l Ácido fluorhídrico 30 ml/l Agua destilada 650 ml/l	60
Inconel	Ácido sulfúrico 35 ml/l Ácido clorhídrico 450 ml/l Ácido nítrico 125 ml/l Ácido acético 190 ml/l Cloruro férrico 115 g/l Agua destilada 190 ml/l	60
Acero inoxidable	Ácido sulfúrico 35 ml/l Ácido clorhídrico 450 ml/l Ácido nítrico 125 ml/l Ácido acético 190 ml/l Cloruro férrico 115 g/l Agua destilada 190 ml/l	40
Aluminio	Reactivo Poulton 12 partes HCl 6 partes HNO <sub>3</sub> 1 partes HF (48% pureza) 1 parte H <sub>2</sub> O destilada Para el ataque 50 ml de reactivo Poulton 25 ml HNO <sub>3</sub> 40 ml solución 30 g/L Ácido crómico en agua (1.2g/40ml de H <sub>2</sub> O) destilada	20

### **3.4.- Medición de microdureza Vickers (HV)**

Una de las principales variables a evaluar fue la dureza, la cual fue determinada de manera inicial y posterior a cada una de las pruebas. Para la medición de microdureza Vickers las muestras fueron preparadas metalográficamente hasta la condición de pulido a espejo, condición necesaria que marca la norma ASTM E - 92 para realizar este tipo de prueba. Las medidas fueron hechas utilizando un durómetro modelo DuraScan 20 de la marca EMCOTEST, empleando cargas de 200 g y realizando 7 indentaciones para cada una de las probetas, de esta manera se obtuvo el valor promedio de cada material tanto para la sección longitudinal como para la sección transversal.

### **3.5.- Microscopia óptica**

Para el análisis microestructural se utilizó un microscopio óptico metalográfico marca Nikon, modelo Eclipse MA200 equipado con software para análisis de imágenes. El estudio se realizó para cada uno de los materiales en su condición inicial y posterior a las pruebas para cada valor de presión utilizado. Para realizar el análisis microestructural, la muestra debe estar preparada metalográficamente hasta la condición de ataque, ya que de esta manera se puede obtener la evidencia en micrográficas a diferentes aumentos 100, 200, 500 y 1000X, tanto para la muestra longitudinal como transversal. Cabe mencionar que para las muestras analizadas después de las pruebas sobre la sección transversal, las medidas se realizaron sobre la cara expuesta a la presión de limpieza.

### **3.6.- Estimación del tamaño de grano**

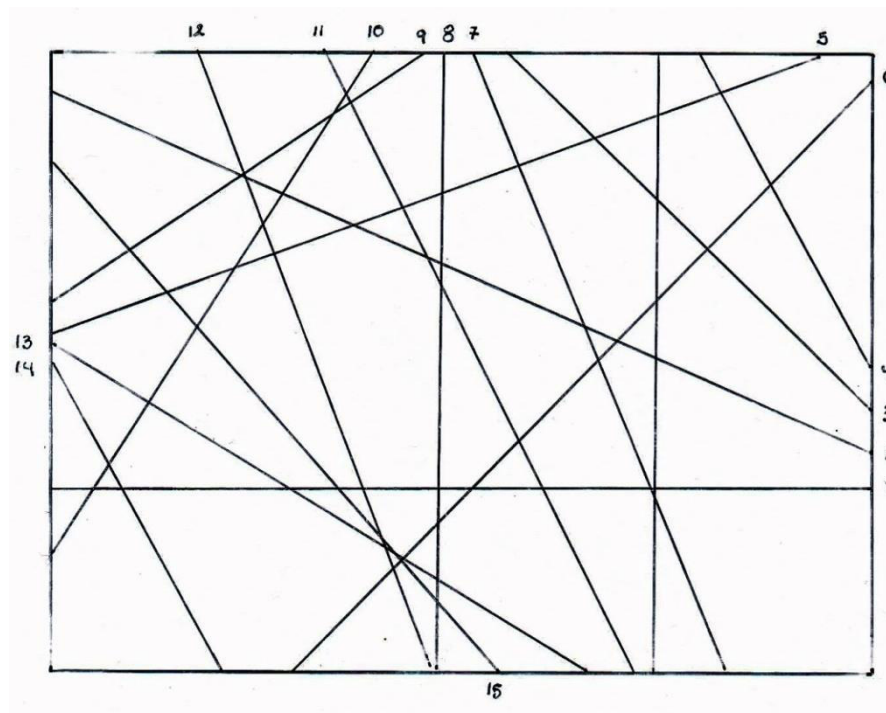
Otra de las variables a determinar para observar el efecto de la presión de limpieza es a través de la estimación del tamaño de grano. El tamaño de grano se determinó con base a la norma ASTM E112-96 [5] utilizando el método de intersección lineal, el cual se describe de manera puntual más adelante. De acuerdo con la norma ASTM se tomaron en cuenta 32 microfotografías a 10 y 20X, con ellas se estableció un promedio del tamaño de grano para la sección longitudinal y la sección transversal de cada material. Este proceso se aplicó para cada aleación, antes y después de las pruebas de limpieza.

#### **3.6.1.- Estimación del tamaño de grano por el método de intersección lineal**

El método de intersección lineal, fue el método empleado por el cual se realizó la estimación del tamaño de grano promedio. Consiste en trazar una serie de líneas al azar sobre una pantalla o directamente sobre la micrografía de la microestructura (figura 16), posteriormente se realiza un conteo de granos intersectados a lo largo de la longitud línea. Para determinar el diámetro promedio se aplica la siguiente ecuación:

El diámetro promedio  $l = L/N$

Donde L corresponde a la longitud total de la línea, N es el número de granos intersectados, se debe tomar en cuenta los aumentos de la foto para poder obtener la relación que permita establecer el tamaño promedio.



**Figura 16.-** Plantilla de acetato de 16 x 12 cm con 15 líneas intersectadas.

### **3.7.- Medidas de rugosidad**

La rugosidad es otra de las variables consideradas para determinar el efecto de la presión de limpieza sobre la superficie de los materiales. Esta medida se llevó a cabo por medio de un perfilometro de la marca Bruker modelo Contour GT InMotion 3D, el cual funciona por medio de la interferencia de luz, lo cual no daña la superficie a la hora de realizar las pruebas. La rugosidad se determinó antes y después de las pruebas de limpieza para cada una de las aleaciones obteniendo un valor promedio.

### 3.8.- Pruebas de limpieza con agua a baja presión

Las pruebas de limpieza consideradas dentro de la experimentación para el desarrollo del presente trabajo, consistieron en aplicar de manera constante diferentes presiones durante la limpieza a cada material. Como valores constantes se establecieron la temperatura del fluido, la cual se mantuvo en un valor de 85 °C, la distancia de aplicación fue de 30 cm, con un ángulo de 90°, el número de pasadas equivalente a 50 o 25 de ciclos. Por otra parte, las presiones utilizadas para el desarrollo de los experimentos fueron de 500, 1000 y 1500 psi, estas presiones se aplicaron por medio de una maquina Kartcher con presión variable. El fluido utilizado para la limpieza, consiste de una mezcla de 80% de agua y 20% de agente desengrasante. Cabe mencionar que el número de pasadas o de ciclos se establecieron a partir de la observación de una marca que se les coloco de manera intencional a los materiales, con el propósito de encontrar el número apropiado de pasadas requeridas.

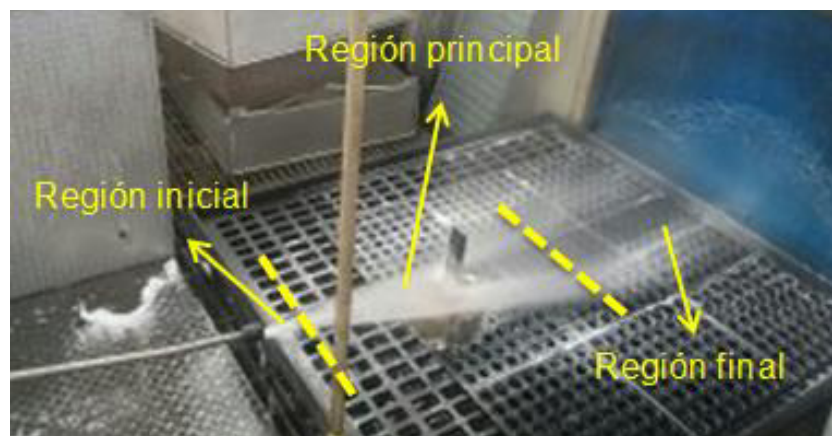


Figura 17.- Aplicación de método de limpieza a presión con respectivas zonas del chorro.

## CAPITULO 4

### 4.- Resultados

#### 4.1.- Dimensiones de las láminas

Los resultados de las medidas dimensionales de cada lámina correspondiente a cada una de las aleaciones utilizadas, se observan en la tabla K. En la tabla se observa que las dimensiones para la aleación de titanio, acero inoxidable y aluminio son muy similares, a diferencia de la aleación de Inconel 718 que presenta dimensiones mayores y así mismo registra un peso mayor.

**Tabla K.- Medidas dimensionales de láminas originales.**

Material	Largo ( $\mu\text{m}$ )	Acho ( $\mu\text{m}$ )	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
Ti 6%Al-4%V	64,200	34,300	1,280
Inconel 718	152,000	51,000	2,100
Acero inoxidable 321	63,950	33,820	1,270
Aluminio 6061	64,270	34,150	1,190

En la tabla L, se muestran las medidas correspondientes al espesor de las láminas tanto originales como las que se sometieron al proceso de limpieza variando la presión. Debido a que las dimensiones correspondientes al largo y ancho de las láminas de manera general son similares y no tuvieron variación durante las pruebas se reporta únicamente los valores de espesor para las distintas pruebas. Al observar estos valores podemos



apreciar que la aleación de titanio va disminuyendo su espesor conforme se aumenta la presión de limpieza, en el caso de 500 psi disminuye 10  $\mu\text{m}$  teniendo un valor de 1270  $\mu\text{m}$  (0.78%) con respecto al valor original de 1280  $\mu\text{m}$ , sin embargo en 1000 psi disminuye 20  $\mu\text{m}$  quedando su valor en 1250  $\mu\text{m}$  (2.34%) y posteriormente en 1500 psi vuelve a descender su valor solo 10  $\mu\text{m}$  quedando en un valor de 1240  $\mu\text{m}$  (3.135%), para el inconel disminuye considerablemente 40  $\mu\text{m}$  con respecto a la original de 2100  $\mu\text{m}$ , manteniéndose constante para los tres valores de presión de 2060  $\mu\text{m}$  (1.9%), el acero inoxidable con un valor inicial en su espesor de 1270  $\mu\text{m}$ , baja su valor diez  $\mu\text{m}$  para mantenerse en el mismo valor de 1260  $\mu\text{m}$  (0.79%) conforme se va incrementando la presión, sin embargo, para el aluminio se conserva el mismo valor de su espesor original 1190  $\mu\text{m}$  (100%).

**Tabla L.- Medidas de espesor de las diferentes laminas.**

Material	Original ( $\mu\text{m}$ )	500 psi ( $\mu\text{m}$ )	1000 psi ( $\mu\text{m}$ )	1500 psi ( $\mu\text{m}$ )
Ti 6%Al - 4%V	1,280	1,270	1,250	1,240
Inconel 718	2,100	2,060	2,060	2,060
Acero inoxidable 321	1,270	1,260	1,260	1,260
Aluminio 6061	1,190	1,190	1,190	1,190

#### 4.2.- Profundidad de erosión

Los resultados presentados para medir la profundidad de erosión corresponden a la sección transversal expuesta a los diferentes valores de presión. Esto con el objetivo de observar si se indujo profundidad de erosión en cada prueba. Las imágenes mostradas en las figuras 18–21 muestran de manera gráfica la profundidad para la aleación de titanio, inconel, acero inoxidable y aluminio,

respectivamente. Por otra parte, los valores se registran en la tabla M. El grado de erosión para la aleación de titanio, incremento conforme se aumentó el valor de presión. En 500 psi la profundidad de erosión promedio fue de 3.71  $\mu\text{m}$ , mientras que para 1000 psi se registró una deformación de 9.01  $\mu\text{m}$ , finalmente a 1500 psi se obtuvo un valor de 12.28  $\mu\text{m}$ . Para la aleación de inconel se registró un comportamiento similar a la aleación de titanio, debido a que la profundidad incrementa conforme aumenta la presión. A 500 psi se registró un valor de 1.67  $\mu\text{m}$ , en 1000 psi la profundidad alcanzo un valor de 2.24  $\mu\text{m}$ , finalmente a 1500 psi se obtiene el valor máximo de 2.61  $\mu\text{m}$ . El comportamiento de la profundidad de erosión para el acero inoxidable muestra que a 500 psi se obtiene un valor de 3.01  $\mu\text{m}$ , para 1000 psi se registró una profundidad de 2.84  $\mu\text{m}$  y para 1500 psi se obtuvo la mayor profundidad de erosión de 3.85  $\mu\text{m}$ . Como se puede observar esta aleación no muestra un comportamiento gradual de la profundidad de erosión con el incremento de la presión. Por último, los resultados de la deformación para la aleación de aluminio, mostraron un comportamiento similar al mostrado por el acero inoxidable, es decir se observa una erosión de 3.63  $\mu\text{m}$  para una presión de 500 psi, posteriormente se reportó un valor de 4.13  $\mu\text{m}$  a una presión de 1000 psi, por último, se obtuvo una cantidad de 3.56  $\mu\text{m}$  a 1500 psi de presión. Es decir, se observa que tampoco hay un incremento gradual de la profundidad de erosión con respecto a los valores de presión.

**Tabla M.- Promedio de profundidad de erosión de las aleaciones en el borde, sección transversal.**

Material	500 psi ( $\mu\text{m}$ )	DS	1000 psi ( $\mu\text{m}$ )	DS	1500 psi ( $\mu\text{m}$ )	DS
Ti 6% Al - 4% V	3.71	$\pm 0.68$	9.01	$\pm 0.86$	12.28	$\pm 0.73$
Inconel 718	1.67	$\pm 0.73$	2.24	$\pm 0.88$	2.61	$\pm 0.75$
Acero Inoxidable 321	3.01	$\pm 0.71$	2.84	$\pm 0.86$	3.85	$\pm 1$
Aluminio 6061	3.63	$\pm 0.98$	4.13	$\pm 0.85$	3.56	$\pm 0.83$

La figura 18 muestra las imágenes correspondientes a la sección transversal para la aleación de titanio a 500 aumentos y a una escala de 50 micras, donde (a) corresponde al borde de la muestra original sin someterse a ningún tipo de presión. Conforme a la tabla M, se observa que la deformación va en aumento conforme se fue aumentando la cantidad de presión. Es muy pequeño este cambio debido a que las imágenes b, c y d se llega a percibir muy poco

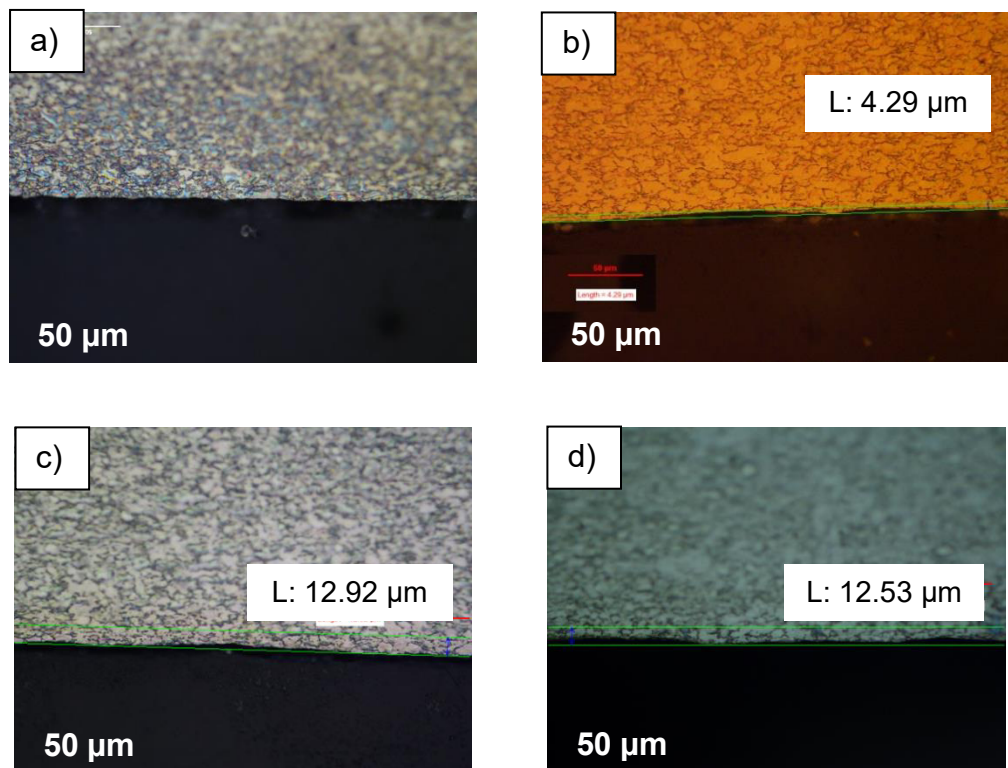
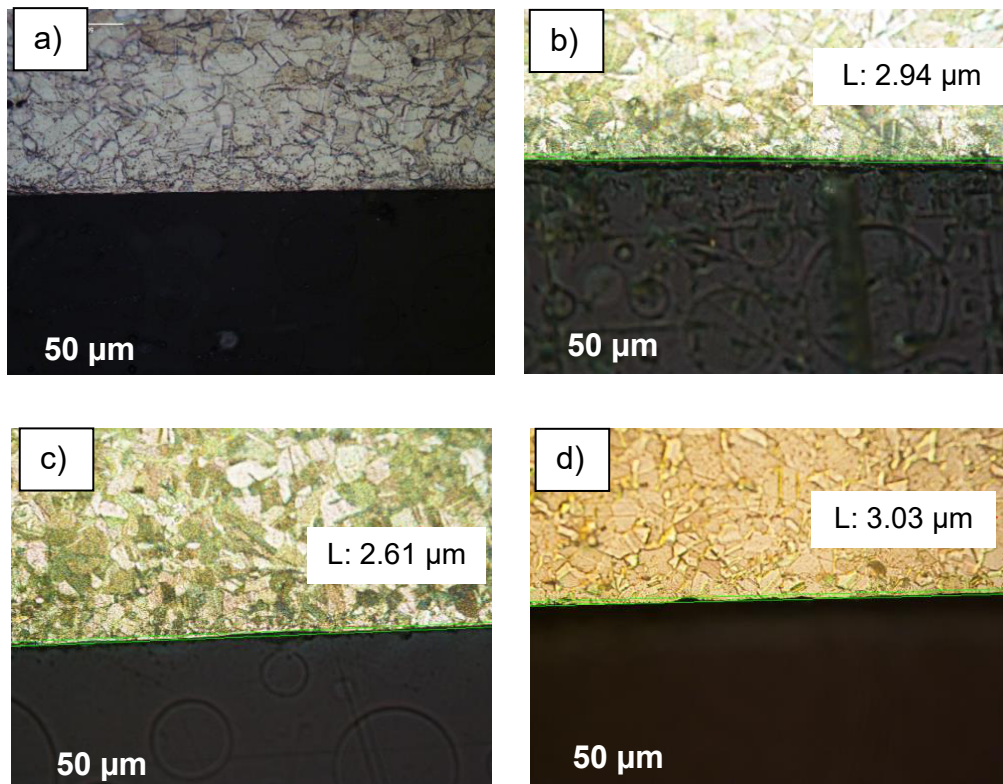


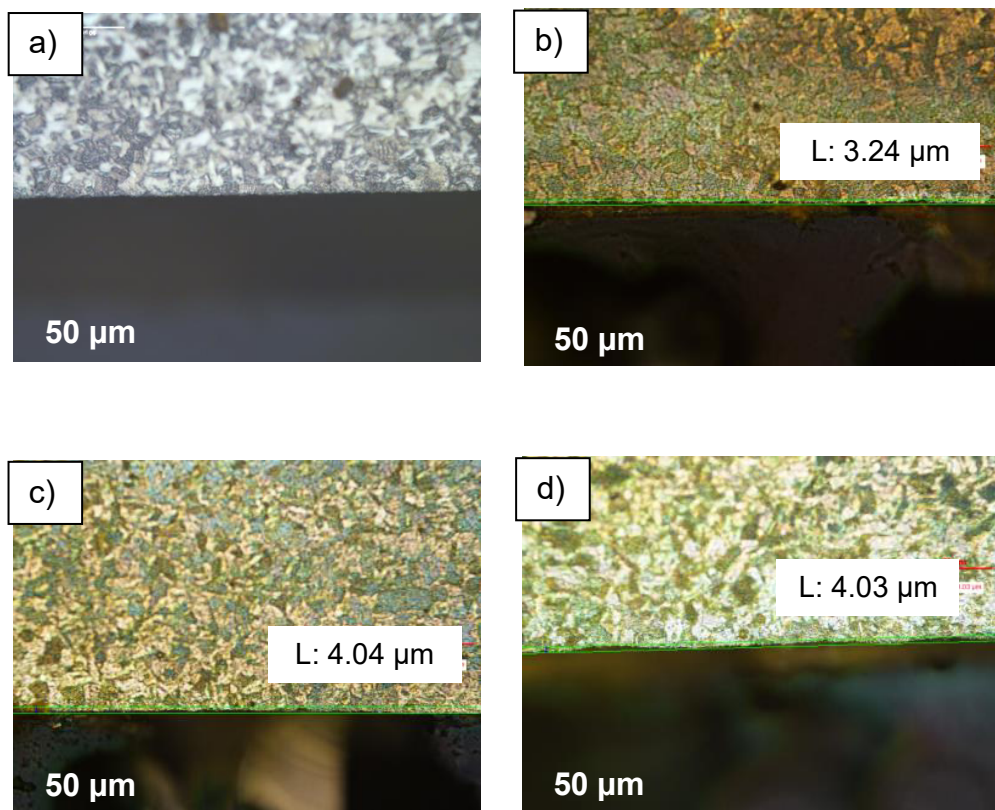
Figura 18.- Microestructura obtenida por microscopia óptica de la aleación Titanio 6%Al - 4%V. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde 1500 psi.

En el caso de la aleación de Inconel, en la figura que se muestra a continuación, figura 19, se observa el borde de la sección transversal, a 500 aumentos y con una escala de 50  $\mu\text{m}$ . La imagen (a) se trata de la muestra original, se puede apreciar en su borde que no posee ningún tipo de deformación debido a que no se le aplicó algún tipo de fuerza, los valores que se obtuvieron en la tabla M, se observa muy poco el pequeño aumento de su deformación para las imágenes b, c y d conforme se fue aumentando la cantidad de presión.



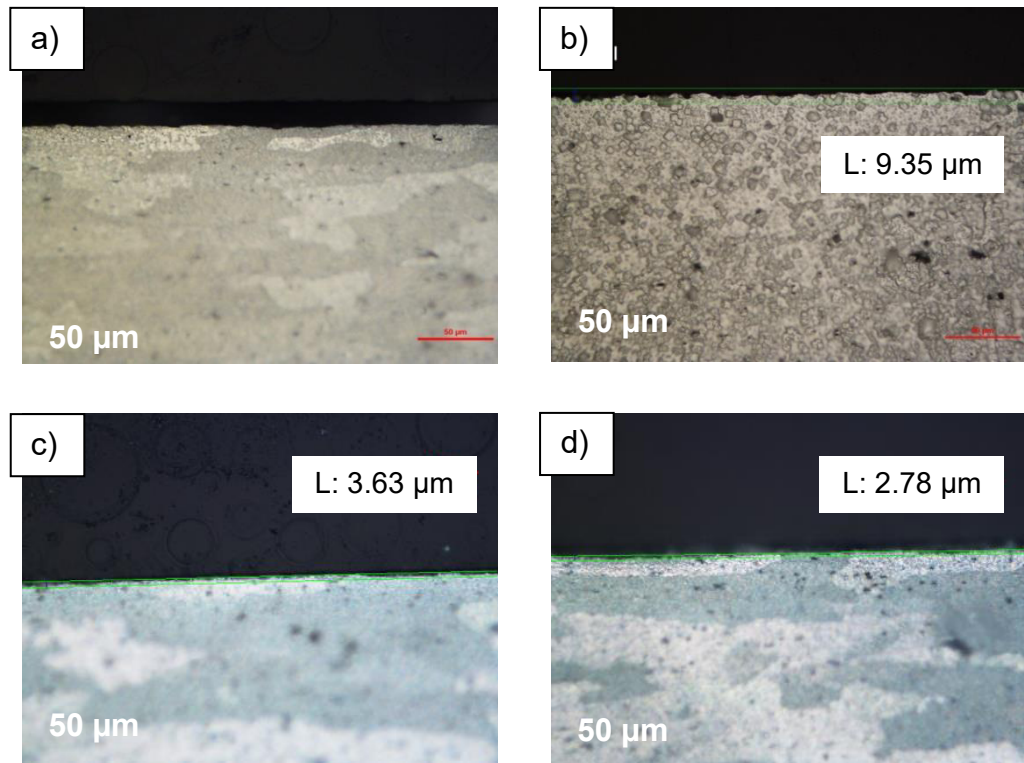
**Figura 19.-** Microestructura obtenida por microscopía óptica de la aleación Inconel 718. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde a 1500 psi.

El porcentaje de deformación para la aleación de acero inoxidable la podemos observar en la figura 20, la cual corresponde a la sección transversal a 500 aumentos. La imagen (a) pertenece al borde inicial sin haber sido expuesta a fuerzas de presión, las imágenes b, c y d, son las que se sometieron a las presiones de limpieza, como se puede apreciar no hay variación en las cantidades de deformación. Los valores se aprecian en la tabla M.



**Figura 20.-** Microestructura obtenida por microscopia óptica de la aleación Acero inoxidable 321. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde 1500 psi.

La imagen 21 hace referencia a la deformación superficial que presento la aleación de aluminio, con respecto a la sección transversal a 500 aumentos. La muestra original se aprecia en la imagen (a) donde su deformación es nula, debido a que no se expuso a ningún tipo de presión, en las posteriores imágenes poseen la deformación que se expone en la tabla M.



**Figura 21.- Microestructura obtenida por microscopia óptica de la aleación Aluminio 6061. (a) borde original (b) borde a 500 psi (c) borde a 1000 psi (d) borde a 1500 psi.**

### 4.3.- Rugosidad

Los resultados correspondientes a la rugosidad se exponen en la tabla N, solo se reportan los valores correspondientes a la sección longitudinal de cada una de las aleaciones, ya que es la sección expuesta a los diferentes valores de presión. Esta rugosidad puede ser provocada debido al impacto de las gotas, las cuales promueven irregularidades o surcos sobre la superficie [42]. Los valores que se obtuvieron para la aleación de titanio, en cuanto a la original fue de  $0.085 \mu\text{m}$  de rugosidad, en la cantidad de 500 psi de presión disminuyo su rugosidad 3 décimas, teniendo como resultado  $0.057 \mu\text{m}$ , en 1000 psi aumento a  $0.0915 \mu\text{m}$  y posteriormente en 1500 psi, volvió a disminuir 5 décimas, quedando en un valor final de  $0.0402 \mu\text{m}$ . Comparando los resultados de rugosidad tanto inicial como el valor que se obtuvo en la máxima cantidad de presión, existe una diferencia de 4 décimas, en otras palabras, disminuyo su rugosidad. En el caso de la aleación de inconel, la medida de rugosidad en la prueba inicial fue de  $0.0339 \mu\text{m}$ , en 500 psi de presión disminuyo 9 décimas para obtener una cantidad de  $0.0249 \mu\text{m}$ , en 1000 psi se obtuvo un valor de  $0.022 \mu\text{m}$  y finalmente para 1500 psi se registró un valor de rugosidad de  $0.01313 \mu\text{m}$ . Mediante los valores que obtuvimos se observa que la rugosidad va disminuyendo conforme se aumenta la cantidad de presión. Con respecto a la aleación de acero inoxidable, en su muestra original se obtuvo un valor de rugosidad de  $0.0345 \mu\text{m}$ , en 500 psi de presión tenemos que aumento 0.01 para tener un valor de  $0.04745 \mu\text{m}$  de rugosidad, en 1000 psi se obtuvo un valor de  $0.0367 \mu\text{m}$  y en 1500 psi se obtuvo un valor de rugosidad de  $0.0204 \mu\text{m}$ , esta cantidad de rugosidad obtenida del máximo valor de presión en comparación con la



original, muestra una diferencia de 0.014, obteniendo una disminución en su rugosidad. Por último, el valor de rugosidad de la muestra original de la aleación de aluminio fue de 0.0945  $\mu\text{m}$ , en 500 psi de presión se obtuvo un valor de 0.116  $\mu\text{m}$ , en 1000 psi registro un valor de rugosidad de 0.1393  $\mu\text{m}$  y en 1500 psi de presión la cantidad de 0.1083  $\mu\text{m}$  de rugosidad. Con respecto a los valores obtenidos de la rugosidad, la aleación de aluminio presenta, en comparación con la rugosidad original una rugosidad mayor en su cantidad de presión máxima.

**Tabla N.- Valores de rugosidad superficial, sección longitudinal de cada aleación.**

Material	Original ( $\mu\text{m}$ )	500 psi ( $\mu\text{m}$ )	1000 psi ( $\mu\text{m}$ )	1500 psi ( $\mu\text{m}$ )
Ti 6% Al - 4% V	0.085	0.057	0.0915	0.0402
Inconel 718	0.0339	0.0249	0.022	0.01313
Acero Inoxidable 321	0.0345	0.04745	0.0367	0.0204
Aluminio 6061	0.0945	0.116	0.1393	0.1083

#### 4.4.- Estimación de tamaño de grano

Los resultados obtenidos para la estimación del tamaño de grano se realizaron en base a la norma ASTM –E112 estos resultados muestran los valores de la muestra original y de las muestras sometidas a limpieza a los diferentes valores de presión. Cabe mencionar que se aplicó el método de intersección lineal como se describió en el desarrollo experimental. En la tabla Ñ se reportan los valores correspondientes al tamaño de grano para cada una de las aleaciones. En la cual se puede observar que para la aleación de titanio su comportamiento fue variable, ya que la muestra original reporto un tamaño de grano ASTM 3 (113.1  $\mu\text{m}$ ), posteriormente a 500 psi se obtuvo un valor ASTM 1.5 (190.3  $\mu\text{m}$ ),

para 1000 psi se obtuvo un valor ASTM 2.5 (134.5  $\mu\text{m}$ ) y finalmente en 1500 psi se reportó un valor ASTM2 (160  $\mu\text{m}$ ). De acuerdo a los valores se observa que el tamaño de grano es mayor para los tres casos respecto al tamaño de grano de la muestra original. En el caso de la aleación de inconel en la muestra original se obtuvo un valor ASTM 3.5 (95.1  $\mu\text{m}$ ), para 500 psi se obtuvo un tamaño de grano ASTM 4 (80  $\mu\text{m}$ ), sin embargo, para las cantidades de presión de 1000 y 1500 psi se observó el mismo valor al tamaño de grano original. Los resultados del tamaño de grano para el acero inoxidable reportaron de manera inicial en la muestra original un tamaño de grano ASTM 4 (80  $\mu\text{m}$ ), para 500, 1000 y 1500 psi se obtuvo un valor ASTM 4.5 (67.3  $\mu\text{m}$ ), es decir el tamaño se mantiene constante con el incremento de la presión. Se puede apreciar que el cambio es relativamente pequeño respecto al obtenido en los diferentes valores de presión en comparación con la muestra original. Por otra parte, en cuanto a la aleación de aluminio, el valor del tamaño de grano original ASTM es de 10 (10  $\mu\text{m}$ ), en 500 psi resulto un valor ASTM de 9.5 (11.9  $\mu\text{m}$ ), mientras que para los valores de 1000 y 1500 psi se reportó un tamaño de grano similar al de la muestra original (ASTM 10 (10  $\mu\text{m}$ )). Mediante estos valores se aprecia que aumento su tamaño de grano en 500 psi de presión, sin embargo, el cambio es relativamente pequeño con respecto a la muestra original.

El tamaño de grano de la sección transversal no se reporta, debido a que conforme se aplicó la presión no presento cambio alguno en comparación con la muestra original de las cuatro diferentes aleaciones.

**Tabla Ñ.- Promedio de tamaño de grano sección longitudinal (TG - ASTM).**

Material	Original		500 psi		1000 psi		1500 psi	
	No. ASTM	$\mu\text{m}$	No. ASTM	$\mu\text{m}$	No. ASTM	$\mu\text{m}$	No. ASTM	$\mu\text{m}$
Ti 6% Al - 4% V	3	113.1	1.5	190.3	2.5	134.5	2	160
Inconel 718	3.5	95.1	4	80	3.5	95.1	3.5	95.1
Acero Inoxidable 321	4	80	4.5	67.3	4.5	67.3	4.5	67.3
Aluminio 6061	10	10	9.5	11.9	10	10	10	10

#### 4.5.- Medición de microdureza

En la tabla O, se reportan los valores promedio de microdureza vickers con su respectiva desviación estándar (DS) sobre la sección longitudinal de cada uno de los materiales. Los valores obtenidos para el titanio, muestran una disminución de 16 unidades (331 Hv) de dureza respecto del valor inicial (347 Hv), con una presión de limpieza de 500 psi, posteriormente incremento a 339 Hv y finalmente a 1500 psi, se obtuvo un valor similar al de 500 psi de presión de 331 Hv. Para la aleación de inconel teniendo una dureza inicial de 228 Hv, se registró un incremento de 17 unidades a 500 psi de presión, mientras que para la presión de 1000 psi disminuyó seis unidades obteniendo una dureza de 239 Hv y para 1500 psi de presión resultó ser el mismo valor que su dureza inicial de 228 Hv. Sin embargo, el comportamiento para el acero inoxidable teniendo una dureza inicial de 170 Hv, muestra un incremento conforme aumenta el valor de presión, a 500 psi incremento cuatro unidades, obteniendo una dureza de 174 Hv, para el valor de presión de 1000 psi aumento 7 unidades alcanzando un valor de 181 Hv, finalmente para el valor de 1500 psi incrementa tres unidades más, teniendo como dureza 183 Hv, en comparación con la original, aumento 13 unidades para llegar a este valor. El

comportamiento que reporto el aluminio no fue significativo ya que se mantuvo constante en el valor de 38 Hv, para 500 psi disminuyo una unidad, para las dos cantidades siguientes de presión, su valor fue igual que la dureza original.

Las microdurezas de las cuatro aleaciones correspondientes a su sección transversal, no se exponen en tablas, ya que sus valores no cambian en comparación de la muestra original.

**Tabla O.- Promedio de valores de microdureza, área longitudinal.**

Material	Original (Hv)	DS	500 psi (Hv)	DS	1000 psi (Hv)	DS	1500 psi (Hv)	DS
Ti 6% Al - 4% V	347	± 3	331	± 6	339	± 8	331	± 8
Inconel 718	228	± 11	245	± 5	239	± 3	228	± 6
Acero Inoxidable 321	170	± 2	174	± 7	181	± 3	183	± 7
Aluminio 6061	38	± 0	37	± 2	38	± 0	38	± 1

## CAPITULO 5

### 5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

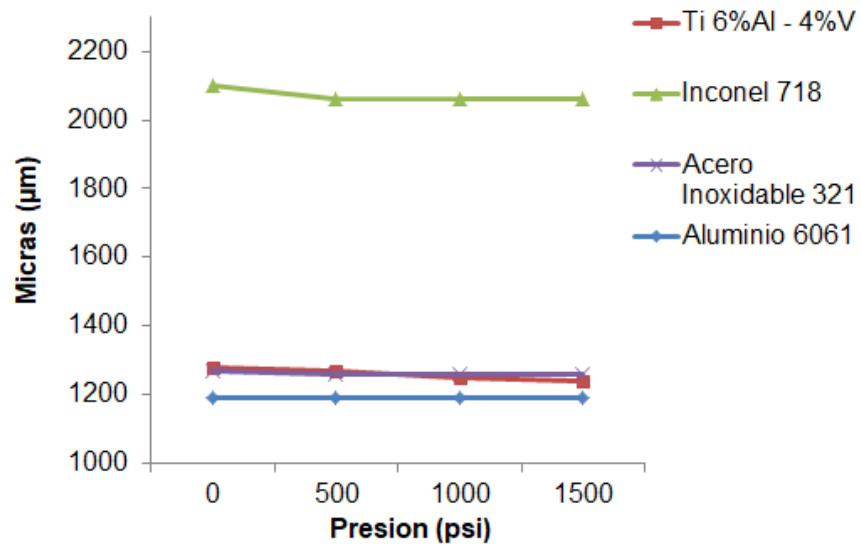
#### 5.1.- Espesor de las láminas

Debido a la aplicación de chorro de agua como mecanismo de limpieza, utilizando la presión de chorro como una variable, es fundamental corroborar si las dimensiones son afectadas de manera significativa. La gráfica 1 muestra el comportamiento del espesor para cada uno de los materiales a los diferentes valores de presión utilizados en la prueba y en la gráfica 2 se observa el porcentaje de la pérdida de espesor conforme se fueron aumentando los valores de presión. El comportamiento del espesor para las aleaciones de titanio e inonel mostro una disminución con el incremento de la presión. Esto podría ser causado debido a que cuando las gotas impactan en la superficie, van removiendo la suciedad, pero a su vez, va desprendiendo parte del metal base [46]. De manera general no se observan cambios significativos en el espesor para el acero inoxidable y la aleación de aluminio, ya que su comportamiento de la reducción del espesor con respecto al incremento de la presión se mantuvo casi constante.

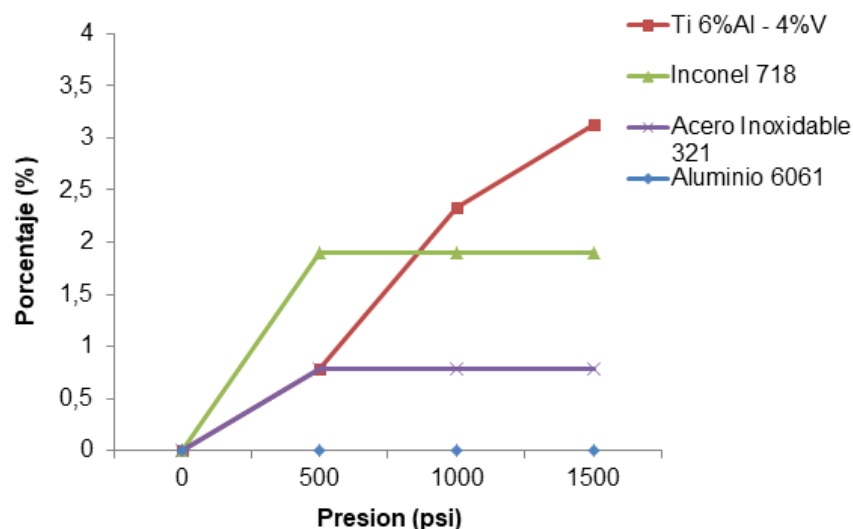
De acuerdo a lo reportado por algunos autores, el comportamiento mostrado en las aleaciones de titanio e inonel durante las pruebas de limpieza, se ajusta a lo predicho por el investigador Iain Finnie lo cual establece que, un metal puro o en estado recocido entre mayor dureza posea es más susceptible al

fenómeno de erosión, ya que la dureza no hará que sea resistente a tal fenómeno.

Por otro parte, la ecuación de la erosión que se mencionó en el capítulo 2, establece que la erosión es inversamente proporcional a la dureza. Por lo tanto, el titanio e inonel al encontrarse en estado de recocido se ajusta más a lo predicho por Finnie [46].



**Gráfica 1.- Espesor de las cuatro aleaciones sometidas a diferentes cantidades de presión.**



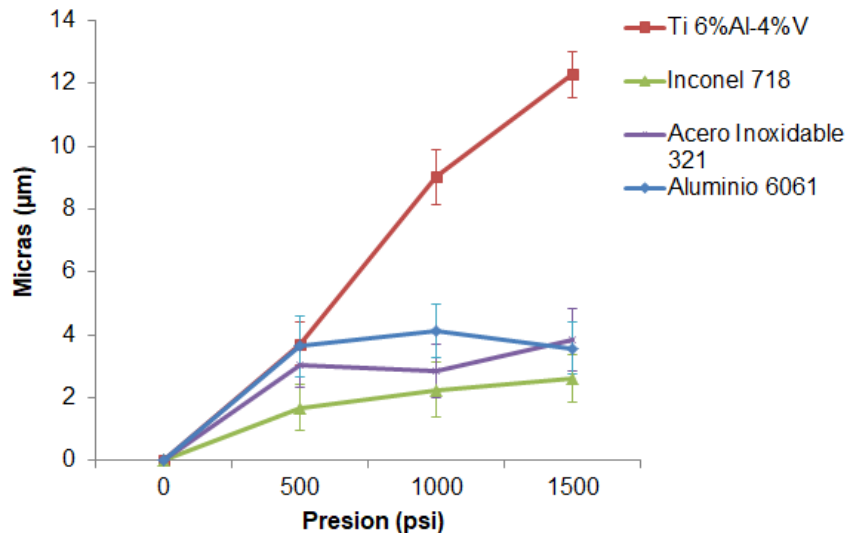
**Gráfica 2.- Porcentaje de la pérdida de espesor correspondiente a las cuatro aleaciones a diferentes cantidades de presión.**

### 5.2.- Profundidad de erosión

El borde de la sección transversal de cada metal, fue el que estuvo expuesto al chorro de agua con las tres diferentes cantidades de presiones (500, 1000 y 1500 psi). Debido a la velocidad y a la repentina desaceleración de las gotas al momento de impactarse con la superficie del metal puede llegar a ocasionar imperfección en el borde por la fuerza ocasionada [15]. En la gráfica 3 se puede observar el comportamiento del titanio, que conforme aumenta la cantidad de presión, también aumenta con ella la profundidad de erosión, a 500 psi se obtuvo el 0.29% de deformación ( $3.71 \mu\text{m}$ ), a 1000 psi se obtuvo un porcentaje de 0.70% de deformación ( $9.01 \mu\text{m}$ ) y finalmente a 1500 psi se obtuvo 0.99% de deformación ( $12.28\mu\text{m}$ ). La deformación para la aleación de inconel a 500 psi de presión registro un valor de 0.13% ( $1.67 \mu\text{m}$ ), a 1000 psi se obtuvo un porcentaje de 0.11% ( $2.24 \mu\text{m}$ ), mientras que a 1500 psi se obtuvo un porcentaje de

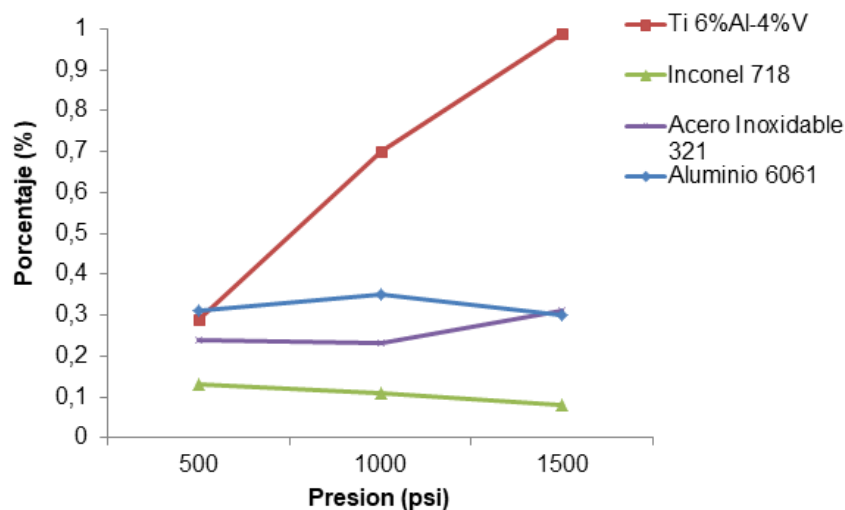
0.08% (2.61  $\mu\text{m}$ ). En cuanto al acero inoxidable presento a 500 psi un porcentaje de deformación del 0.31% (3.01  $\mu\text{m}$ ), a 1000 psi se obtuvo una deformación del 0.23% (2.84  $\mu\text{m}$ ) y para 1500 psi se obtuvo un porcentaje del 0.24% (3.85  $\mu\text{m}$ ). Por último, el porcentaje de deformación para el aluminio a 500 psi fue de 0.30% (3.63  $\mu\text{m}$ ), para 1000 psi de presión se obtuvo un porcentaje de deformación del 0.35% (4.13  $\mu\text{m}$ ), mientras que para 1500 psi se obtuvo un valor de 0.31% (3.56  $\mu\text{m}$ ). La grafica 4 muestra el comportamiento del porcentaje de la deformación para todas las aleaciones.

Conforme a lo anterior mencionado se observa que la aleación de titanio e inconel son las que presentan deformación conforme se va aumentando la cantidad de presión, esto debido a que poseen una mayor dureza en comparación con las otras dos aleaciones. Sin embargo, conforme un metal sea más duro su comportamiento será más frágil ante fuerzas de impacto.



**Gráfica 3.- Medidas de la profundidad de erosión de las cuatro aleaciones.**





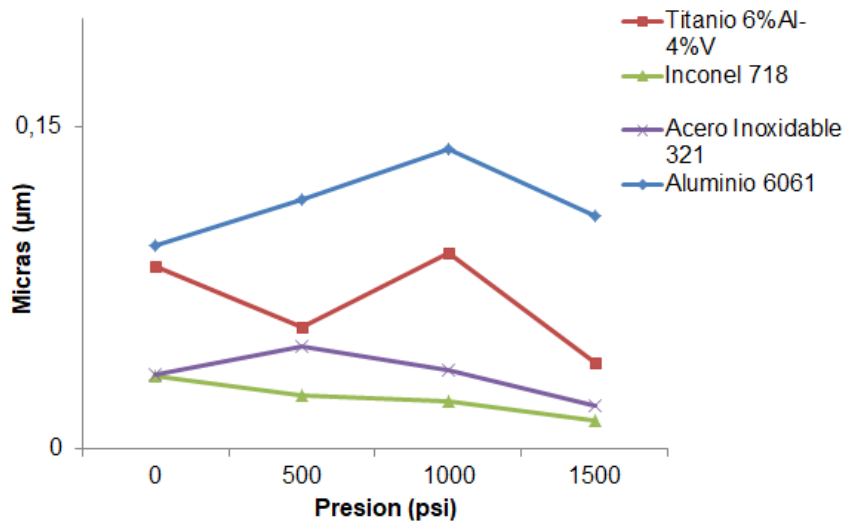
**Gráfica 4.- Medidas en porcentaje de la profundidad de erosión de las cuatro aleaciones.**

### 5.3.- Rugosidad

Las superficies de las cuatro aleaciones estuvieron expuestas a diversas fuerzas de impacto, debido a las tres diferentes cantidades de presión establecidas y de cierta manera el chorro de agua en conjunto con alguna otra solución química puede llegar a provocar ciertas protuberancias en la superficie o imperfección. En la gráfica 5 se pueden observar los valores de la rugosidad conforme la presión fue aplicada. Con respecto a la aleación de titanio, se observa que conforme se va aplicando las cantidades de presión la rugosidad varia, sin embargo, en la cantidad máxima que fue de 1500 psi de presión se obtuvo una cantidad de rugosidad menor de  $0.0402 \mu\text{m}$  en comparación a la que obtuvimos inicialmente de  $0.085 \mu\text{m}$ . En el caso de la aleación de inconel, se puede apreciar que conforme se fue aumentando la cantidad de presión fue disminuyendo la rugosidad La aleación del acero inoxidable mostro un aumento de su valor de rugosidad en

las cantidades de presión de 500 y 1000 psi, sin embargo en la última cantidad de presión de 1500 psi fue menor en comparación con la rugosidad inicial. Por otra parte, la aleación de aluminio presento una mayor rugosidad, conforme se aplicó las cantidades de presión fue en aumento el valor de la rugosidad, obteniendo finalmente una mayor rugosidad a la que posee la muestra original.

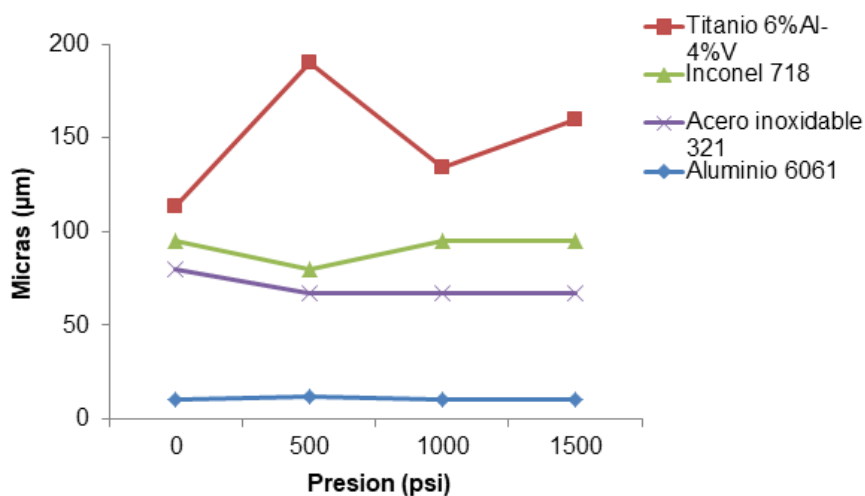
Con respecto a lo anteriormente mencionado, la aleación de aluminio fue la que presento aumento en la rugosidad, esto se debe a que el aluminio es un material blando y maleable. Por otra parte la norma SSPC-SP-16 establece que, el límite permitido en metales no ferrosos no debe ser mayor a 19 micras, debido a que afectaría en la superficie del metal para un posterior recubrimiento. Cabe mencionar que la superficie del metal debe tener una cierta rugosidad esto para que se adhiera con fuerza el tipo de recubrimiento que se le valla a colocar.



**Gráfica 5.- Medidas de rugosidad de las cuatro aleaciones a medida que va aumentando la presión.**

#### **5.4.- Tamaño de grano**

Es significativo conocer el tamaño de grano ya que forma parte de las propiedades mecánicas de los metales, por ello es relevante conocer la microestructura de cada uno de ellos. En la gráfica 6 se aprecia el comportamiento del tamaño de grano conforme las aleaciones se someten a las tres diferentes cantidades de presión. Para la aleación de titanio se observa un incremento del diámetro del grano con respecto a la original a los diferentes valores de presión lo cual se ve reflejado en las propiedades de dureza de la aleación. Con respecto a la aleación de inconel se observó un comportamiento no lineal sobre el diámetro del grano, el cual también afecta de manera directa las propiedades mecánicas de la aleación. En el caso del acero inoxidable se aprecia una disminución en su diámetro de grano, el cual incrementa las propiedades mecánicas del metal conforme se incrementa la presión de limpieza. Para la aleación de aluminio no se registraron cambios en el diámetro de grano de tal manera que la dureza permanece constante a lo largo de todas las pruebas.

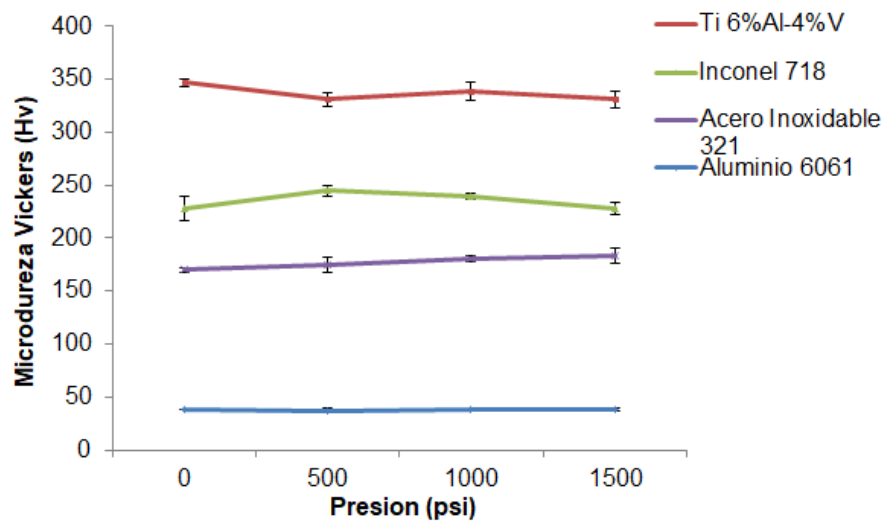


**Gráfica 6.- Gráfica correspondiente al tamaño de grano de cuatro aleaciones a diferentes cantidades de presiones.**

### 5.5.- Microdureza

La dureza es una propiedad mecánica importante de los metales, debido a que hace referencia a la resistencia de oponerse a fuerzas o incluso a ser rayados. Las superficies de las aleaciones de titanio, inconel, acero inoxidable y aluminio se sometieron a diversos valores de presión, de tal manera que se puede generar en ellos endurecimiento por deformación. En la gráfica 5 se muestra que para la aleación de Titanio 6%Al-4%V mostro una disminución de la dureza respecto al valor original alcanzando un valor final de 331 Hv, este comportamiento puede ser debido a que el material sufre cambios en el tamaño de grano, promoviéndose un incremento con los diferentes valores de presión, al mismo tiempo que el material podría estar sufriendo erosión en lugar de una deformación superficial. Para la aleación de Inconel 718 el comportamiento de la dureza está relacionado de manera directa con su tamaño de grano como se puede observar en los gráficos 6 y 7. Cuando se tiene un tamaño de

grano pequeño la dureza es relativamente alta y cuando se tiene un tamaño de grano la dureza es relativamente baja. El Acero Inoxidable 321 mostro un comportamiento distinto a los demás materiales, es decir con el incremento de la presión aumento el valor de su dureza, esto se debe a que es una aleación dúctil, que posee la capacidad de endurecer por medio de trabajo en frio o deformación, la cual es causada por efecto de la presión de limpieza. El Aluminio 6061 mantuvo su dureza constante con un valor aproximado de 38 Hv, por lo tanto, podemos decir que no se genera una deformación que impacte sobre la dureza del material y que genere cambios en el diámetro del tamaño de grano, lo cual se puede corroborar en el grafico 6.



**Grafica 7.- Gráfica de las respectivas durezas de las cuatro aleaciones a diferentes presiones.**

## CAPITULO 6

### 6.- CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de las medidas dimensionales, mediciones de microdureza Vickers, estimación de tamaño de grano, deformación superficial y medida de rugosidad de las aleaciones Titanio 6%Al-4%V, Inconel 718, Acero inoxidable 321 y Aluminio 6061 durante la limpieza superficial, con las cantidades de 500, 1000 y 1500 de presión (psi), se concluye que:

1.- El mecanismo de limpieza lavado a presión (Steam cleaning), genera una disminución del espesor con respecto al espesor inicial, esto se pudo observar claramente en las aleaciones de inconel 718 y Ti 6%Al-4%V, reduciendo el espesor inicial en 1.9% (40  $\mu\text{m}$ ) y del 3.13% (40  $\mu\text{m}$ ), respectivamente. Para fines prácticos este valor es despreciable.

2.- La aleación de Inconel 718 y titanio 6%Al-4%V presentaron la mayor deformación de 0.13% y 0.99%, respectivamente a una presión de 1500 psi.

3.- La rugosidad no presento un comportamiento significativo sobre la mayoría de las aleaciones, ya que solo la aleación de aluminio presento un incremento de 0.11  $\mu\text{m}$  para la presión de 1500 psi.

4.- El acero inoxidable 321 mostro un incremento mínimo en su dureza conforme aumento el valor de presión, esto debido a que el

acero inoxidable presento una disminución en su tamaño de grano.

5.- De manera general no se observaron cambios microestructurales o formación de segundas fases durante las presiones utilizadas.

El proyecto de tesis que lleva por nombre, **“Efecto de la presión de líquido sobre las propiedades microestructurales y mecánicas del material”** fue expuesto en el Congreso Internacional en Metalurgia Extractiva, Materiales y Medio Ambiente, celebrado del 01 al 06 de mayo de 2016, en la ciudad de Guanajuato, Gto.



**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] A.S.T.M. E 407-99, "*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*," *a.S.T.M.*, pp. 1–22, 1999.
- [2] H. Appold, K. Feiler, A. Reinhard, and S. Paul, "*Tecnología de los metales*," Barcelona-España: Reverté, 1985, p. 58.
- [3] D. R. Askeland and P. P. Phulé, "*Ciencia e ingeniería de los materiales*," 4ta ed., México, D.F.: THOMSON, 2003, pp. 571–573, 606–607, 610–615.
- [4] ASM, "*Heat treating, cleaning and finishing*," 8va ed., USA: Taylor Lyman, 1978, pp. 307–316.
- [5] ASTM E112 - 12, "*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*," *ASTM Int.*, vol. 96, no. November 2004, p. 8, 2012.
- [6] ASTM G-40-99, "*Wear and Erosion 1*," *ASTM Stand.*, vol. i, pp. 1–9, 2016.
- [7] S. H. Avner, "*Introducción a la metalurgia física*," 2da ed., México, D.F.: McGraw-Hill, 1988, pp. 53–54, 477–493, 503–512.
- [8] C. A. Bádenas, J. M. Manero Planella, D. Rodríguez Rius, A. A. Domenech, P. M. Arandés Salvado, and J. A. Planell Estany, "*Aleaciones ligeras*," Barcelona: EDICIONS UPC, 2001, pp. 53–57.
- [9] J. Billigmann and H. D. Feldmann, "*Estampado y prensado a máquina*," España: Reverté, 2002, pp. 32–35.

- [10] W. D. Callister, “*Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales,*” España: Reverté, 2007, pp. 179–186.
- [11] H. M. Cobb, “*The history of stainless steel,*” USA: ASM International, 2010, pp. 2–8.
- [12] A. J. De Santis, “*Análisis de fallos en sistemas aeronáuticos,*” Madrid, España: Paraninfo, 2015, pp. 38–41.
- [13] FRISA, “*Industria aeroespacial,*” 2016. [Online]. Available: <https://www.frisa.com/es/industrias/aeroespacial.html>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [14] M. A. García Bernal, “*Fusión de la aleación ligera Al-4.5Mg y análisis de sus propiedades superplásticas de aplicación aeronáutica y aeroespacial.,*” IPN, 2002.
- [15] “E. S Geskin and L. Tismeneskiy”, “*Mathematical modeling and experimental verification of stationary waterjet cleaning process,*” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 120, no. August 1998, pp. 571–579, 1998.
- [16] J. L. González Velázquez, “*Metalurgia mecánica,*” México, D.F.: Autor, 2004, pp. 85–98.
- [17] M. P. Groover, “*Fundamentos de manufactura moderna,*” 3ra ed., México, D.F.: McGraw-Hill, 2007, pp. 660–665.
- [18] A. Guha, R. M. Barron, and R. Balachandar, “*Journal of Materials Processing Technology An experimental and numerical study of water jet cleaning process,*” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 211, no. 4, pp. 610–618, 2011.
- [19] A. Handbook, “*Heat treating,*” USA: ASM International, 1991, pp. 1682–1708, 1757–1796.

- [20] Journalismo, “*Inconel 718*,” 2018. [Online]. Available: <http://www.journalisimo.com/pRNvoGQE/>. [Accessed: 21-Aug-2018].
- [21] S. Kalpakjian, “*Manufactura, ingeniería y tecnología*,” 5ta ed., México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008, pp. 178–180, 1078.
- [22] E. H. Lalana, “*ESTUDIO DE ALEACIONES DE TITANIO PULVIMETALÚRGICAS CON ADICIÓN DE Fe Y Cr*,” pp. 3–9, 2012.
- [23] D. Landeta, “*PERFORMANCE ANALYSIS OF 3D PRINTED 718 ALLOY FOR CORROSIVE ENVIRONMENTS A dissertation submitted to The University of Manchester for the degree of*,” pp. 14–22, 2015.
- [24] F. Liesa and L. Bilurbina, “*Adhesivos industriales*,” Barcelona-España: Marcombo, 1990, pp. 29–34.
- [25] M. a Martínez, J. Urdieres, J. Botella, and R. S. R. Parra, “*Influencia del tamaño de grano en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable austeníticos*,” *Rev. Metal.*, vol. 64, no. c, pp. 64–65, 2005.
- [26] V. N. Moiseyev, “*Titanium alloy: Russian aircraft and aerospace applications*,” USA: Taylor and Francis Group, 2006, p. 10,125, 196-197.
- [27] A. W. Momber, “*Hydroblasting and coating of steel structures*,” USA, New york: ELSEVIER, 2003, pp. 2–4, 8–14.
- [28] I. H. Montoya Hernández, “*Estudio de la precipitación en*

- aleaciones Al-2%Cu-0.3%Mg y Al-2%Cu-0.3%Mg-0.1%Ag mediante envejecido,* IPN, 2007.
- [29] Á. F. Mora, “*Corrosión intergranular en aceros inoxidables,*” *Ing. e Investig. n{ú}m. 2 (1982); 20-24 Ing. e Investig. n{ú}m. 2 (1982); 20-24 2248-8723 0120-5609*, pp. 21–24, 2011.
- [30] R. L. Mott, “*Machine elements in mechanical design,*” 4ta ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004, pp. 57–58, 61.
- [31] A. Mouritz, “*Introduction to aerospace materials,*” 1ra ed., Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2012, p. 183.
- [32] F. Murrillo Aguirre, “*Caracterización de Materiales para la construcción de una aeronave de entrenamiento primario tipo LSA,*” Universidad Autonoma de Occidente, 2014.
- [33] R. Ospina, H. Aguirre, and H. Parra, “*Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles,*” *Sci. Tech. Año XIII*, vol. 34, no. 34, pp. 273–275, 2007.
- [34] E. D. Padilla, “*Aplicaciones de los aceros inoxidables,*” *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Met. Cienc. Geogr*, vol. 2, no. 3, pp. 1–8, 1999.
- [35] J. C. Pereira, L. Durán, D. Van Deventer, and J. C. Zambrano, “*Comportamiento Mecánico a Torsión de la Aleación de Aluminio AA6061 Tratada Térmicamente,*” *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 183–190, 2009.
- [36] W. Petasch, B. Kegel, H. Schmid, K. Lendenmann, and H. U. Keller, “*Low-pressure plasma cleaning: A process for*

- precision cleaning applications,” Surf. Coatings Technol.*, vol. 97, no. 1–3, pp. 176–181, 1997.
- [37] I. Polmear, “*Light alloys*,” Oxford: ELSEVIER, 2006, pp. 299–335.
- [38] C. N. Ramón Reyna, “*Degradación a altas temperaturas de un acero inoxidable tipo AISI 321 en hornos industriales*,” Universidad Autonoma de Nuevo León, 2013.
- [39] R. C. Reed, “*The superalloys fundamentals and applications*,” USA, New york: CAMBRIDGE, 2006, pp. 1–28.
- [40] C. M. S.A., “*Preparación de superficie - norma SSPC*,” 2015. [Online]. Available: <https://cym.com.ar/intranet/Preparacion-de-superficies-norma-SSPC-granallado-cymmateriales-shotblasting.pdf>. [Accessed: 20-Dec-2017].
- [41] E. J. Soriano and J. Ferrer Ruiz, “*Metales y aleaciones (Mecanizado básico)*,” Madrid: Editex, 2010, p. 124.
- [42] C. E. Sosa González, “*Estudio del efecto del tamaño de grano en el endurecimiento por precipitación en la aleación Al-4%Cu-0.5%Mg-0.5%Ag*,” Tecnológico de estudios superiores de Ecatepec, 2012.
- [43] M. Tatiana and G. Pabón, “*Propiedades De Los Materiales Utilizados En El Sector Sector Aeronautico*,” pp. 1–16, 2015.
- [44] G. E. Totten and D. Acott Mackenzie, “*Handbook of Aluminum: alloy production and materials manufacturing*,” USA: MARCEL DEKKER, 2003, pp. 2, 44, 82.
- [45] Townecraf Dealer del Perú, “*Clasificación de los aceros*”

- inoxidables,*” 2015. [Online]. Available: <http://townecraftdelperu.com/comida11.htm>. [Accessed: 21-Aug-2018].
- [46] M. E. Treviño Torres, “*Estudio del desgaste por erosión en aleaciones de baja densidad,*” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2009.
- [47] H. V. Vilela Zeleda, “*Limpieza y preparación superficial del acero por chorro de agua (waterjetting),*” Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.
- [48] G. Welsch, R. Boyer, and E. W. Collings, “*Materials properties Handbook: Titanium alloys,*” USA: ASM International, 1993, p. 125.