

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales

CM 5300 Proyecto de Graduación

“Estudio de las Propiedades Mecánicas de los Perfiles de Aluminio  
para la Optimización del Proceso de Extrusión”

Realizado por: Raquel Zamora Baudrit

Profesor asesor: Ing. José Luis DeBriones Botella

Asesora industrial: Ing. Monserrat Leiva Bonilla

Junio, 2007

## **CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de graduación defendido públicamente ante el tribunal examinador integrado por los profesores Ing. Juan Fernando Álvarez Castro, Ing. Oscar Chaverri Quirós e Ing. José Luis DeBriones Botella. Como requisito para optar al grado de Licenciado en Ingeniería en Materiales, con énfasis en Procesos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La orientación y supervisión del trabajo desarrollado por el estudiante, estuvo a cargo del profesor asesor Ing. José Luis DeBriones Botella.

---

**Ing. Juan Fernando Álvarez Castro**  
**Profesor evaluador**

---

**Ing. Óscar Chaverri Quirós**  
**Profesor evaluador**

---

**Ing. José Luis DeBriones Botella**  
**Profesor Asesor**

---

**Raquel Zamora Baudrit**

Cartago, 19 de Junio de 2007

## **AGRADECIMIENTO**

A Jesús y a la Virgencita, por TODO.

A mami, por ser el ejemplo a seguir cuando de luchar se trata. Gracias por ser mi mamá, gracias por todo tu amor y tu inagotable entrega.

A Edgar. *'De pie frente al sol'*. Gracias por tus oraciones, lucha, perseverancia, apoyo, cariño, comprensión, entrega y todas esas otras cosas que el llegar a amar implica. Gracias por creer en mí.

A Gabita, mi Cristino, por enseñarme el verdadero valor de tener una amiga.

A tío Luis, por todo el cariño dado a mi familia.

A Pau, Viv y Vic, por ser tan especiales y tan únicos en mi vida.

Al profesor guía de este trabajo, Ing. José Luis DeBriones, a los lectores, Juan Fernando Álvarez y Óscar Chaverri y a la asesora industrial, Ing. Monserrat Leiva, por sus aportes a este proyecto.

A todo el personal de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales, en especial a Erick, Fabián, don Jorge, Marvin, Olguita, José Alberto, José Luis, Óscar y Juan Fernando, por todo el apoyo brindado durante este tiempo.

A don Róger, por su gran disponibilidad y ayuda para la agilización de este proyecto, así como por su excelente calidad humana.

## DEDICATORIA

*A ma y a Edgar*

## Resumen Ejecutivo

El presente trabajo pertenece al Proyecto de Graduación que es requisito para optar por el grado de Licenciatura en la carrera de Ciencia e Ingeniería de Materiales, con énfasis en Procesos Industriales. Este se desarrolla en la planta de Extralum, Cartago.

La planta de Extralum ubicada en Cartago se dedica a la fabricación de productos de aluminio para aplicaciones en puertas y ventanas. Actualmente, Extralum carece de un control sobre las propiedades mecánicas que presentan los productos de aluminio en función de los parámetros de velocidad y temperatura del proceso de extrusión.

Para este proyecto se evaluaron las propiedades mecánicas del perfil designado como 1029, así como el tamaño de grano que presenta. El perfil 1029 presenta una aleación de aluminio 6063, el cual pasa por el tratamiento térmico denotado como T5. Se dieron recomendaciones para la corrección del proceso de extrusión, dando criterios basados en el análisis de las pruebas requeridas para este tipo de perfil. De la misma manera, a lo largo del proyecto se estudió el comportamiento de la aleación ante cambios de velocidad y temperatura durante el proceso de extrusión.

Se determinaron las propiedades de resistencia máxima del perfil 1029, por medio del ensayo de tensión, las cuales cumplieron en un 100% con lo estipulado en la norma ASTM B557M.

A su vez, se realizaron pruebas de dureza en los perfiles, las cuales, en un 93%, presentaron durezas superiores a 60 HBS, la cual es la dureza mínima requerida para una aleación 6063T5.

También se determinó el tamaño de grano promedio ante las variaciones de temperatura y velocidad en el proceso de extrusión. El tamaño de grano encontrado en todas las muestras evidencia el descontrol sobre los parámetros de extrusión, ya que ninguno de estos se acercó al índice ASTM de tamaño de grano que se deseaba.

## Índice General

<i>Índice de Figuras</i>	x
<i>Índice de Tablas</i>	xvi
<i>Índice de Gráficos</i>	xvii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>A. Identificación de la Empresa</b>	<b>1</b>
1. Política de Calidad	1
2. Objetivos de Calidad	1
3. Antecedentes históricos	1
4. La organización	2
5. Tipos de productos	3
6. Mercado de exportación	4
<b>B. Justificación</b>	<b>4</b>
<b>C. Limitaciones y Alcance</b>	<b>4</b>
1. Limitaciones	4
a. Tiempo	4
b. Detención temporal de producción en la empresa Extralum	6
2. Alcance	6
<b>D. Objetivos</b>	<b>6</b>
1. Objetivo General	6
2. Objetivos Específicos	6

<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
<b>A. Extrusión</b>	<b>7</b>
1. Matriz	8
a. Matriz 1029	8
2. Velocidad de Extrusión – Temperatura del Tocho	9
3. Temperatura del Contenedor	9
4. Relación de Extrusión	9
5. Longitud del tocho	10
6. Presión de extrusión	10
7. Perfil de aluminio 1029	10
8. Tamaño de grano	11
<b>III. METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
<b>A. Tomar las variables del proceso de extrusión del perfil 1029</b>	<b>13</b>
<b>B. Obtener las muestras del perfil 1029 para las pruebas de tensión, dureza, análisis químico por medio de fluorescencia de rayos X y para el análisis metalográfico</b>	<b>15</b>
<b>C. Ejecutar las pruebas de dureza y tensión para determinar las propiedades mecánicas del producto extruído</b>	<b>17</b>
<b>D. Realizar el análisis metalográfico del perfil 1029</b>	<b>17</b>
<b>E. Analizar la composición química del perfil 1029 por medio de fluorescencia de rayos X</b>	<b>17</b>
<b>F. Analizar los resultados obtenidos</b>	<b>17</b>

<b>G. Obtener conclusiones y recomendaciones para corregir el proceso de extrusión</b>	<b>17</b>
<b>IV. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL</b>	<b>19</b>
<b>A. Resultados obtenidos</b>	<b>19</b>
1. Análisis de la composición química	20
2. Primera producción: Parámetros de operación normales del grupo 01 del área de extrusión.	20
a. Variables del proceso de extrusión, primera producción	20
b. Resultados de la prueba de tensión, primera producción	22
c. Resultados de la prueba de dureza, primera producción	23
d. Resultados metalográficos, primera producción	23
3. Segunda producción: Parámetros de operación normales del grupo 02 del área de extrusión.	36
a. Variables del proceso de extrusión, segunda producción	36
b. Resultados de la prueba de tensión, segunda producción	37
c. Resultados de la prueba dureza, segunda producción	37
d. Resultados metalográficos, segunda producción	38
4. Tercera producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 alta.	44
a. Variables del proceso de extrusión, tercera producción	44
b. Resultados de la prueba de tensión, tercera producción	45
c. Resultados de la prueba dureza, tercera producción	45
d. Resultados metalográficos, tercera producción	46



5.	Cuarta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho altas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.	52
a.	Variables del proceso de extrusión, cuarta producción	52
b.	Resultados de la prueba de tensión, cuarta producción	53
c.	Resultados de la prueba dureza, cuarta producción	53
d.	Resultados metalográficos, cuarta producción	54
6.	Quinta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.	60
a.	Variables del proceso de extrusión, quinta producción	60
b.	Resultados de la prueba de tensión, quinta producción	61
c.	Resultados de la prueba dureza, quinta producción	61
d.	Resultados metalográficos, quinta producción	62
<b>B.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>68</b>
1.	Variables del proceso de extrusión	68
a.	Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho	68
b.	Velocidad de extrusión del perfil 1029 y temperatura de salida del perfil	69
2.	Análisis de tensión y dureza	70
3.	Análisis metalográfico	71
<b>C.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>D.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>74</b>
<b>V.</b>	<b>ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN</b>	<b>75</b>
<b>A.</b>	<b>Disminuir la temperatura de salida del perfil</b>	<b>75</b>

1.	Reducir la temperatura del contenedor	75
B.	Controlar la temperatura al pasar el perfil por los abanicos	76
C.	Disminuir el tiempo de tratamiento térmico	76
D.	Posicionar los buggies fuera del horno al terminar el proceso de tratamiento térmico	76
VI.	<i>Bibliografía</i>	78
<i>Apéndice 1:</i>	<i>Resumen de las normas ASTM utilizadas</i>	80

## Índice de Figuras

Figura I-1 Organigrama de Extralum Cartago	3
Figura II-1 Tipos de extrusión: (a) directa e (b) indirecta	7
Figura II-2 Tipos de posiciones de la matriz, según la preferencia de las salidas del producto extruído.	8
Figura II-3 Salidas de los perfiles de la matriz 1029. Se señalan las cuatro salidas, únicamente se observan 3, la salida 4 está por debajo de la salida 3 y a la par de la salida 2.	9
Figura II-4 Perfil tubular cuadrado denotado por Extralum como 1029. La figura está a escala 1:1 y las dimensiones se encuentran en milímetros.	10
Figura III-1 Secciones a analizar del perfil 1029. Las dimensiones se encuentran en milímetros.	14
Figura III-2 Ubicación de las muestras extraídas del perfil 1029	16
<b>Figura III-3</b> Diagrama de flujo del proceso a seguir para corregir los parámetros del proceso de extrusión.	18
Figura IV-1 Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)	24
<b>Figura IV-2</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)	25
<b>Figura IV-3</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)	26
<b>Figura IV-4</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)	27
<b>Figura IV-5</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)	28
<b>Figura IV-6</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)	29

Figura IV-7 Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)	30
<b>Figura IV-8</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)	31
<b>Figura IV-9</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)	32
<b>Figura IV-10</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)	33
<b>Figura IV-11</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)	34
<b>Figura IV-12</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)	35
<b>Figura IV-13</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	38
<b>Figura IV-14</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	38
<b>Figura IV-15</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)	39
<b>Figura IV-16</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)	39
<b>Figura IV-17</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)	40
<b>Figura IV-18</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)	40
Figura IV-19 Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	41

<b>Figura IV-20</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	41
<b>Figura IV-21</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)	42
<b>Figura IV-22</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)	42
<b>Figura IV-23</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)	43
<b>Figura IV-24</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)	43
<b>Figura IV-25</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)	46
<b>Figura IV-26</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)	46
<b>Figura IV-27</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)	47
<b>Figura IV-28</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)	47
<b>Figura IV-29</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)	48
<b>Figura IV-30</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)	48
<b>Figura IV-31</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)	49
<b>Figura IV-32</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)	49

<b>Figura IV-33</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)	50
<b>Figura IV-34</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)	50
<b>Figura IV-35</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)	51
<b>Figura IV-36</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)	51
<b>Figura IV-37</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).	54
<b>Figura IV-38</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F)..	54
<b>Figura IV-39</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)	55
<b>Figura IV-40</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)	55
<b>Figura IV-41</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).	56
<b>Figura IV-42</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).	56
Figura IV-43 Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).	57
<b>Figura IV-44</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).	57
<b>Figura IV-45</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)	58

<b>Figura IV-46</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)	58
<b>Figura IV-47</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).	59
<b>Figura IV-48</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).	59
<b>Figura IV-49</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)	62
<b>Figura IV-50</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)	62
<b>Figura IV-51</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	63
<b>Figura IV-52</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	63
<b>Figura IV-53</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)	64
<b>Figura IV-54</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)	64
<b>Figura IV-55</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)	65
<b>Figura IV-56</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)	65
<b>Figura IV-57</b> Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	66
<b>Figura IV-58</b> Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)	66

**Figura IV-59** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)  
\_\_\_\_\_ 67

**Figura IV-60** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)  
\_\_\_\_\_ 67



## Índice de Tablas

Tabla IV-1 Primera producción. Toma de variables del proceso de extrusión. _____	20
Tabla IV-2 Número de muestra de la primera producción y su caracterización. ____	21
Tabla IV-3 Prueba de tensión realizada a la primera producción _____	22
Tabla IV-4 Prueba de dureza realizada a las muestras de la primera producción ____	23
Tabla IV-5 Segunda producción. Toma de variables del proceso de extrusión. _____	36
Tabla IV-6 Número de muestra de la segunda producción y su caracterización. ____	36
Tabla IV-7 Prueba de tensión realizada a la segunda producción _____	37
Tabla IV-8 Prueba de dureza realizada a las muestras de la segunda producción ____	37
Tabla IV-9 Tercera producción. Toma de variables del proceso de extrusión. _____	44
Tabla IV-10 Número de muestra de la tercera producción y su caracterización. ____	44
Tabla IV-11 Prueba de tensión realizada a la tercera producción _____	45
Tabla IV-12 Prueba de dureza realizada a las muestras de la tercera producción ____	45
Tabla IV-13 Cuarta producción. Toma de variables del proceso de extrusión. ____	52
Tabla IV-14 Número de muestra de la cuarta producción y su caracterización. _____	52
Tabla IV-15 Prueba de tensión realizada a la cuarta producción _____	53
Tabla IV-16 Prueba de dureza realizada a las muestras de la cuarta producción ____	53
Tabla IV-17 Quinta producción. Toma de variables del proceso de extrusión. _____	60
Tabla IV-18 Número de muestra de la quinta producción y su caracterización. _____	60
Tabla IV-19 Prueba de tensión realizada a la quinta producción _____	61
Tabla IV-20 Prueba de dureza realizada a las muestras de la quinta producción ____	61

## Índice de Gráficos

Gráfico IV-1 Tamaño de grano de la muestra 1, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -2 _____	24
Gráfico IV-2 Tamaño de grano de la muestra 1, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1 _____	25
Gráfico IV-3 Tamaño de grano de la muestra 2, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1 _____	26
Gráfico IV-4 Tamaño de grano de la muestra 2, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0 _____	27
Gráfico IV-5 Tamaño de grano de la muestra 3, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0 _____	28
Gráfico IV-6 Tamaño de grano de la muestra 3, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0 _____	29
Gráfico IV-7 Tamaño de grano de la muestra 4, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1 _____	30
Gráfico IV-8 Tamaño de grano de la muestra 4, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0 _____	31
Gráfico IV-9 Tamaño de grano de la muestra 5, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0 _____	32
Gráfico IV-10 Tamaño de grano de la muestra 5, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 2 _____	33
Gráfico IV-11 Tamaño de grano de la muestra 6, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 1 _____	34
Gráfico IV-12 Tamaño de grano de la muestra 6, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 2 _____	35

# I. INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades mecánicas de los perfiles de aluminio, conlleva tanto el realizar las pruebas en los laboratorios como el tratar con el personal administrativo de la empresa Extralum, así como conocer a profundidad el medio por el que procesan los perfiles de aluminio hasta llegar a un producto terminado.

Es por esto que este apartado presentará las siguientes secciones:

- A. Identificación de la empresa
- B. Justificación
- C. Limitaciones y Alcance
- D. Objetivos

## A. Identificación de la Empresa

Extralum es una empresa costarricense, líder en la manufactura, transformación, y comercialización de productos en vidrio y aluminio, cuya meta es la satisfacción del cliente para lo cual se destinan todos los recursos técnicos y humanos disponibles.

Extralum S.A. no tiene declarada una misión/visión, por lo que se presentarán la política de calidad y los objetivos de la empresa

### 1. Política de Calidad

*Satisfacer a nuestros clientes mediante la mejora continua y el desarrollo del potencial humano, asegurándoles la calidad en los productos y servicios por ellos requerida.*

### 2. Objetivos de Calidad

- a. Disminuir las devoluciones de los Clientes.
- b. Cumplir con los tiempos de entrega establecidos.

### 3. Antecedentes históricos

Extrusiones de Aluminio S.A. (Extralum) se funda en 1990 con una prensa extrusora, en una planta ubicada contiguo a la Zona Franca, Cartago, Costa Rica

(lugar donde se encuentra actualmente), la cual cuenta aproximadamente con 5000 m<sup>2</sup> de construcción y un terreno de 15000 m<sup>2</sup>.

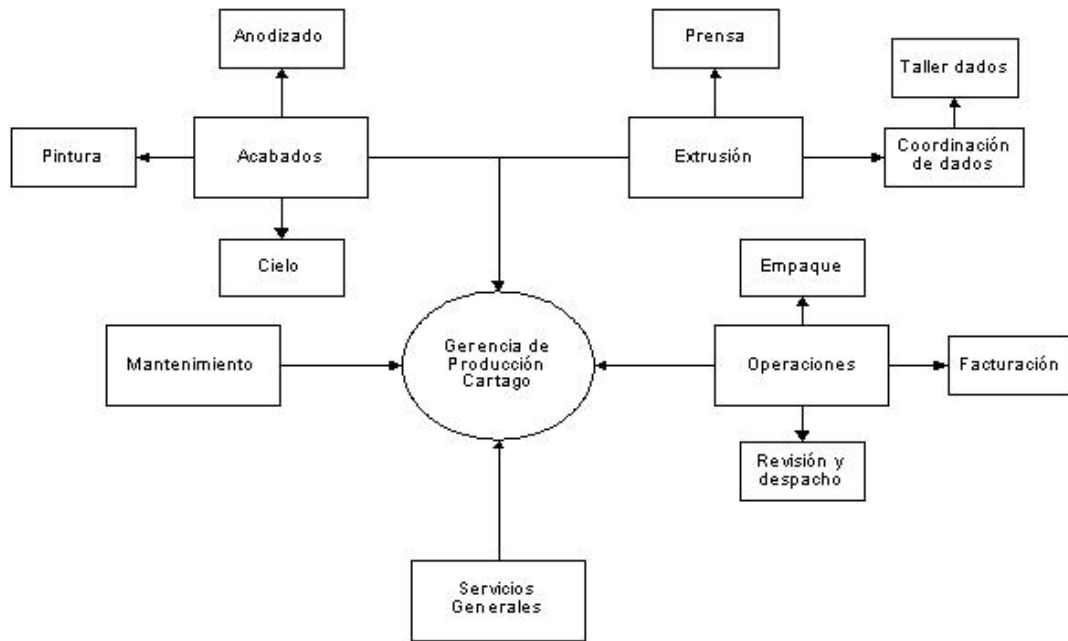
En 1992 se implementa la línea de anodizado electrolítico. En ese mismo año se instala la planta para la fabricación de producto armado, brindando asesoría para el diseño, fabricación y ensamble en aluminio arquitectónico (ventanas, puertas y fachadas flotantes).

Como resultado de la moderna organización con que cuenta la empresa, esta se ha logrado consolidar como una industria líder en fabricación de perfiles extruídos y anodizados de un nivel de calidad muy elevado. Esto le permite atender arquitectónicamente e industrialmente el mercado Nacional, Centroamericano y Terceros Mercados.

La planta de extrusión cuenta con una prensa de un diámetro de 6 1/8 pulgadas y 1.250 toneladas de presión. Esta planta tiene una capacidad instalada de 3.000 toneladas anuales, integrada verticalmente con las plantas de anodizado, fabricación y ensamble.

#### **4. La organización**

Extralum es una organización compuesta por diferentes empresas dedicadas a actividades. A continuación, se muestra el organigrama de la Gerencia de Producción de Cartago. Esta gerencia al igual que la Gerencia de Producción de Heredia, la Gerencia Comercial y la Gerencia de Finanzas deben responder a una Gerencia General, que es la encargada de controlar todos los procesos.



**Figura I-1** Organigrama de Extralum Cartago

Como se observa en la Figura I-1, la Gerencia de Producción tiene a cargo 5 departamentos principales, los cuales son: extrusión, acabados, operaciones servicios generales y mantenimiento.

El tipo de organigrama utilizado permite dar una idea de colaboración entre los departamentos de la empresa, no un orden jerárquico, ya que se pretende involucrar por igual a cada uno de los departamentos y personas que laboran en la empresa, como parte de un fin común.

## 5. Tipos de productos

En la planta de Cartago se fabrican perfiles de aluminio en todas las presentaciones posibles, atendiendo inclusive a pedidos especiales de los clientes con nuevas formas colores y acabados, esto incluye piezas de aluminio para cielo suspendido.

Debido a que la corporación Extralum está formada tanto por la planta extrusora de Cartago como por la planta de vidrio ubicada en Heredia, la diversidad de productos aumenta. Algunos de esto son: vidrios de seguridad, parabrisas, puertas para baño entre otros.

## **6. Mercado de exportación**

Los productos se comercializan a través de distribuidores especializados en la línea de Aluminio arquitectónico (puertas, ventanas y fachadas flotantes). Se cuenta con distribuidores en Costa Rica, Centroamérica, Estados Unidos y el Caribe, en la línea de perfilaría, extruída y anodizada. En Costa Rica se cuenta con distribuidores en Pérez Zeledón, Guanacaste y Heredia.

### **B. Justificación**

Extralum cuenta con una gama de productos de perfiles de aluminio, los cuales se utilizan en puertas y ventanas en general. Éstos poseen una excelente presentación al cliente, sin embargo no se tiene un adecuado control de las propiedades mecánicas de los perfiles en función de los parámetros de extrusión. Se requiere el análisis de los parámetros de extrusión y la influencia de estos sobre las propiedades mecánicas de los perfiles, con el fin de corregir el proceso de extrusión. Como modificación al proceso de extrusión para el estudio de los perfiles, se variarán únicamente las temperaturas del tocho en el horno de precalentamiento y la velocidad del perfil.

### **C. Limitaciones y Alcance**

#### **1. Limitaciones**

El proyecto encontró dos principales limitaciones:

- a. Tiempo
- b. Detención temporal de producción de perfiles en la empresa Extralum

#### **a. Tiempo**

El proyecto se realizará durante el primer semestre lectivo del año 2007, el cual consta de 16 semanas comprendidas entre los meses de febrero y junio. El tiempo determinó las limitaciones del proyecto en los siguientes aspectos:

#### Análisis de un solo producto

El tiempo determina la realización del estudio de un solo producto. Esto implica que las correcciones que se indiquen en los parámetros del proceso de extrusión, sean aplicables para un solo producto y no para la totalidad de los productos con que cuenta Extralum. Éste producto será el perfil denotado por Extralum como 1029.

### Salidas de la matriz

La matriz que da la forma al perfil 1029 cuenta con 4 salidas. El tiempo permite el análisis de sólo dos salidas.

### VARIABLES DEL PROCESO POR EL QUE ATRAVIESA EL PERFIL 1029

El producto analizado lleva tanto el proceso de extrusión como de tratamiento térmico, pero únicamente se trabajó con el cambio de dos parámetros del proceso de extrusión: temperaturas del horno de precalentamiento del tocho y velocidad de extrusión del perfil 1029. Se eligieron únicamente dos variables, ya que por razones de tiempo no se podían contemplar los restantes parámetros que pueden ser controlados.

A continuación se mencionan los parámetros que no se cambiaron tanto en el proceso de extrusión como en el de tratamiento térmico:

Parámetros del proceso de extrusión sin variar:

- Temperatura del contenedor.
- Temperatura del horno de precalentamiento de la matriz.
- Tiempo de permanencia entre la salida del horno de precalentamiento de la matriz 1029 y el posicionamiento en la prensa.
- Tiempo de permanencia entre la salida del tocho de su horno de precalentamiento y el posicionamiento en la prensa.
- Tensión del equipo que jala el perfil 1029.

Parámetros del proceso de tratamiento térmico sin variar:

- Tiempo de permanencia del perfil 1029 entre la salida de la prensa y el ingreso al horno de tratamiento térmico.
- Tiempo del proceso de tratamiento térmico.
- Temperatura dada al perfil 1029 dentro del proceso de tratamiento térmico.
- Tiempo de permanencia del perfil 1029 entre la finalización del tratamiento térmico y salida del horno de tratamiento térmico.
- Tiempo de permanencia entre la salida del perfil 1029 del horno de tratamiento térmico y recibo del perfil 1029 para la extracción de muestras.

## **b. Detención temporal de producción en la empresa Extralum**

Durante la realización del proyecto se dio un paro en producción de 4 semanas, debido a la implementación de nuevos equipos. Esto provocó que Extralum pudiera estabilizar su producción en un período de 4 semanas. Esta razón llegó a ser significativa en la toma de recomendaciones para la corrección del proceso de extrusión, ya que si este paro no hubiese existido, probablemente se hubieran podido implementar en una totalidad las recomendaciones dadas a la producción del perfil 1029.

### **2. Alcance**

El trabajo pretende reunir el conocimiento técnico y la comprobación práctica, que permita relacionar las posibles variaciones en las propiedades mecánicas de los perfiles con las modificaciones de los parámetros de temperaturas del tocho en el horno de precalentamiento y la velocidad de extrusión del perfil 1029. De esta manera, se pretende señalar los parámetros a modificar en el proceso de extrusión.

## **D. Objetivos**

### **1. Objetivo General**

Evaluar y analizar los efectos que tienen las modificaciones dadas a la velocidad de extrusión del perfil 1029 y a las temperaturas del tocho en el horno de precalentamiento, en las propiedades mecánicas del perfil 1029.

### **2. Objetivos Específicos**

- Analizar las propiedades mecánicas del perfil 1029, mediante pruebas de tensión y dureza.
- Caracterizar la aleación mediante fluorescencia de rayos X.
- Determinar el tamaño de grano del perfil 1029 mediante el análisis de metalografía.
- Analizar las posibles variaciones en las propiedades mecánicas y el tamaño de grano del perfil 1029, según los cambios en los parámetros de extrusión.
- Dar las recomendaciones para la corrección de los parámetros del proceso de extrusión del perfil 1029.



## II. MARCO TEÓRICO

### A. Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado por deformación plástica en fase sólida, mediante el cual se moldea un metal, en caliente o en frío, al ser comprimido en un recipiente que posee una matriz, la cual reduce la sección al ser forzado a introducirse en un orificio con las dimensiones aproximadas del producto que se desea obtener, y por el otro extremo un disco macizo (Barrand & Gadeau, 1968).

En general, la extrusión es utilizada para producir barras cilíndricas, cuadradas, hexagonales, tubos, perfiles de secciones diversas y de secciones complejas. A causa de que se requieren grandes fuerzas en el proceso de extrusión, la mayoría de los metales son extruídos en caliente, bajo condiciones en las que la resistencia a la deformación del metal es baja. Por otra parte, la extrusión en frío es posible para muchos metales y ha llegado a ser un proceso industrial de importancia (Dieter, 1961).

Herenguel (1976), describe los dos tipos básicos de extrusión: directa e indirecta. En la extrusión directa, el tocho es introducido a través del recipiente, por medio de un vástago de presión, hasta quedar en contacto con la matriz que permanece fija. En la invertida, la matriz es fijada al vástago y durante el proceso, las distintas secciones del tocho sufren, en principio, la misma fluencia. En la extrusión invertida, las aplicaciones son limitadas, ya que al pasar la barra extruída por el interior del vástago se da un debilitamiento mecánico. Ambos tipos se representan en las figura 2.1.

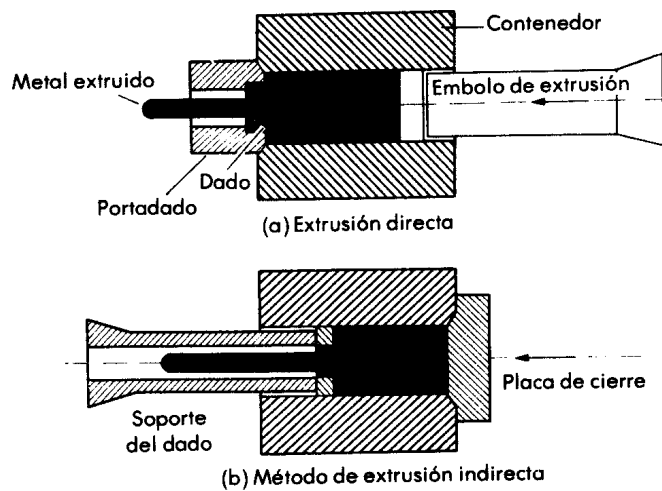
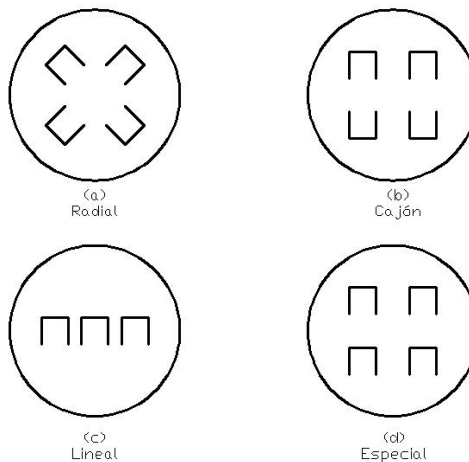


Figura II-1 Tipos de extrusión: (a) directa e (b) indirecta

Dieter (1961), menciona que las fuerzas de fricción y la presión requerida para la extrusión, son menores para el proceso de extrusión invertida que para el directo.

### 1. Matriz

Bello (1965) especifica los tipos de posicionamiento de las matrices, según la preferencia de las salidas, los cuales son: radial, cajón, lineal y especial. Dichos posicionamientos se muestran en la Figura II-2.



**Figura II-2** Tipos de posiciones de la matriz, según la preferencia de las salidas del producto extruído.

(a) Radial: presenta un mayor balance de las superficies de roce. (b) Cajón: no presenta buen balance en las superficies de roce, favorable para mesas automáticas. (c) Lineal: las salidas presentan distintos tipos de superficie de roce. (d) Especial: poco utilizado, se debe hacer cálculo exacto del flujo de aluminio.

#### a. Matriz 1029

Las matrices presentan distintas denominaciones, según el tipo de producto que se desea extruír. La empresa Extralum cuenta con la denominación 1029 para la matriz de cuatro salidas para el perfil tubular cuadrado que lleva la misma denominación. El posicionamiento de la matriz en la extrusora es de tipo cajón. Las salidas de los perfiles 1029 se muestran en la Figura II-3.



**Figura II-3** Salidas de los perfiles de la matriz 1029. Se señalan las cuatro salidas, únicamente se observan 3, la salida 4 está por debajo de la salida 3 y a la par de la salida 2.

## **2. Velocidad de Extrusión – Temperatura del Tocho**

La transformación de un tocho en producto extruído dentro del proceso de extrusión directa, genera calor proveniente de la transformación en calor del trabajo interno y del roce del tocho contra la pared del recipiente. El calor se transfiere a la herramienta y al producto extruído.

Las aleaciones de aluminio poseen una temperatura crítica entre los 480 °C y 600 °C (896 °F y 1112 °F), la cual varía según los elementos aleantes. Para una aleación 6063 T5, esta temperatura crítica está entre 426,67 °C y 551,27 °C (800 ° y 1025 °F). Fuera de este rango de temperaturas, la aleación se vuelve frágil. La zona del producto que está en contacto con la matriz, tiene una menor velocidad de extrusión con relación a la zona central.

## **3. Temperatura del Contenedor**

El recipiente debe precalentarse para impedir un choque térmico brusco del tocho antes de pasar por el proceso de extrusión. Las temperaturas empleadas deben ser inferiores en 20 °C a 50 °C (68 °F a 122 °F) a la temperatura del tocho.

## **4. Relación de Extrusión**

Es la relación dada entre la sección transversal del recipiente y la sección total del producto extruído.

La velocidad de extrusión es proporcional a la sección del recipiente e inversamente proporcional a la sección total del producto extruído. La velocidad de extrusión disminuye al mismo tiempo que la relación de extrusión.

### 5. Longitud del tocho

La velocidad de extrusión es inversamente proporcional a la longitud del tocho. Al aumentar la longitud, se debe incrementar la presión necesaria para iniciar el proceso. Las longitudes empleadas pueden variar, según el largo del perfil requerido. Para un diámetro de tocho de 152,4 mm, se puede tener una longitud de 520 mm.

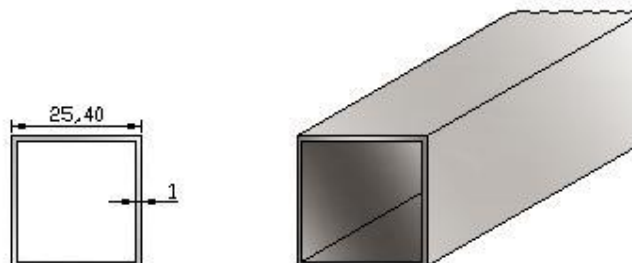
### 6. Presión de extrusión

La presión depende del trabajo interno durante la deformación y del frotamiento contra las paredes del recipiente. El principio y el final de la extrusión requieren presiones más elevadas, ya que al comienzo se da un máximo frotamiento contra las paredes del recipiente, y, al final de la extrusión, se deben vencer efectos importantes de cizallamiento.

### 7. Perfil de aluminio 1029

El producto a analizar presenta una aleación 6063 T5 y es denotado como 1029, esto según la designación dada por Extralum a la matriz. La **Figura II-4** muestra el perfil 1029, en ésta se pueden apreciar las siguientes características:

- Perfil tubular cuadrado
- Dimensiones:
  - o Largo x ancho: 25,40 mm x 25,40 mm
  - o Espesor: 1mm



**Figura II-4** Perfil tubular cuadrado denotado por Extralum como 1029. La figura está a escala 1:1 y las dimensiones se encuentran en milímetros.

Las dimensiones del largo y ancho del producto permite la realización de las pruebas de tensión y metalografía. El perfil 1029 no requiere la determinación del porcentaje de elongación debido a su espesor de 1 mm (ASTM B557M, 2002).

## 8. Tamaño de grano

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento. Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano.

El número de tamaño de grano se definió originalmente como:

$$N_{AE} = 2^{G-1}$$

en donde G es el índice de grano ASTM y  $N_{AE}$  es el número de granos por pulgada al cuadrado para una magnificación de 100X. Si se desea obtener el número por milímetros al cuadrado a una magnificación de 1X, se debe multiplicar por 15,50 (ASTM E112, 2004).

Existen tres procedimientos básicos para la determinación del tamaño de grano:

- i Procedimiento por comparación
- ii Por medio de la cuenta del número de granos en un área conocida
- iii Procedimiento por intercepción

De los tres procedimientos, el más recomendado es el segundo, con el cual se logra determinar el tamaño de grano existente en una muestra de manera más exacta.

La norma ASTM E112 (2004) presenta la relación existente entre el diámetro del grano (d) y su índice ASTM (G), dada por las siguientes ecuaciones:

$$G = - 3,2877 - 6,6439 \log_{10} (d/1,571)$$

Barrand & Gardeau (1968) caracterizan el tamaño de grano para un aluminio que ha atravesado un proceso de conformado de la siguiente manera:

- Tamaño de grano grueso: diámetro mayor a 125  $\mu\text{m}$ .
- Tamaño de grano excelente: diámetro comprendido entre 48  $\mu\text{m}$  y 80  $\mu\text{m}$ .

Utilizando la ecuación para el tamaño de grano  $G$  y los tamaños de grano definidos anteriormente, se tienen los siguientes índices ASTM:

- Tamaño de grano grueso:  $G < 4$ .
- Tamaño de grano excelente:  $5 < G < 7$ .

### III. METODOLOGÍA

Para poder corregir los parámetros del proceso de extrusión, se debe realizar una planificación que garantice el éxito el proyecto. Para esto se tienen distintas etapas a elaborar dentro del procedimiento elegido, las cuales son:

#### A. Tomar las variables del proceso de extrusión del perfil 1029

El proyecto se centra en el análisis de las propiedades mecánicas del perfil 1029 ante las variaciones de los parámetros del proceso de extrusión. Las variables a tomar serán:

- Temperatura a la que se encuentra el horno de precalentamiento de matrices ( $T_{matriz}$ ).
- Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho.
  - o Temperatura perteneciente a la zona de inicio del horno de precalentamiento del tocho, denotado de ahora en adelante como temperatura de la zona 1 ( $T_{zona1}$ ).
  - o Temperatura perteneciente a la zona del medio del horno de precalentamiento del tocho, denotado de ahora en adelante como temperatura de la zona 2 ( $T_{zona2}$ ).
  - o Temperatura perteneciente a la zona final del horno de precalentamiento del tocho, última zona del horno de precalentamiento antes de sacar el tocho para su corte y posicionamiento en la prensa de la extrusora, denotado de ahora en adelante como temperatura de la zona 3 ( $T_{zona3}$ ).
- Temperatura de salida del perfil 1029 ( $T_{sal}$ ).
- Velocidad de extrusión del perfil 1029 ( $v_{perfil}$ ).

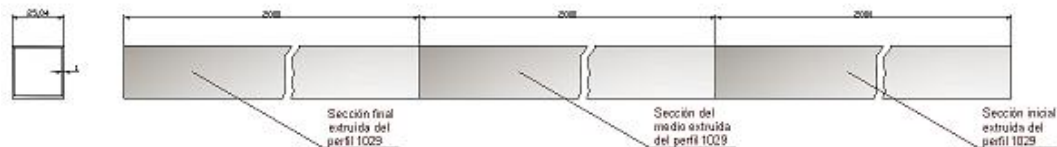
De esta toma de variables, se centrará el estudio únicamente en los parámetros de temperaturas del tocho dentro del horno de precalentamiento y la velocidad de extrusión del perfil 1029.

La matriz que da la forma al perfil 1029 contiene cuatro salidas, de éstas se analizaron sólo dos. Las dos salidas analizadas pertenecen a las salidas 1 y 2 (ver Figura II-3). Estas dos salidas se denotaran de ahora en adelante como salida superior (para la salida 1) y salida inferior (para la salida 2). Se eligieron estas dos salidas

porque el aluminio presenta roces distintos con la matriz 1029 entre las salidas superior (salida 1) e inferior (salida 2), lo que podría llegar a presentar variaciones en los resultados. Estas dos salidas no poseen distinción entre los parámetros dados al equipo que controla la extrusión, los cuales se citaron anteriormente. Cada una de estas salidas posee una longitud de 6 m, aproximadamente.

Con respecto a la toma de la temperatura de salida y a la velocidad de extrusión del perfil 1029, se tomaron medidas de tres secciones del perfil 1029 mientras éste se extraía. Estas secciones se muestran en la Figura III-1 y presentan las siguientes características:

- Sección inicial del perfil 1029 extruído (longitud de perfil extruído menor a dos metros).
- Sección media del perfil 1029 extruído (longitud de perfil extruído menor a cuatro metros y mayor a dos metros).
- Sección final del perfil 1029 extruído (longitud de perfil extruído menor a seis metros).



**Figura III-1** Secciones a analizar del perfil 1029. Las dimensiones se encuentran en milímetros.

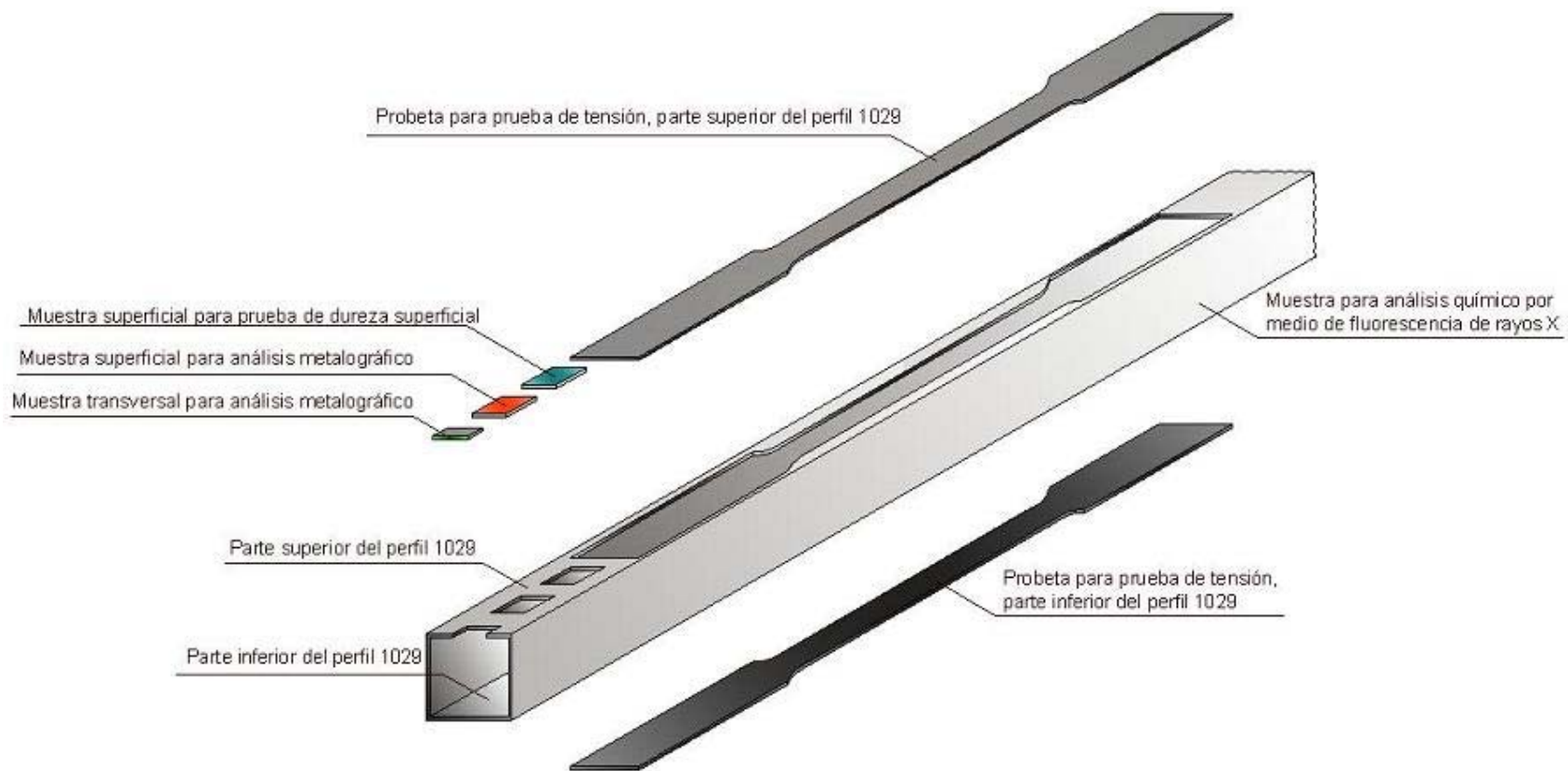


**B. Obtener las muestras del perfil 1029 para las pruebas de tensión, dureza, análisis químico por medio de fluorescencia de rayos X y para el análisis metalográfico**

Al obtener los parámetros de producción del perfil 1029, se procedió a la obtención de muestras. Se dio la toma de muestras de las dos salidas a analizar de la matriz 1029. De estas salidas se tomaron las muestras de cada sección de perfil extruído (inicio, medio y final), tal y como se muestra en la Figura III-1. De esta manera se pretende analizar las posibles variaciones que presente el perfil 1029 en las propiedades mecánicas, según su sección y su salida de la matriz.

De cada sección se extraerán 6 muestras, las cuales se muestran en la Figura III-2. Estas muestras se destinarán de la siguiente manera:

- 2 muestras para la prueba de tensión.
- 1 muestra del área superficial del perfil 1029 para el análisis metalográfico.
- 1 muestra del área transversal del perfil 1029 para el análisis metalográfico.
- 1 muestra del área superficial del perfil 1029 para la prueba de dureza.
- 1 muestra para la prueba de fluorescencia mediante rayos X.



**Figura III-2** Ubicación de las muestras extraídas del perfil 1029

**C. Ejecutar las pruebas de dureza y tensión para determinar las propiedades mecánicas del producto extruído**

Se realizarán las pruebas de dureza y tensión, siguiendo lo estipulado por la normas ASTM E8M (2004) y ASTM E18 (2005).

Estas pruebas se realizarán en los equipos para los ensayos de dureza y tensión con que cuenta la Escuela de Ingeniería Electromecánica, del ITCR, Cartago.

**D. Realizar el análisis metalográfico del perfil 1029**

El análisis metalográfico se llevará a cabo con el equipo existente en el Centro de Investigación y Extensión de Materiales (CIEM), del ITCR, Cartago. La realización del análisis metalográfico se hará según lo determinado por ASTM E112 (1995).

**E. Analizar la composición química del perfil 1029 por medio de fluorescencia de rayos X**

Este punto se ejecuta para la verificación de la aleación con la que se está tratando, la cual es la perteneciente al aluminio 6063. Se realizará con el equipo de fluorescencia de rayos X que se encuentra en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales (ITCR, Cartago).

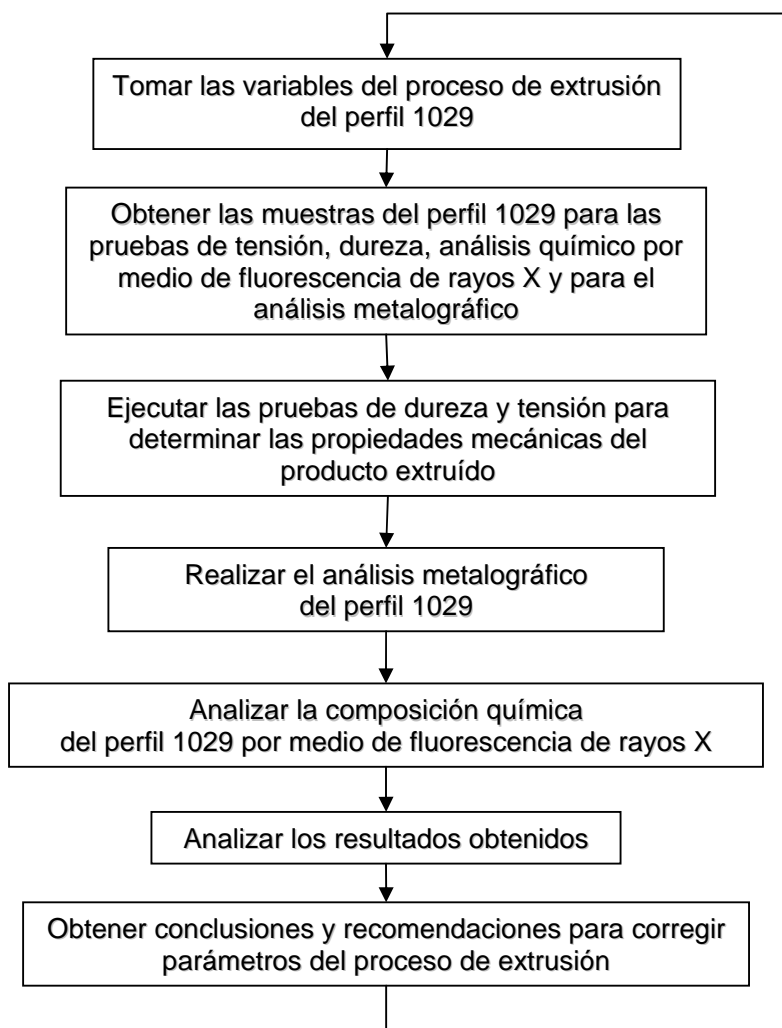
**F. Analizar los resultados obtenidos**

Se efectuarán los análisis de las pruebas anteriormente mencionadas, llevando esto a establecer la corrección del proceso de extrusión.

**G. Obtener conclusiones y recomendaciones para corregir el proceso de extrusión**

Según los resultados obtenidos se darán las conclusiones y recomendaciones necesarias para dar un menor rango de decisión para al cambiar las variables del proceso de extrusión, volviendo con esto al punto A.

En la Figura III-3 se muestra un diagrama de flujo, en el cual se esquematiza el procedimiento a seguir descrito anteriormente.



**Figura III-3** Diagrama de flujo del proceso a seguir para corregir los parámetros del proceso de extrusión.

## IV. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

### A. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se dividirán según los cambios realizados en los dos parámetros de extrusión contemplados: temperatura de salida del perfil extruído y velocidad de extrusión del tocho. Los resultados obtenidos pertenecen a las siguientes situaciones:

1. Primera producción: Parámetros de operación normales del grupo 01 del área de extrusión.
2. Segunda producción: Parámetros de operación normales del grupo 02 del área de extrusión.
3. Tercera producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 alta.
4. Cuarta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho altas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.
5. Quinta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.

Para cada uno de los cambios dados a los parámetros de extrusión mencionados se obtuvieron los siguientes resultados:

- Condición del perfil extruído después de pasar el proceso de tratamiento térmico, teniendo los siguientes resultados:
  - o Dureza superficial
  - o Tensión
  - o Tamaño de grano

De manera general, se presenta a continuación, los resultados de la composición química por medio del ensayo de fluorescencia de rayos X.

## 1. Análisis de la composición química

Se realizó un análisis químico por medio del método de fluorescencia. Este análisis se dio para un perfil de cada producción. El ensayo reveló la concordancia del perfil 1029 con la aleación 6063, que era lo esperado.

De esta manera se logra verificar que la aleación con la que se está trabajando es la 6063.

## 2. Primera producción: Parámetros de operación normales del grupo 01 del área de extrusión.

### a. Variables del proceso de extrusión, primera producción

Se tomaron los parámetros de extrusión bajo condiciones normales de operación de los grupos 01 y 02 del área de extrusión, los cuales pertenecen a los horarios de la mañana y de la tarde, respectivamente. Esto con el fin de evaluar posibles variaciones entre un grupo y otro. La Tabla IV-1 muestra los parámetros de extrusión obtenidos en una primera producción.

**Tabla IV-1** Primera producción. Toma de variables del proceso de extrusión.

Parámetros del tocho en el horno de precalentamiento			Parámetros del perfil 1029 extruído		
Zona de precalentamiento del tocho	Temperatura ajustada por parte del operario $T_{set}$ , °C (°F)	Temperatura real reportada al equipo $T_{real}$ , °C (°F)	Sección	Velocidad de extrusión $V_{ext}$ (m/min)	Temperatura de salida $T_{sal}$ , °C (°F)
1	437,78 (820)	433,33 (812)	Inicio	10	504,44 (940)
2	437,78 (820)	443,89 (831)	Medio	34	549,44 (1021)
3	437,78 (820)	435,56 (816)	Final	30	571,11 (1060)

Las muestras obtenidas de la primera producción se detallan tal y como se establece en la Tabla IV-2. Esta caracterización para el número de muestra se sigue para el resto de los resultados obtenidos en una primera producción.

**Tabla IV-2** Número de muestra de la primera producción y su caracterización.

<b>Muestra</b>		
<b>No.</b>	<b>Salida de la matriz</b>	<b>Sección del perfil</b>
<b>1</b>	Superior	Inicio
<b>2</b>	Superior	Medio
<b>3</b>	Superior	Final
<b>4</b>	Inferior	Inicio
<b>5</b>	Inferior	Medio
<b>6</b>	Inferior	Final

**b. Resultados de la prueba de tensión, primera producción**

Para realizar la prueba de tensión, se eligió tomar dos muestras por cada dos metros para cada perfil. Esto con el fin de obtener una mayor precisión en los resultados. Los resultados obtenidos para una primera producción se presentan en la Tabla IV-3.

**Tabla IV-3** Prueba de tensión realizada a la primera producción

<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	
	<b>No.</b>	<b>Prom</b>
<b>1</b>	208,721	<b>209,975</b>
	211,229	
<b>2</b>	186,537	<b>192,790</b>
	199,042	
<b>3</b>	194,858	<b>196,516</b>
	198,173	
<b>4</b>	193,244	<b>196,743</b>
	200,243	
<b>5</b>	199,753	<b>206,184</b>
	212,616	
<b>6</b>	209,495	<b>206,748</b>
	204,001	



### c. Resultados de la prueba de dureza, primera producción

El ensayo de dureza se realizó de manera superficial en la escala Rockwell superficial 15 T. Los resultados de la primera producción se muestran en la Tabla IV-4.

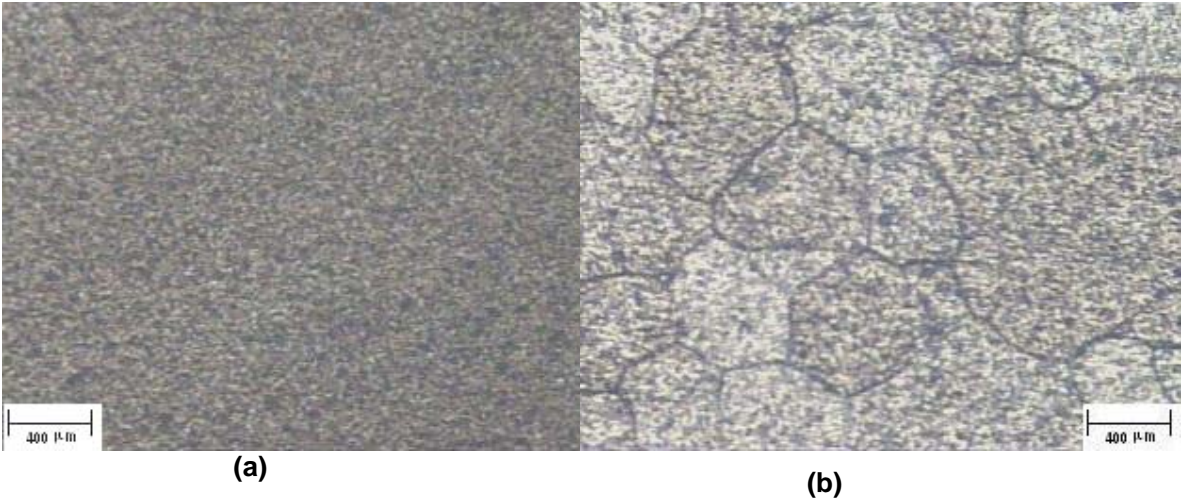
**Tabla IV-4** Prueba de dureza realizada a las muestras de la primera producción

<b>Muestra</b>	<b>Dureza Brinell (HBS)</b>
<b>No.</b>	Conversión desde la escala Rockwell superficial 15-T
1	75,32
2	62,51
3	58,70
4	64,21
5	67,10
6	65,50

### d. Resultados metalográficos, primera producción

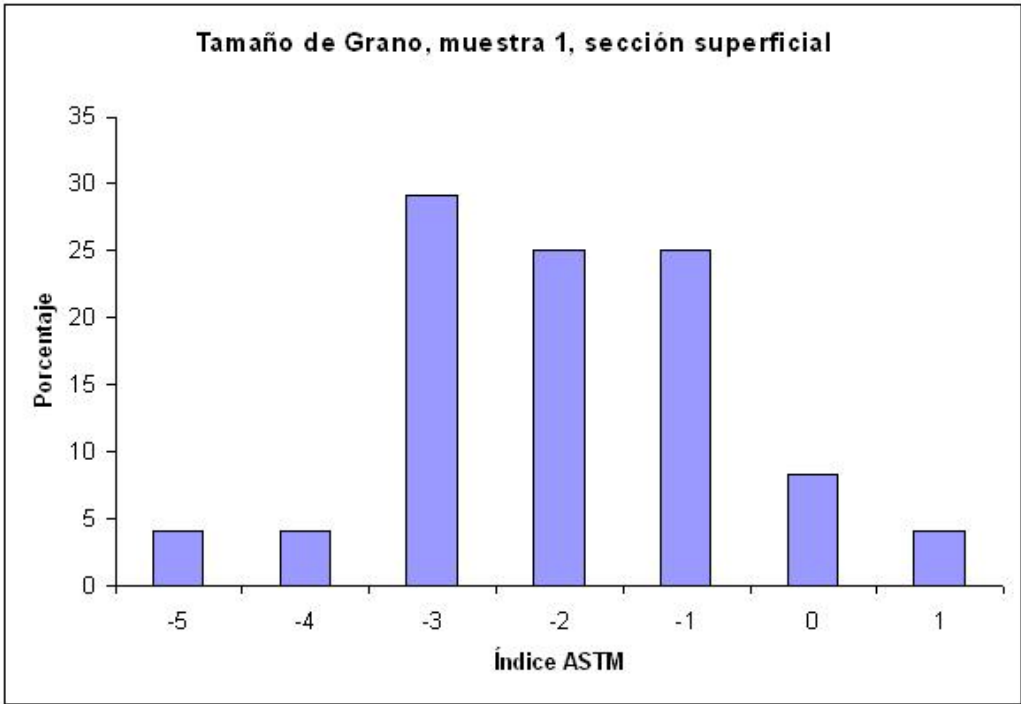
El ensayo metalográfico a realizar tiene como fin el analizar el tamaño de grano de la aleación 6063 T5. Las figuras y los gráficos presentados a continuación pertenecen a la primera producción. Sólo esta producción contiene gráficos que representan los distintos tamaños de grano encontrados. Por razones de tiempo, para las demás producciones sólo se presentan las fotografías de las metalografías realizadas y el tamaño de grano promedio calculado.

**Muestra 1, sección superficial**



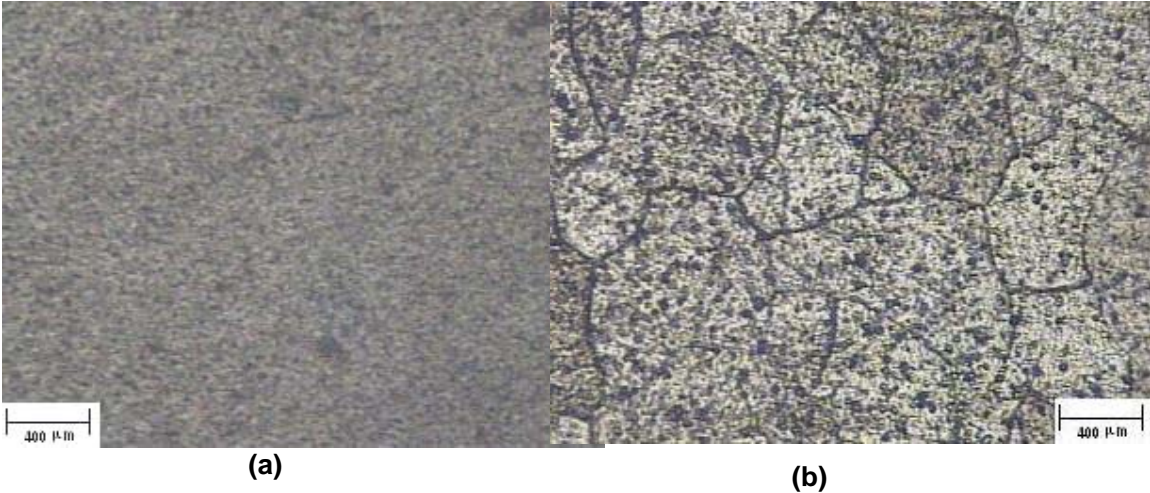
**Figura IV-1** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.



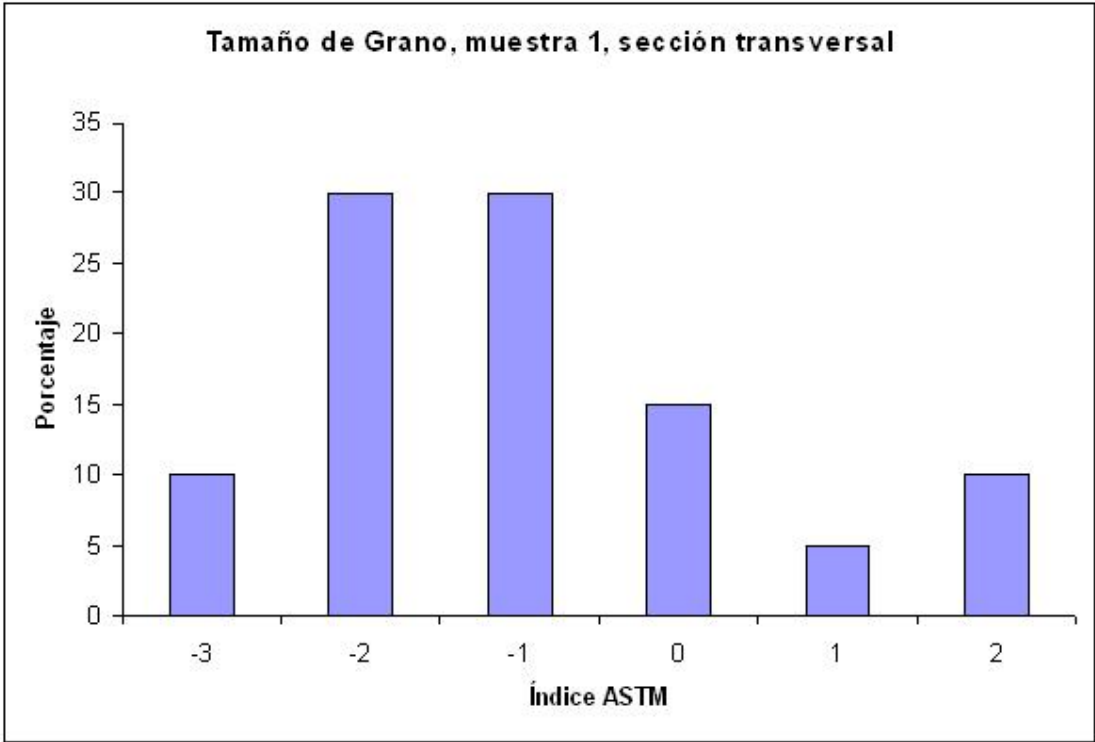
**Gráfico IV-1** Tamaño de grano de la muestra 1, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -2

**Muestra 1, sección transversal**



**Figura IV-2** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

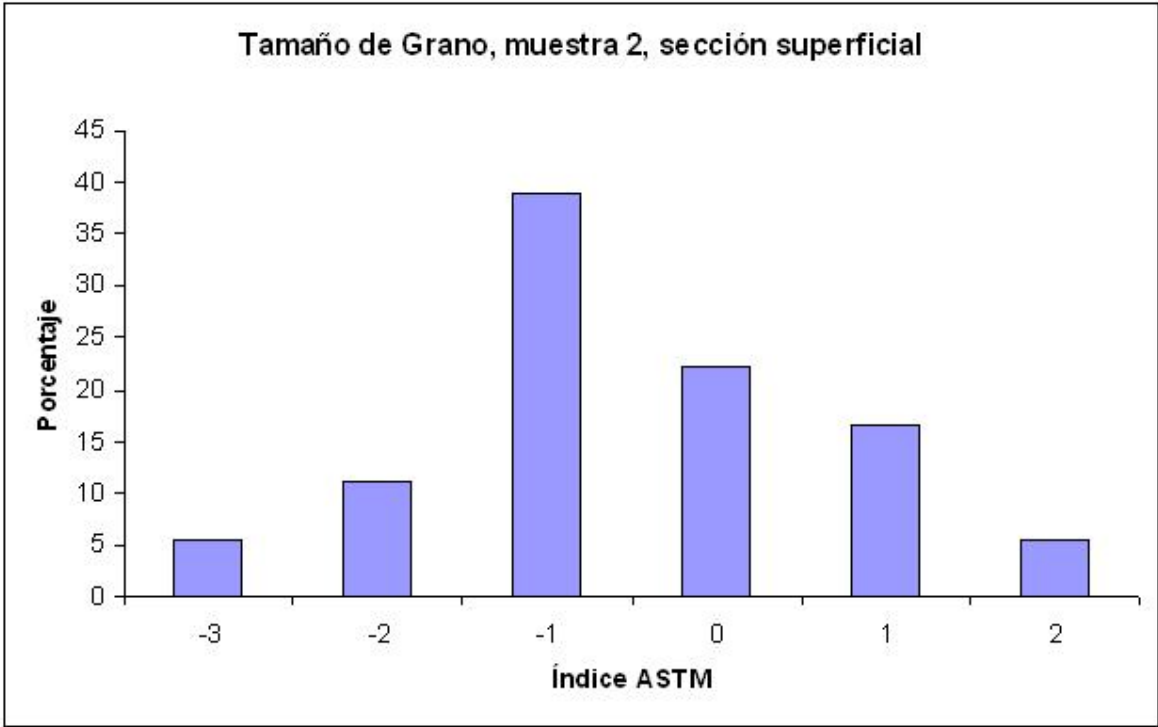


**Gráfico IV-2** Tamaño de grano de la muestra 1, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1

**Muestra 2, sección superficial**



**Figura IV-3** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

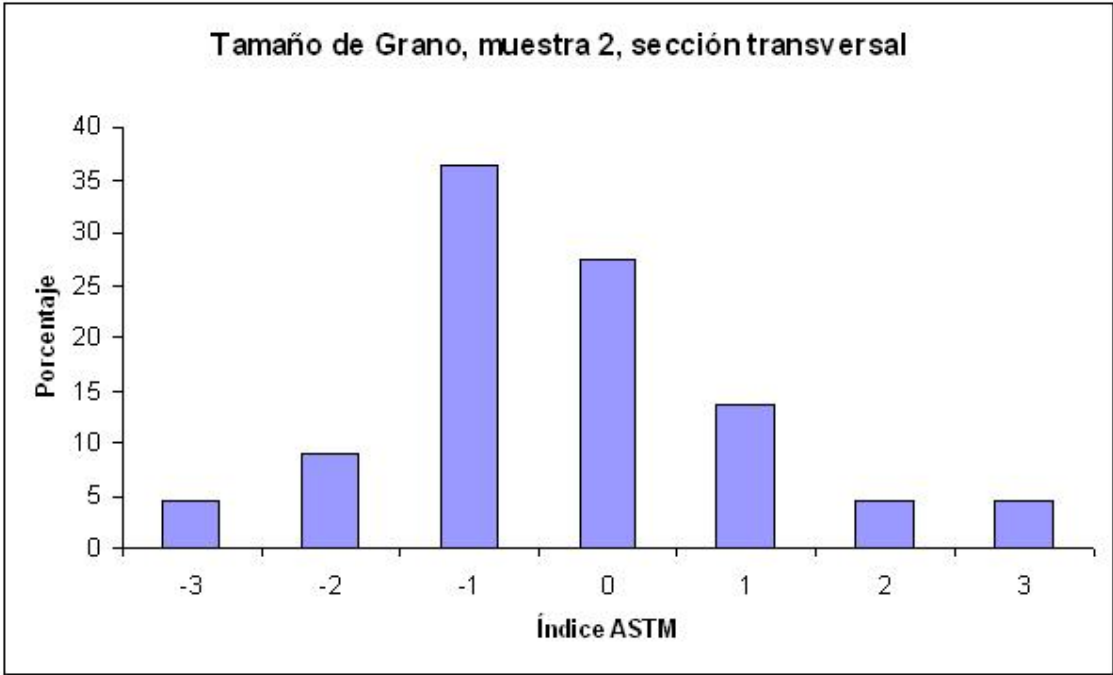


**Gráfico IV-3** Tamaño de grano de la muestra 2, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1

**Muestra 2, sección transversal**



**Figura IV-4** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

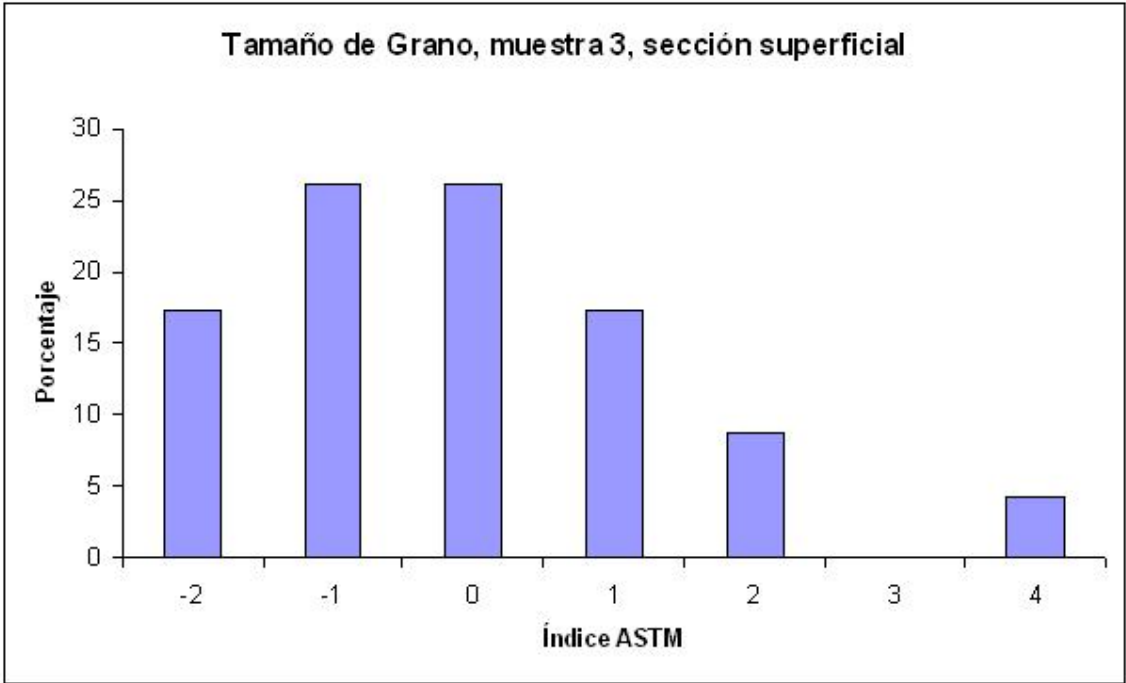


**Gráfico IV-4** Tamaño de grano de la muestra 2, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0

**Muestra 3, sección superficial**

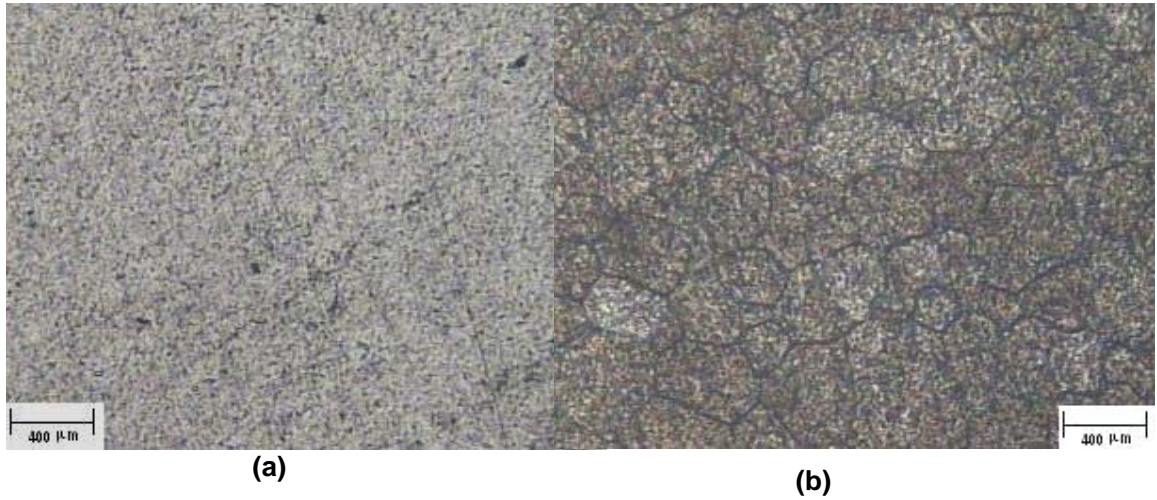


**Figura IV-5** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

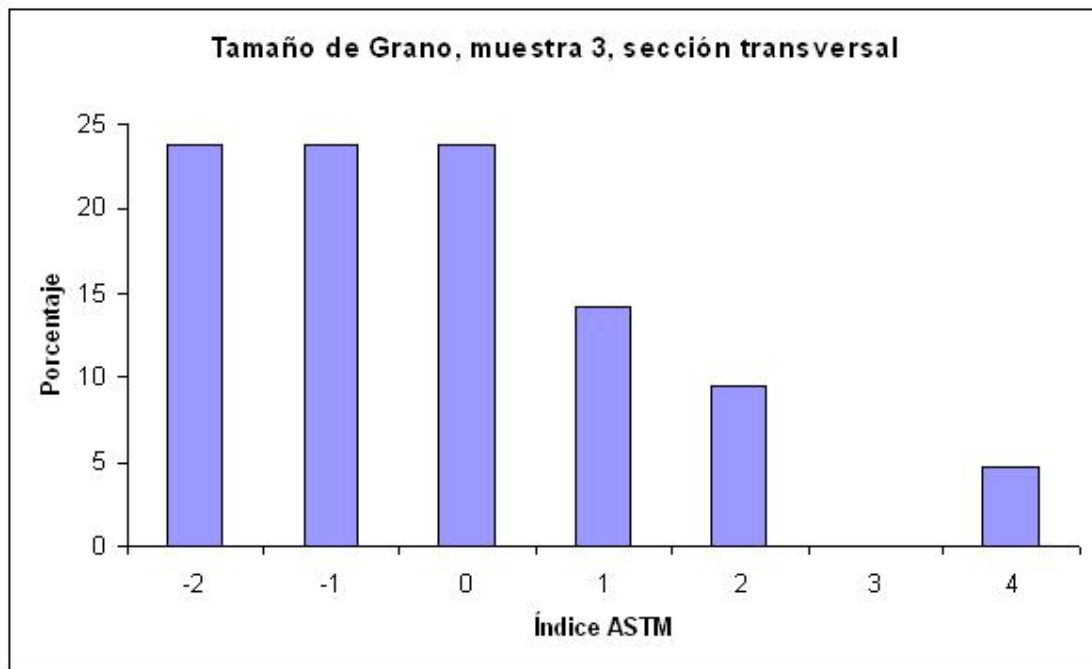


**Gráfico IV-5** Tamaño de grano de la muestra 3, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0

### Muestra 3, sección transversal



**Figura IV-6** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

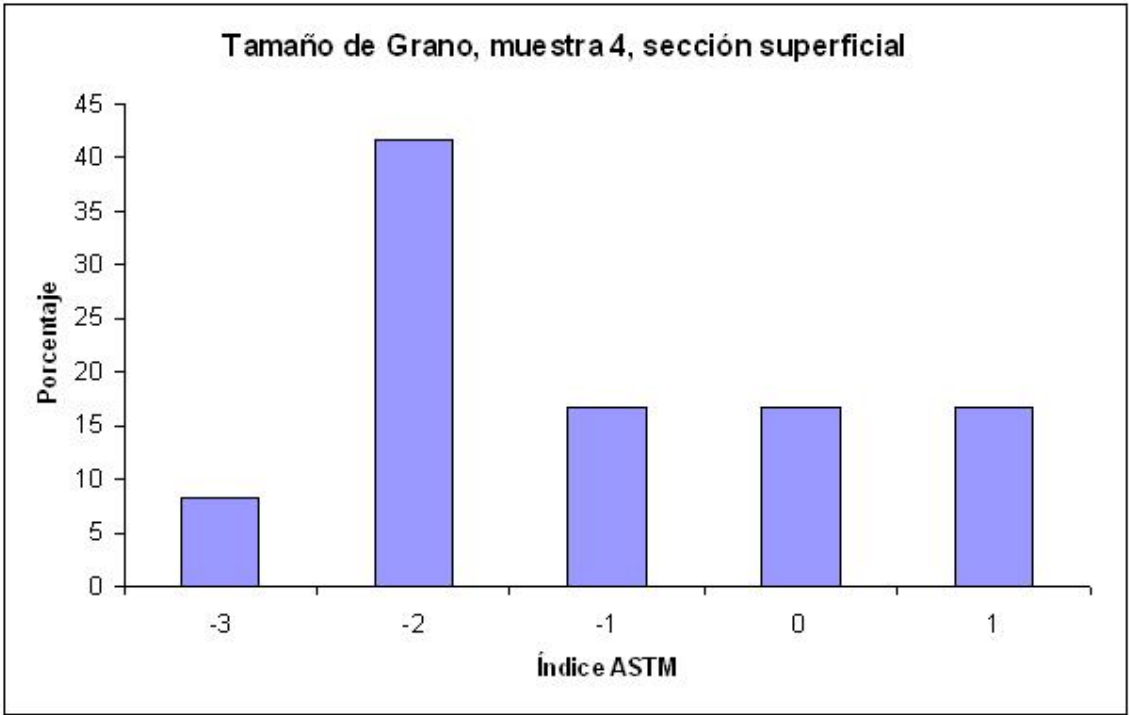


**Gráfico IV-6** Tamaño de grano de la muestra 3, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0

**Muestra 4, sección superficial**



**Figura IV-7** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.



**Gráfico IV-7** Tamaño de grano de la muestra 4, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. -1

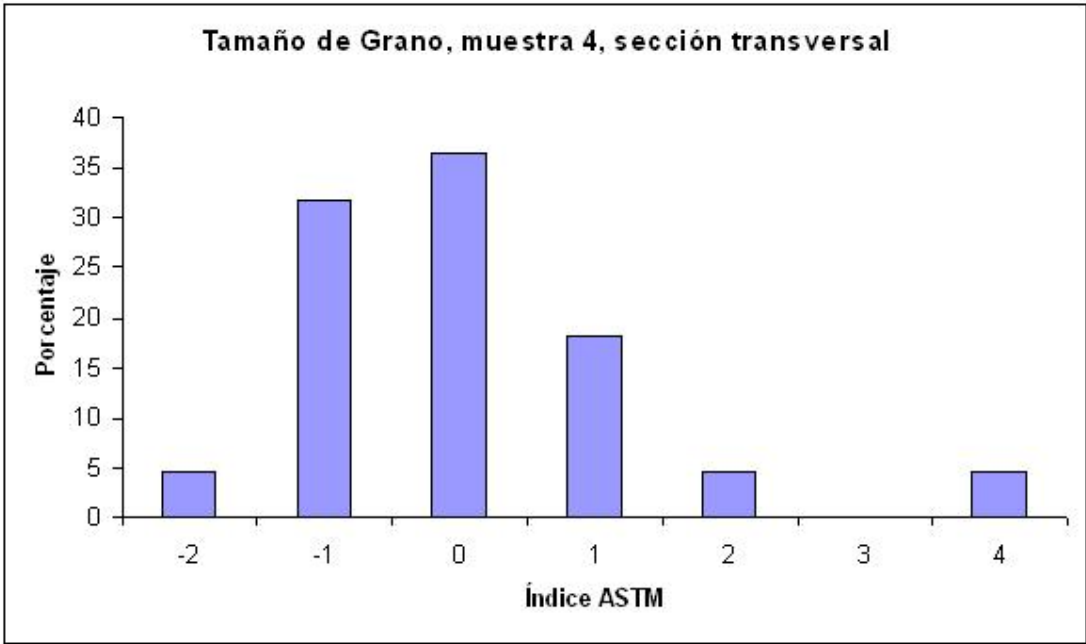


**Muestra 4, sección transversal**



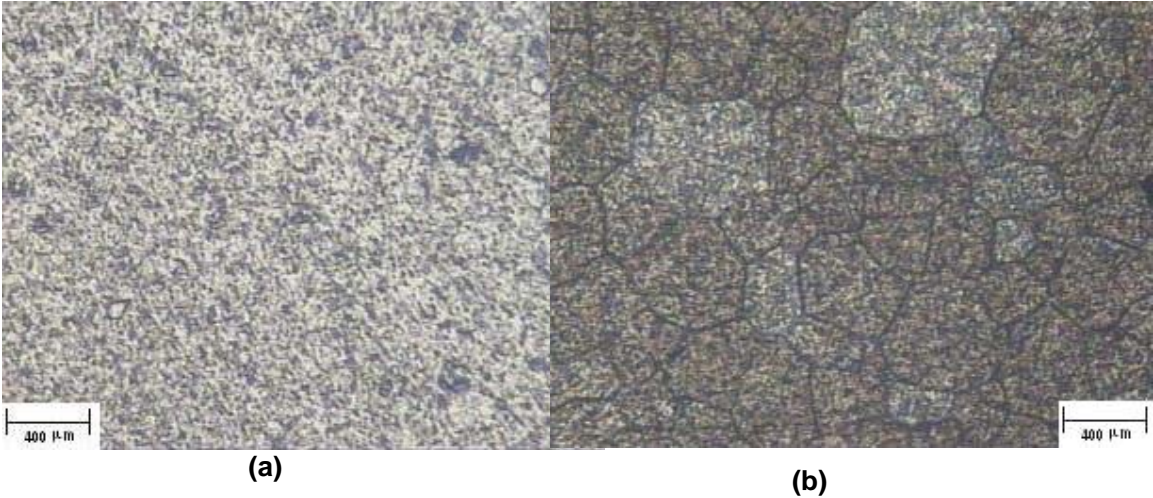
**Figura IV-8** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 504,44 °C (940 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

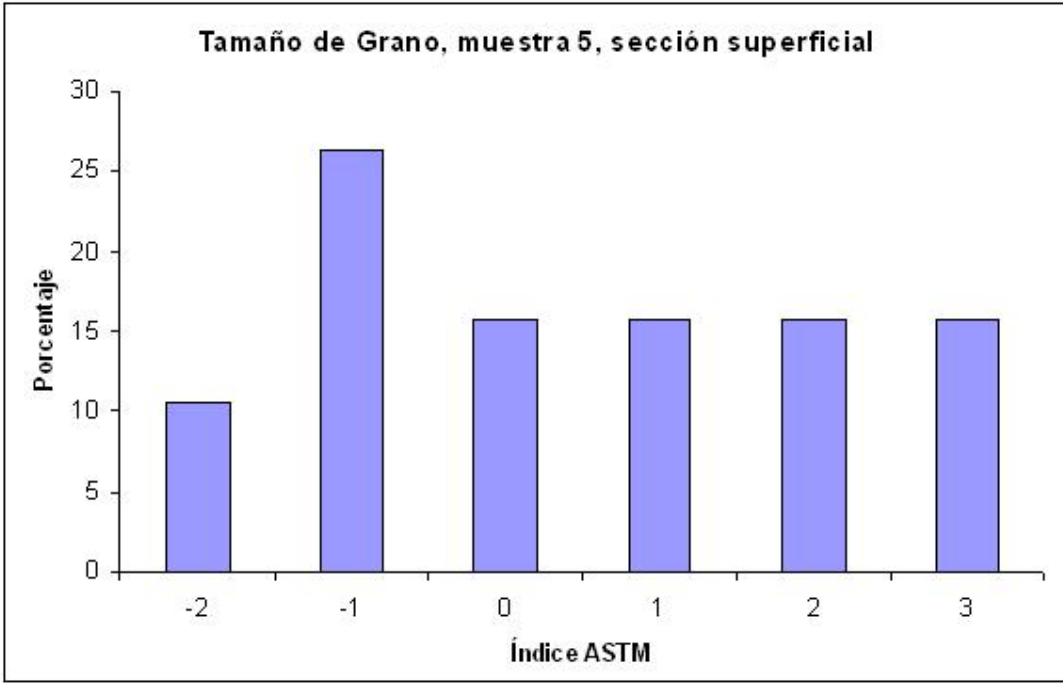


**Gráfico IV-8** Tamaño de grano de la muestra 4, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0

**Muestra 5, sección superficial**

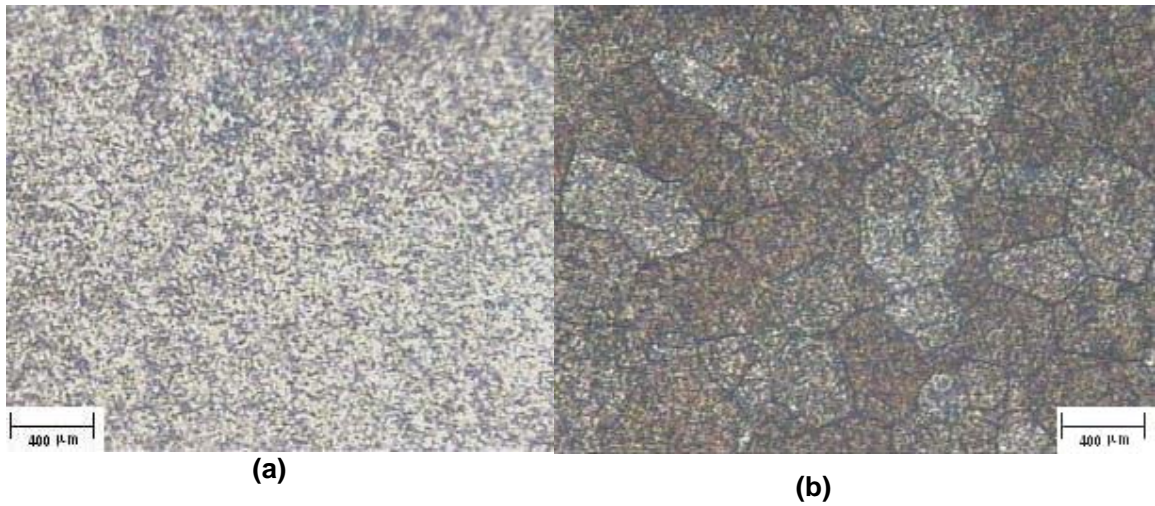


**Figura IV-9** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

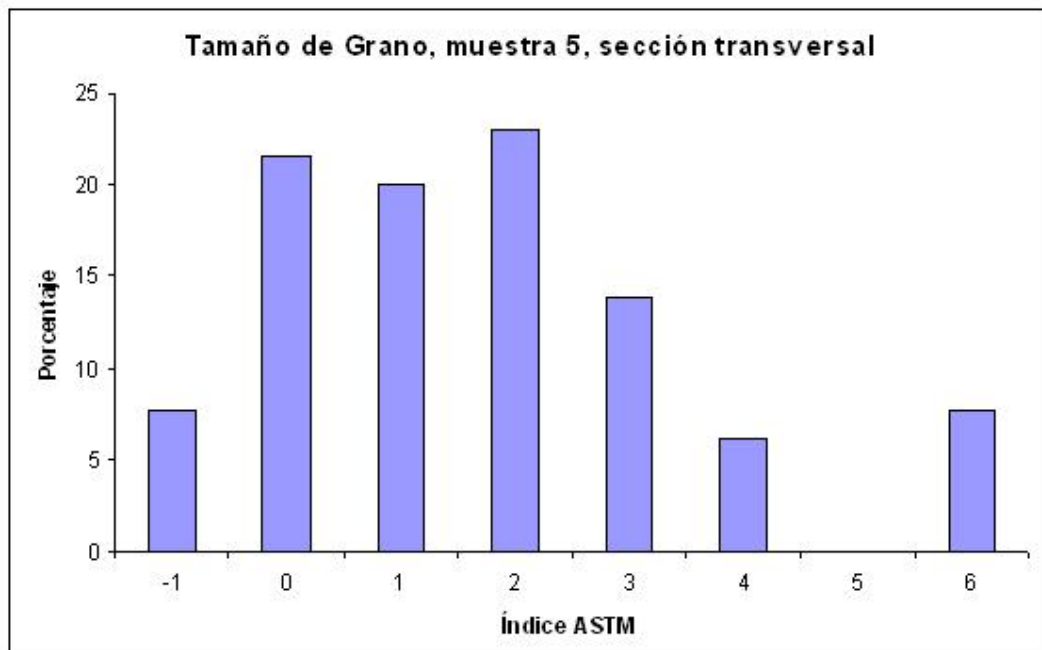


**Gráfico IV-9** Tamaño de grano de la muestra 5, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 0

### Muestra 5, sección transversal

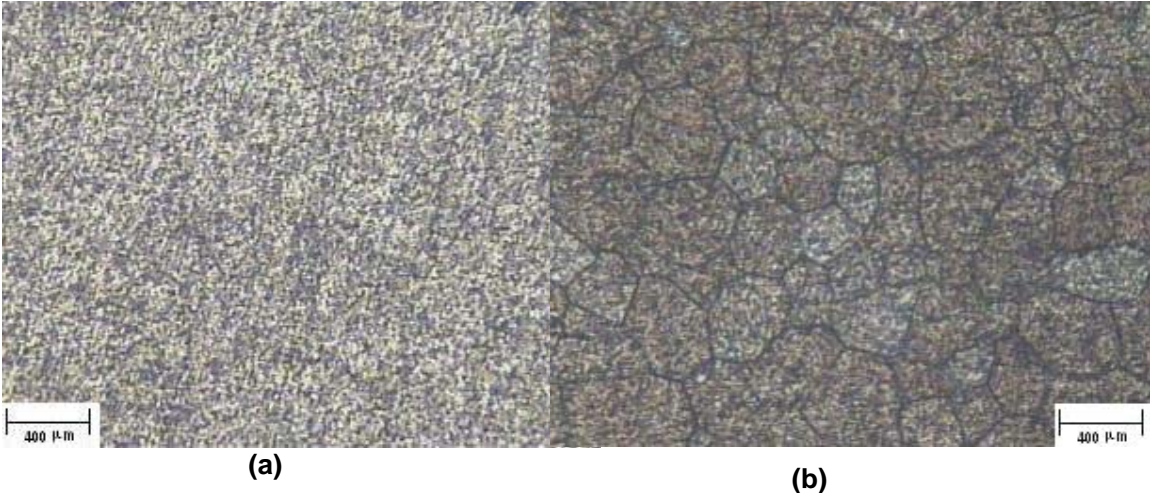


**Figura IV-10** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 549,44 °C (1021 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

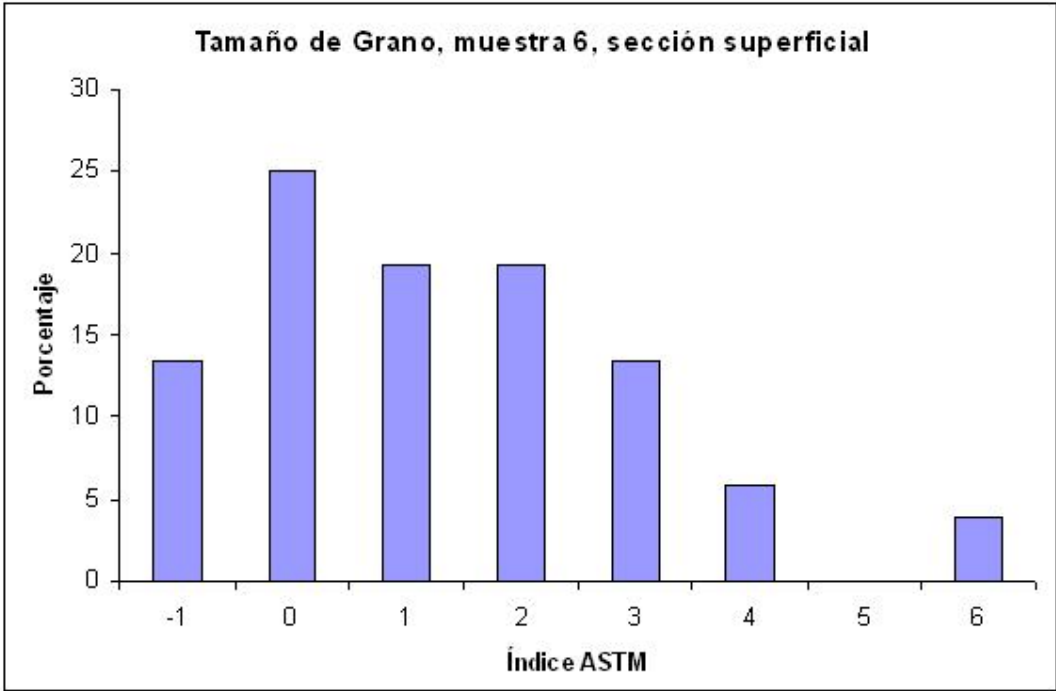


**Gráfico IV-10** Tamaño de grano de la muestra 5, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 2

**Muestra 6, sección superficial**

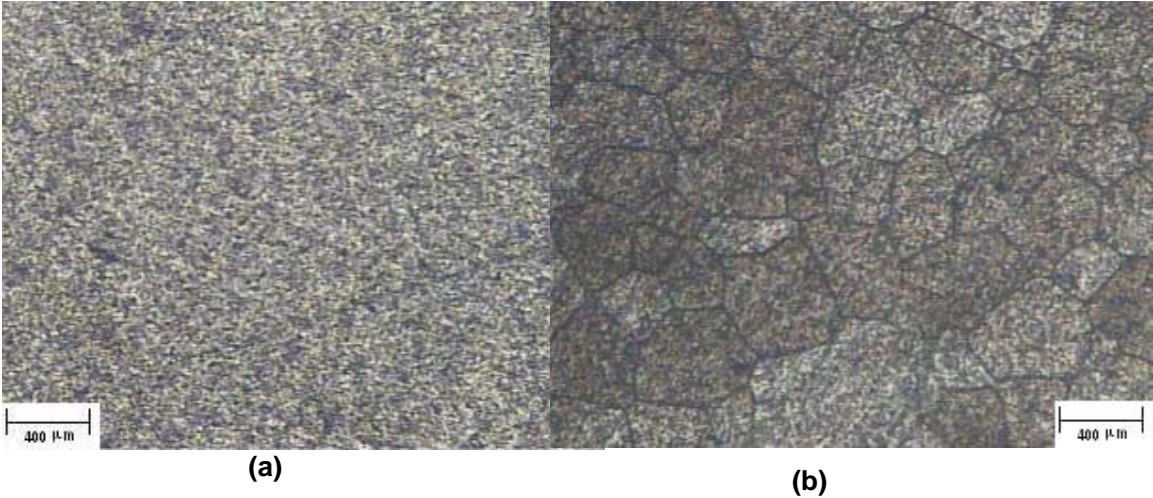


**Figura IV-11** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

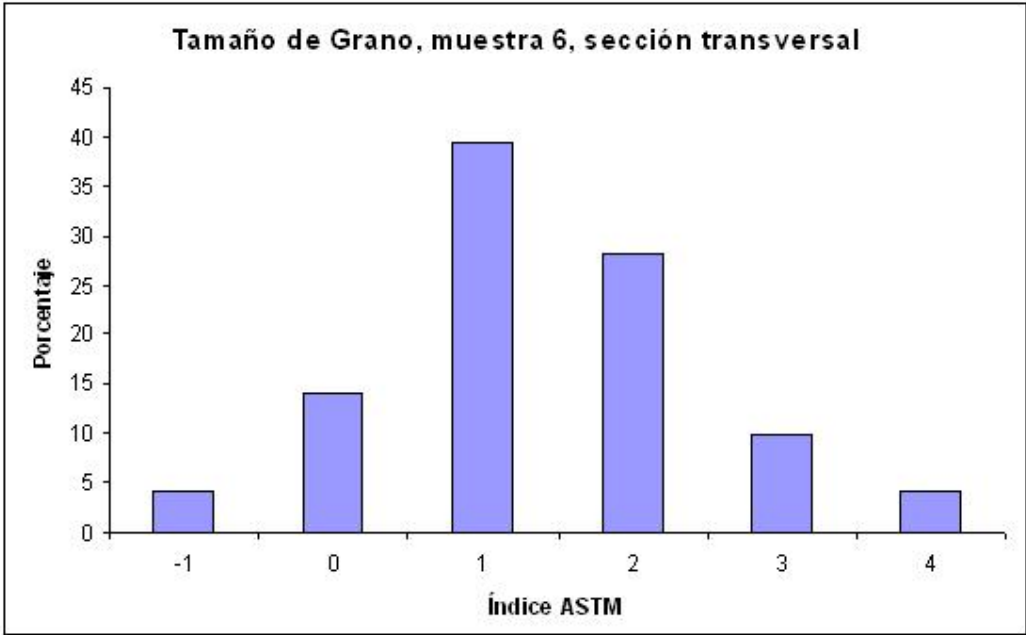


**Gráfico IV-11** Tamaño de grano de la muestra 6, sección superficial; tamaño de grano promedio: ASTM No. 1

**Muestra 6, sección transversal**



**Figura IV-12** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 571,11 °C (1060 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.



**Gráfico IV-12** Tamaño de grano de la muestra 6, sección transversal; tamaño de grano promedio: ASTM No. 2

### 3. Segunda producción: Parámetros de operación normales del grupo 02 del área de extrusión.

#### a. Variables del proceso de extrusión, segunda producción

**Tabla IV-5** Segunda producción. Toma de variables del proceso de extrusión.

Parámetros del tocho en el horno de precalentamiento			Parámetros del perfil 1029 extruído		
Zona de precalentamiento del tocho	Temperatura ajustada por parte del operario $T_{set}$ , °C (°F)	Temperatura real reportada al equipo $T_{real}$ , °C (°F)	Sección	Velocidad de extrusión $V_{ext}$ (m/min)	Temperatura de salida $T_{sal}$ , °C (°F)
1	432,22 (810)	435,56 (816)	Inicio	13	526,11 (979)
2	432,22 (810)	430,56 (807)	Medio	22	567,22 (1053)
3	432,22 (810)	365,56 (690)	Final	22	567,28 (1054)

**Tabla IV-6** Número de muestra de la segunda producción y su caracterización.

Muestra		
No.	Salida de la matriz	Sección del perfil
7	Superior	Inicio
8	Superior	Medio
9	Superior	Final
10	Inferior	Inicio
11	Inferior	Medio
12	Inferior	Final

**b. Resultados de la prueba de tensión, segunda producción**

**Tabla IV-7** Prueba de tensión realizada a la segunda producción

<b>Muestra</b>		<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	
<b>No.</b>	Medidas	Prom	
<b>7</b>	208,721	<b>209,975</b>	
	211,229		
<b>8</b>	186,537	<b>192,790</b>	
	199,042		
<b>9</b>	194,858	<b>196,516</b>	
	198,173		
<b>10</b>	193,244	<b>196,743</b>	
	200,243		
<b>11</b>	199,753	<b>206,184</b>	
	212,616		
<b>12</b>	209,495	<b>206,748</b>	
	204,001		

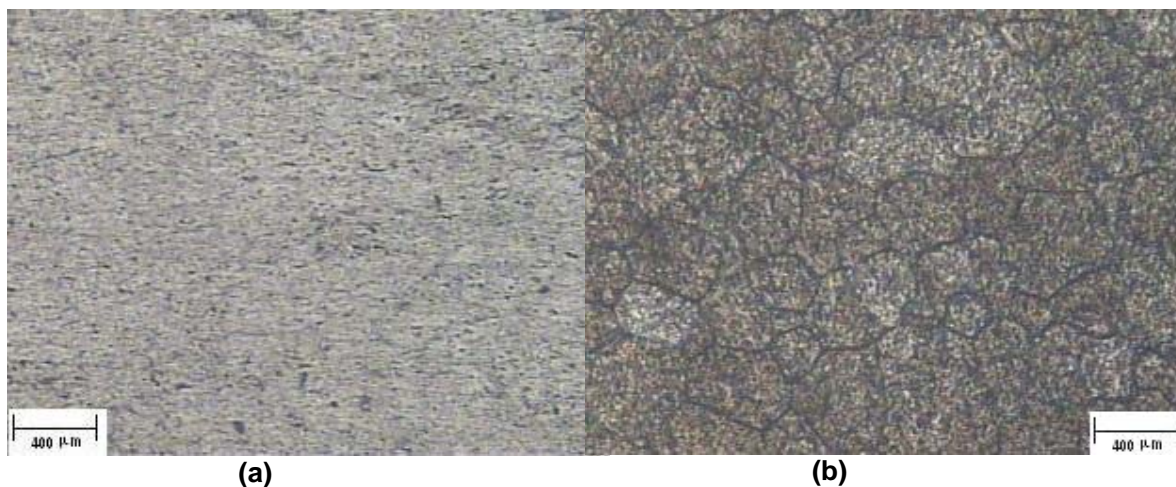
**c. Resultados de la prueba dureza, segunda producción**

**Tabla IV-8** Prueba de dureza realizada a las muestras de la segunda producción

<b>Muestra</b>	<b>Dureza Brinell (HBS)</b>
<b>No.</b>	Conversión desde la escala Rockwell superficial 15-T
<b>7</b>	<b>68,33</b>
<b>8</b>	<b>72,50</b>
<b>9</b>	<b>73,75</b>
<b>10</b>	<b>70,00</b>
<b>11</b>	<b>72,5</b>
<b>12</b>	<b>56,67</b>

#### d. Resultados metalográficos, segunda producción

##### Muestra 7, sección superficial



**Figura IV-13** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

##### Muestra 7, sección transversal

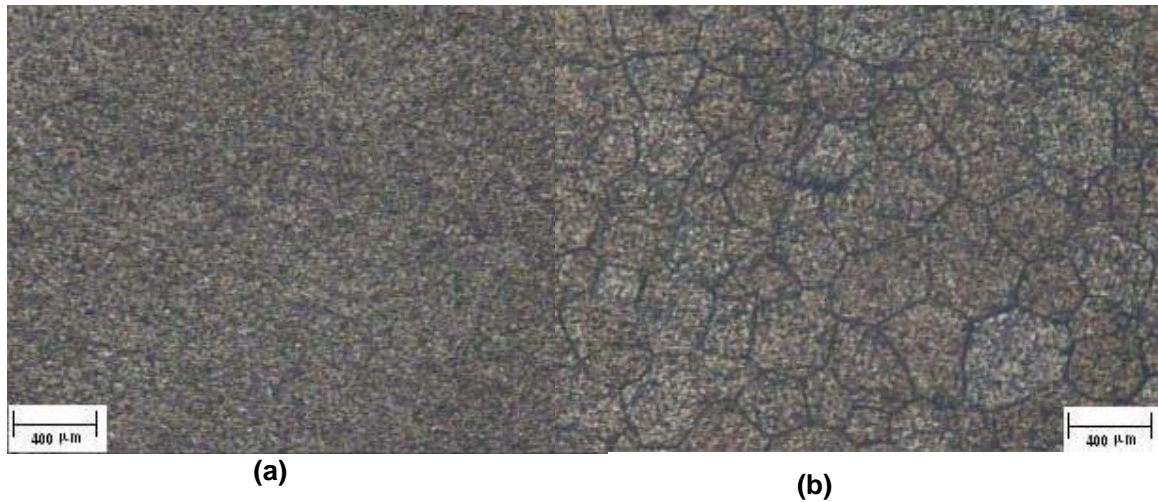


**Figura IV-14** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.



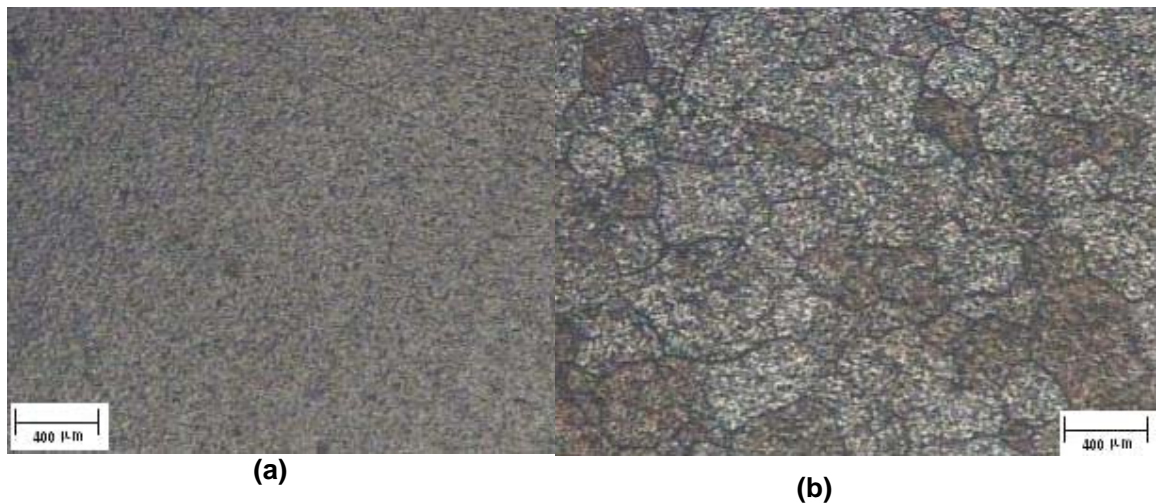
### Muestra 8, sección superficial



**Figura IV-15** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

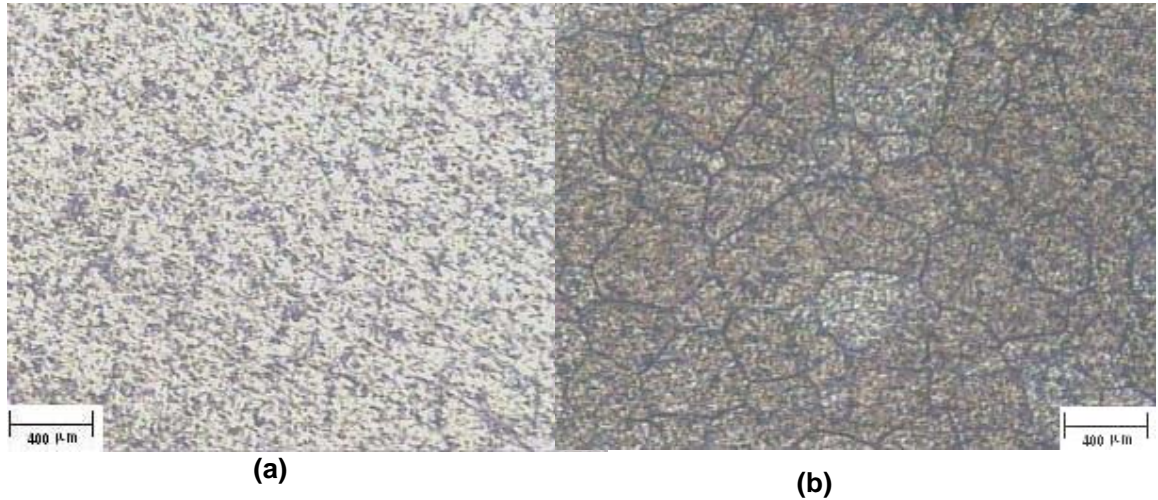
### Muestra 8, sección transversal



**Figura IV-16** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)

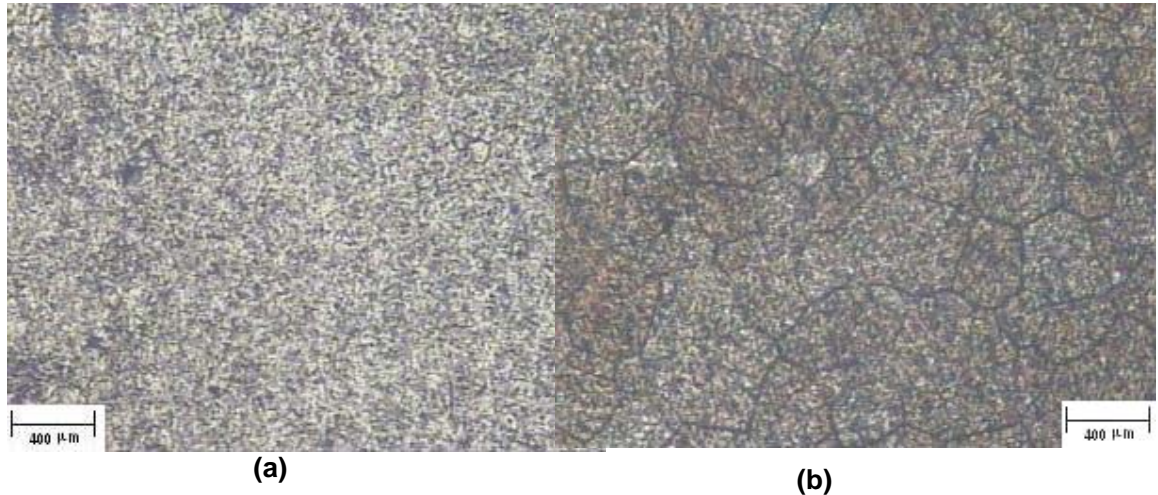
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 9, sección superficial**



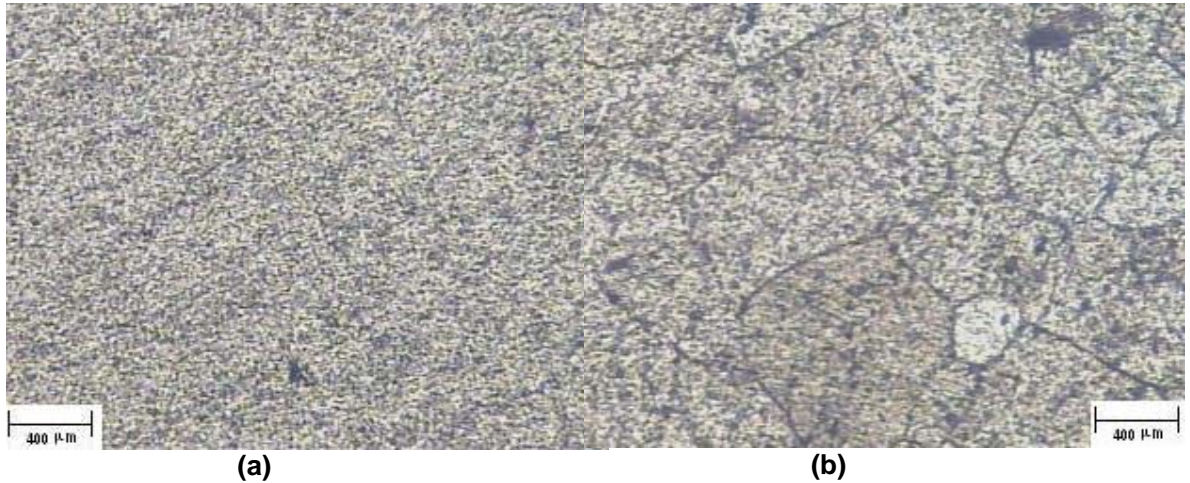
**Figura IV-17** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 9, sección transversal**



**Figura IV-18** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

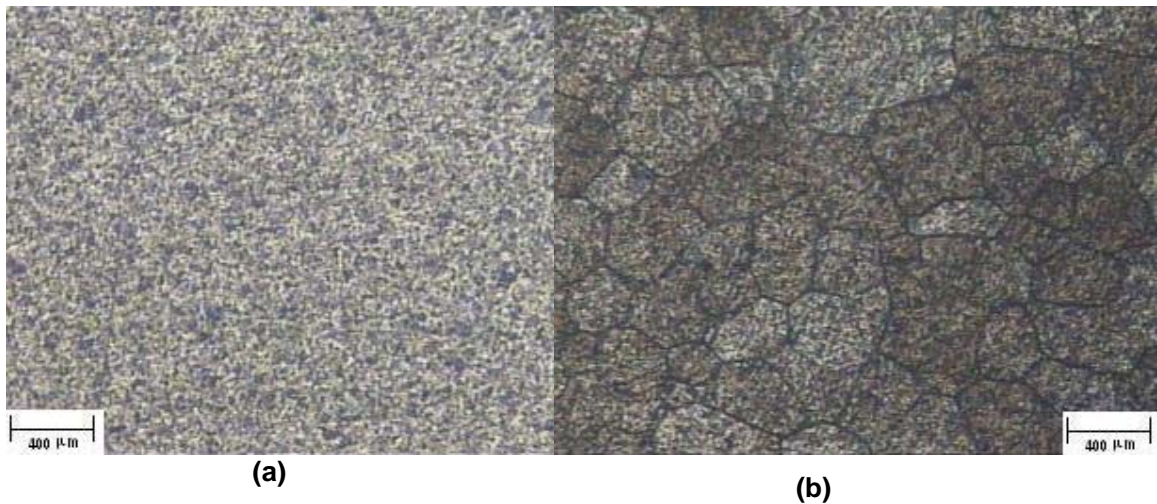
### Muestra 10, sección superficial



**Figura IV-19** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 10, sección transversal



**Figura IV-20** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

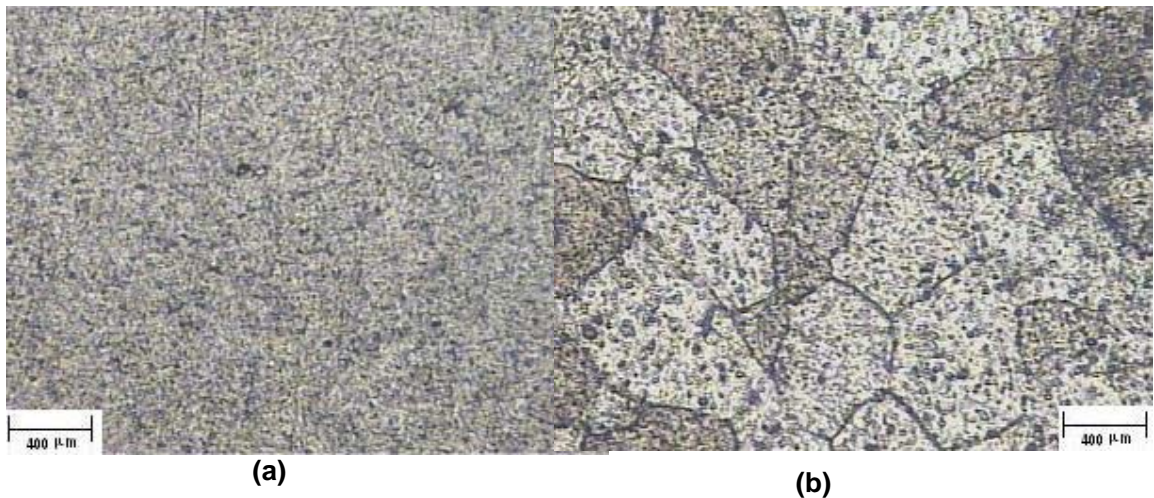
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 11, sección superficial



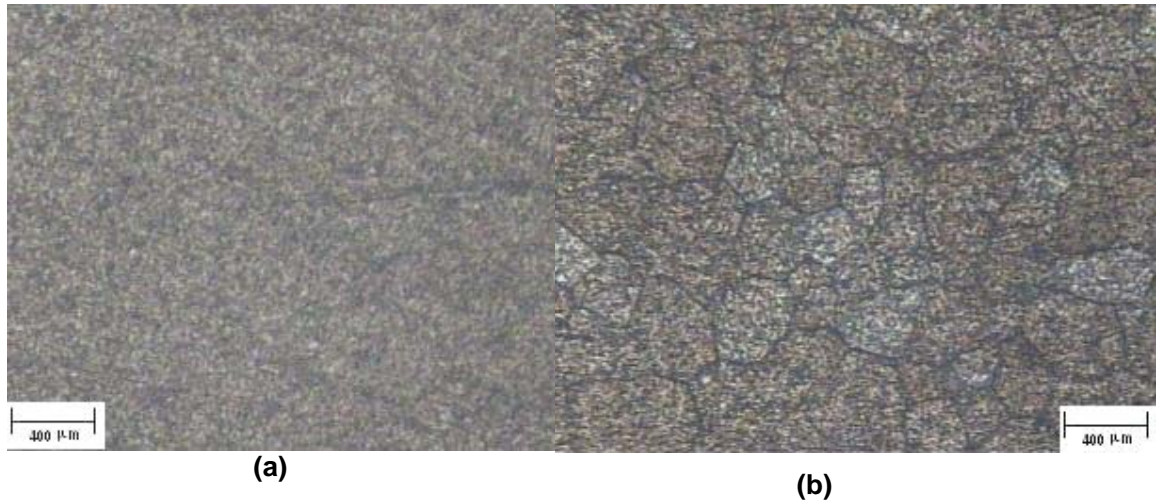
**Figura IV-21** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. **Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2.** Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 11, sección transversal



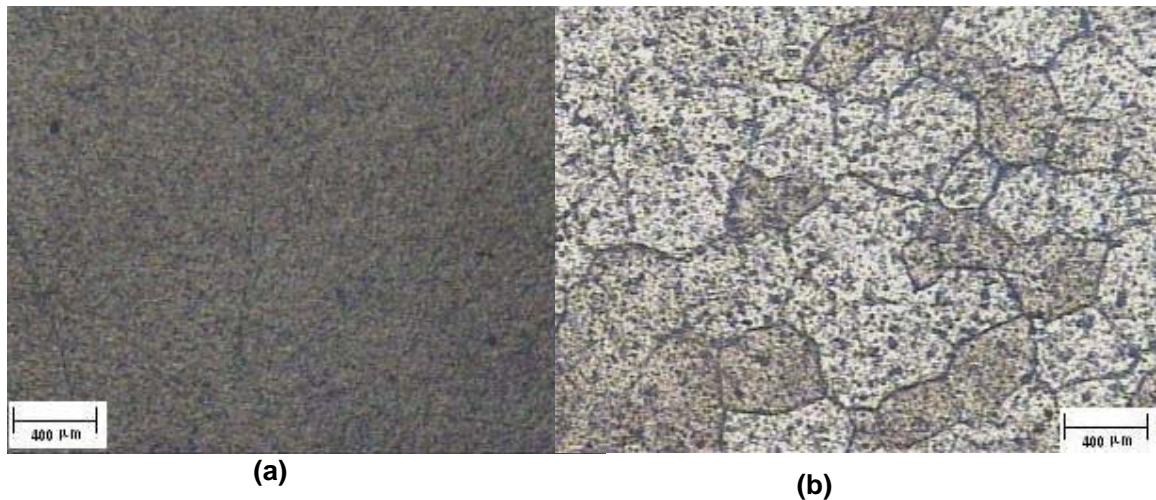
**Figura IV-22** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,22 °C (1053 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. **Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -3.** Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 12, sección superficial



**Figura IV-23** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. **Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0.** Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 12, sección transversal



**Figura IV-24** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,28 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. **Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2.** Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

**4. Tercera producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 alta.**

**a. Variables del proceso de extrusión, tercera producción**

**Tabla IV-9** Tercera producción. Toma de variables del proceso de extrusión.

Parámetros del tocho en el horno de precalentamiento			Parámetros del perfil 1029 extruido		
Zona de precalentamiento del tocho	Temperatura ajustada por parte del operario $T_{set}$ , °C (°F)	Temperatura real reportada al equipo $T_{real}$ , °C (°F)	Sección	Velocidad de extrusión $v_{ext}$ (m/min)	Temperatura de salida $T_{sal}$ , °C (°F)
1	404,44 (760)	429,44 (805)	Inicio	20	548,89 (1020)
2	410,00 (770)	427,78 (802)	Medio	35	567,78 (1054)
3	410,00 (770)	428,89 (804)	Final	33	568,89 (1056)

**Tabla IV-10** Número de muestra de la tercera producción y su caracterización.

Muestra		
No.	Salida de la matriz	Sección del perfil
13	Superior	Inicio
14	Superior	Medio
15	Superior	Final
16	Inferior	Inicio
17	Inferior	Medio
18	Inferior	Final

**b. Resultados de la prueba de tensión, tercera producción**

**Tabla IV-11** Prueba de tensión realizada a la tercera producción

<b>Muestra</b>		<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	
<b>No.</b>	Medidas	Prom	
<b>13</b>	227,873	<b>225,273</b>	
	222,673		
<b>14</b>	224,564	<b>223,512</b>	
	222,459		
<b>15</b>	229,430	<b>229,709</b>	
	229,987		
<b>16</b>	226,839	<b>226,572</b>	
	226,304		
<b>17</b>	220,321	<b>225,580</b>	
	230,839		
<b>18</b>	220,384	<b>224,365</b>	
	228,345		

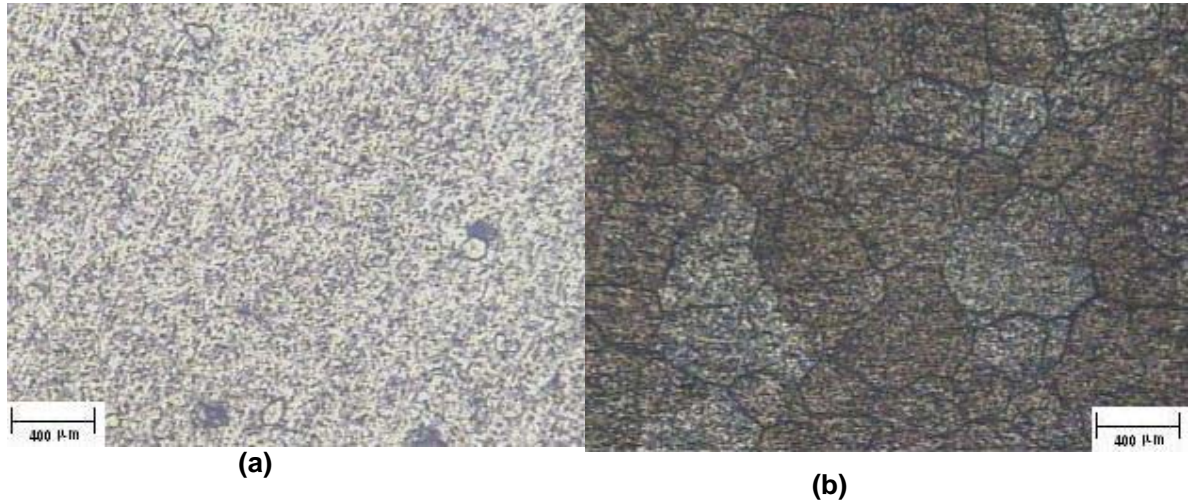
**c. Resultados de la prueba dureza, tercera producción**

**Tabla IV-12** Prueba de dureza realizada a las muestras de la tercera producción

<b>Muestra</b>	<b>Dureza Brinell (HBS)</b>
<b>No.</b>	Conversión desde la escala Rockwell superficial 15-T
<b>13</b>	<b>68,50</b>
<b>14</b>	<b>70,02</b>
<b>15</b>	<b>60,30</b>
<b>16</b>	<b>60,00</b>
<b>17</b>	<b>63,50</b>
<b>18</b>	<b>71,20</b>

#### d. Resultados metalográficos, tercera producción

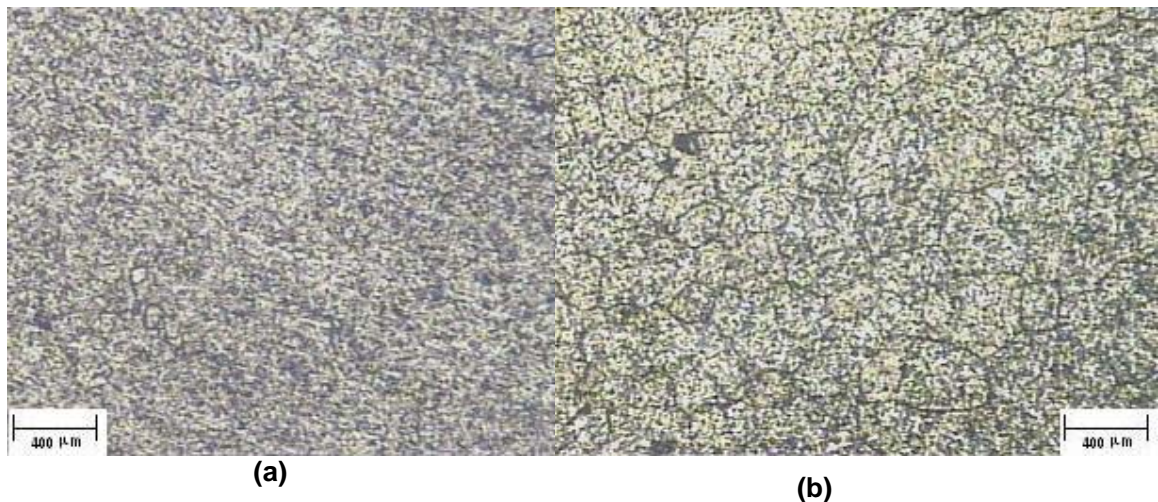
##### Muestra 13, sección superficial



**Figura IV-25** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

##### Muestra 13, sección transversal

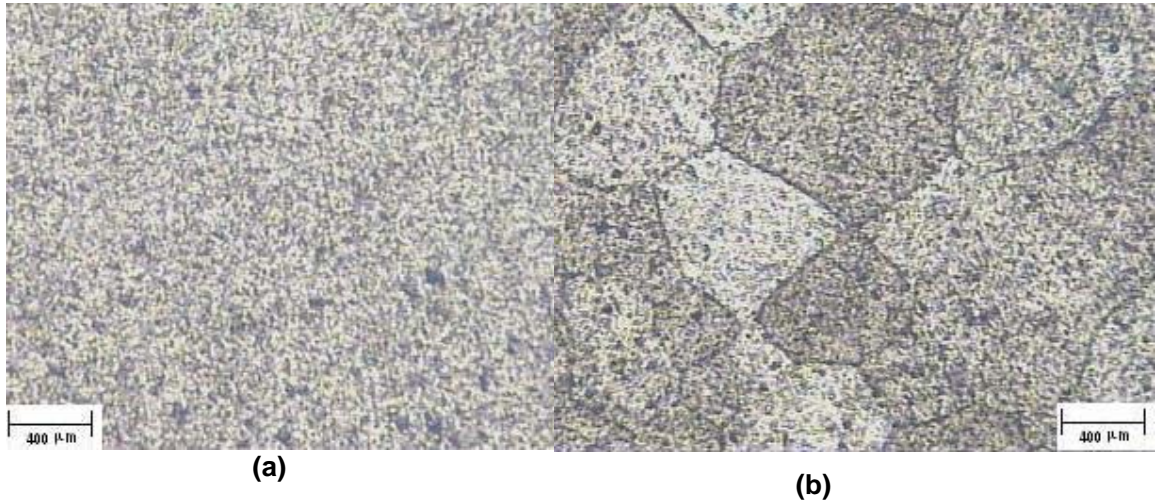


**Figura IV-26** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

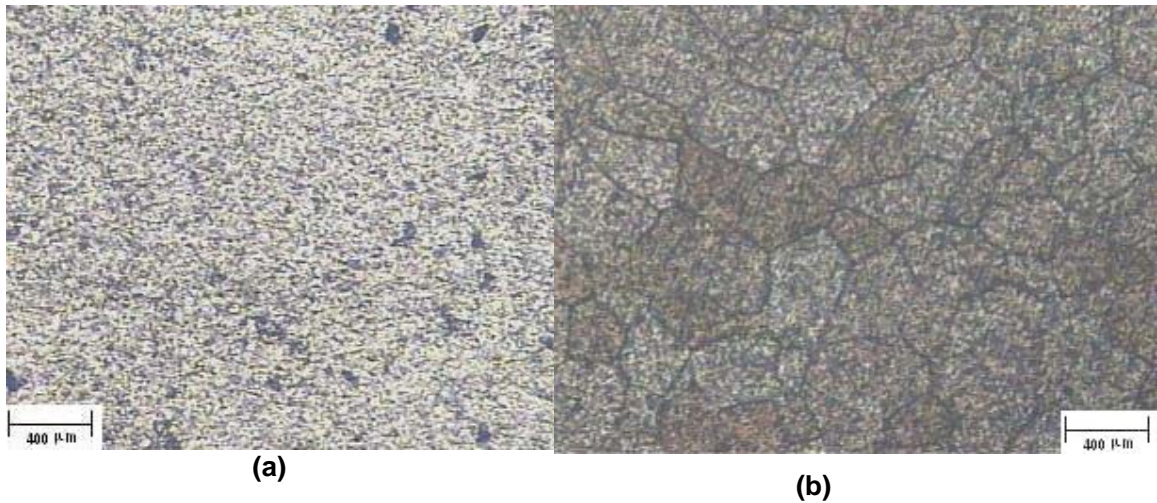


### **Muestra 14, sección superficial**



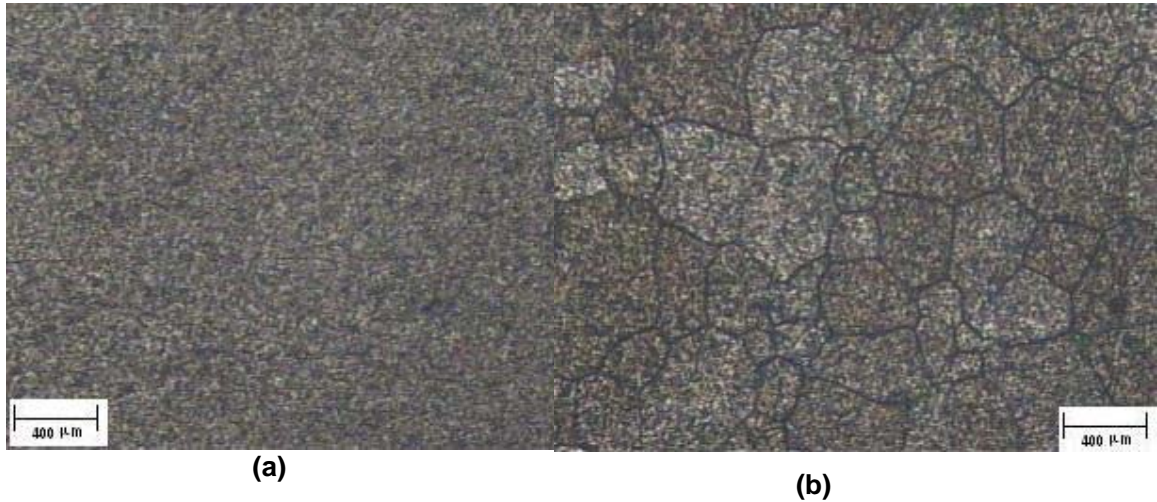
**Figura IV-27** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 14, sección transversal**



**Figura IV-28** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -3. Magnitud original: 200x.

### Muestra 15, sección superficial



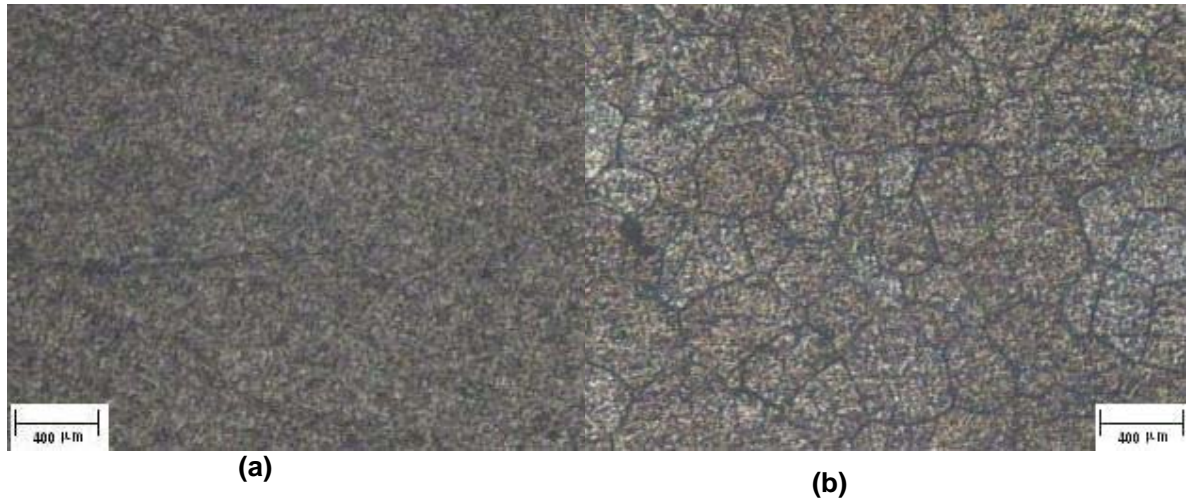
**Figura IV-29** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 15, sección transversal



**Figura IV-30** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 16, sección superficial



**Figura IV-31** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 16, sección transversal



**Figura IV-32** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 548,89 °C (1020 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

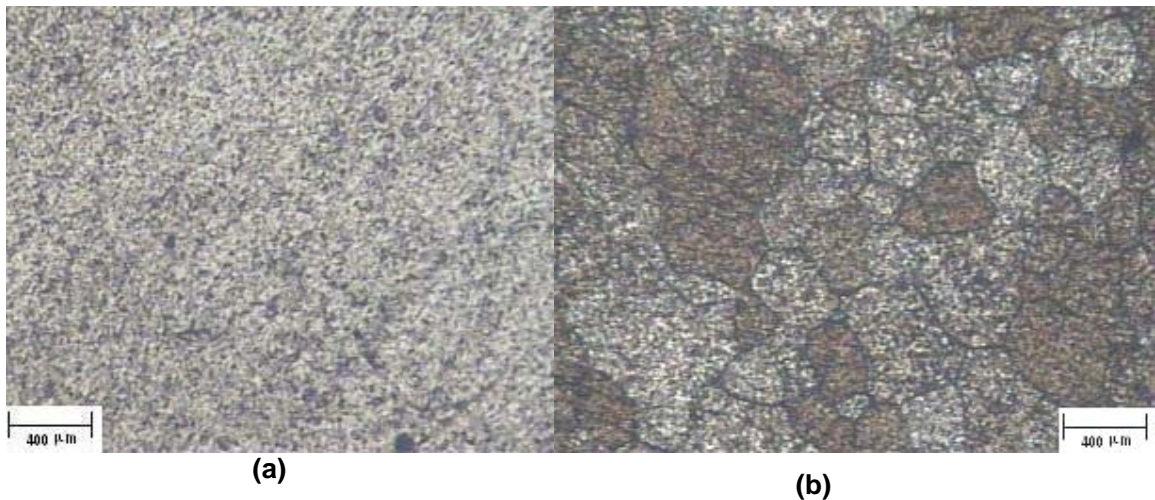
### **Muestra 17, sección superficial**



**Figura IV-33** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -3. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

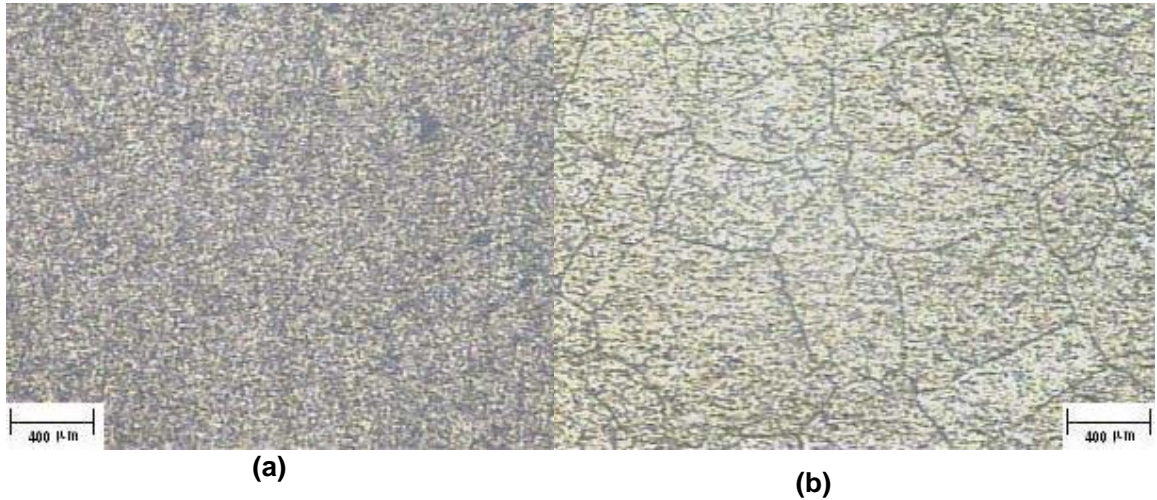
### **Muestra 17, sección transversal**



**Figura IV-34** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 567,78 °C (1054 °F)

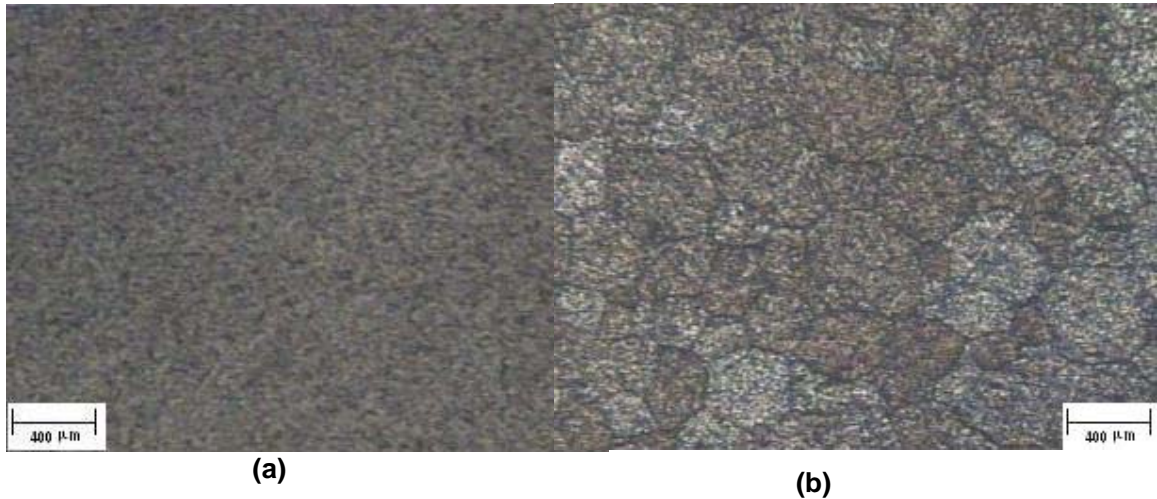
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 18, sección superficial



**Figura IV-35** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 18, sección transversal



**Figura IV-36** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 568,89 °C (1056 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

**5. Cuarta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho altas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.**

**a. Variables del proceso de extrusión, cuarta producción**

**Tabla IV-13** Cuarta producción. Toma de variables del proceso de extrusión.

Parámetros del tocho en el horno de precalentamiento			Parámetros del perfil 1029 extruido		
Zona de precalentamiento del tocho	Temperatura ajustada por parte del operario $T_{set}$ , °C (°F)	Temperatura real reportada al equipo $T_{real}$ , °C (°F)	Sección	Velocidad de extrusión $V_{ext}$ (m/min)	Temperatura de salida $T_{sal}$ , °C (°F)
1	460 (860)	444,44 (832)	Inicio	3	511,67 (953)
2	460 (860)	466,67 (872)	Medio	6	530,56 (987)
3	454,44 (850)	430 (806)	Final	6	533,89 (993)

**Tabla IV-14** Número de muestra de la cuarta producción y su caracterización.

Muestra		
No.	Salida de la matriz	Sección del perfil
19	Superior	Inicio
20	Superior	Medio
21	Superior	Final
22	Inferior	Inicio
23	Inferior	Medio
24	Inferior	Final

**b. Resultados de la prueba de tensión, cuarta producción**

**Tabla IV-15** Prueba de tensión realizada a la cuarta producción

<b>Muestra</b>		<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	
<b>No.</b>	Medidas	Prom	
19	227,938	<b>228,515</b>	
	229,092		
20	229,398	<b>224,896</b>	
	220,394		
21	225,594	<b>224,444</b>	
	223,293		
22	226,403	<b>226,948</b>	
	227,493		
23	224,932	<b>223,661</b>	
	222,390		
24	228,485	<b>225,710</b>	
	222,934		

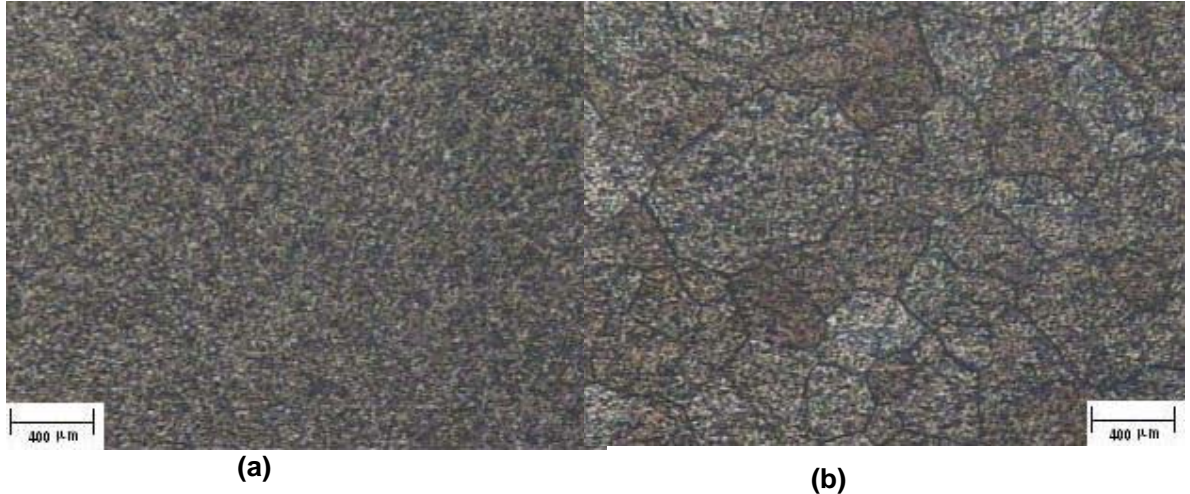
**c. Resultados de la prueba dureza, cuarta producción**

**Tabla IV-16** Prueba de dureza realizada a las muestras de la cuarta producción

<b>Muestra</b>	<b>Dureza Brinell (HBS)</b>
<b>No.</b>	Conversión desde la escala Rockwell superficial 15-T
<b>19</b>	<b>60,50</b>
<b>20</b>	<b>72,75</b>
<b>21</b>	<b>67,33</b>
<b>22</b>	<b>63,00</b>
<b>23</b>	<b>62,50</b>
<b>24</b>	<b>61,30</b>

#### d. Resultados metalográficos, cuarta producción

##### Muestra 19, sección superficial



**Figura IV-37** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

##### Muestra 19, sección transversal

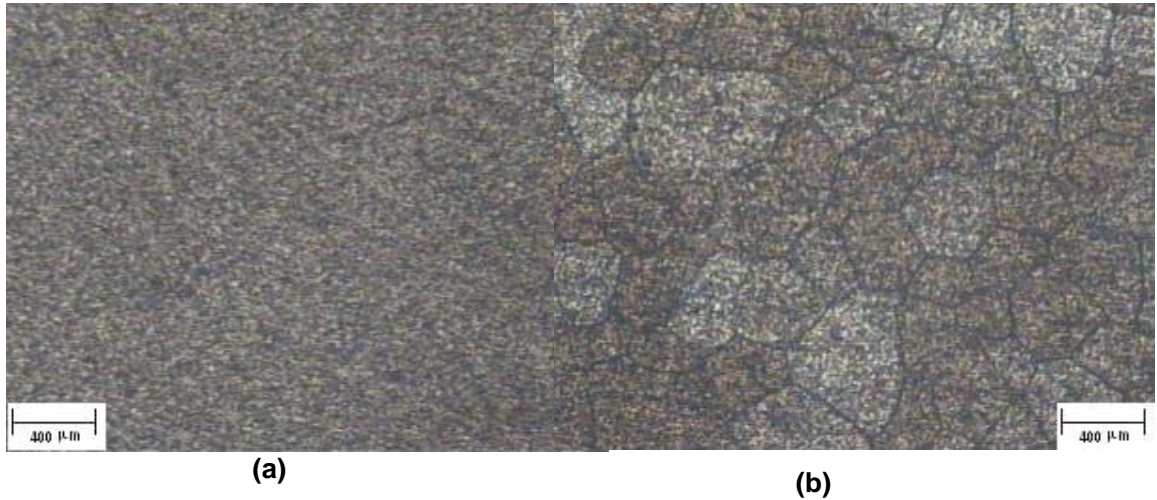


**Figura IV-38** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

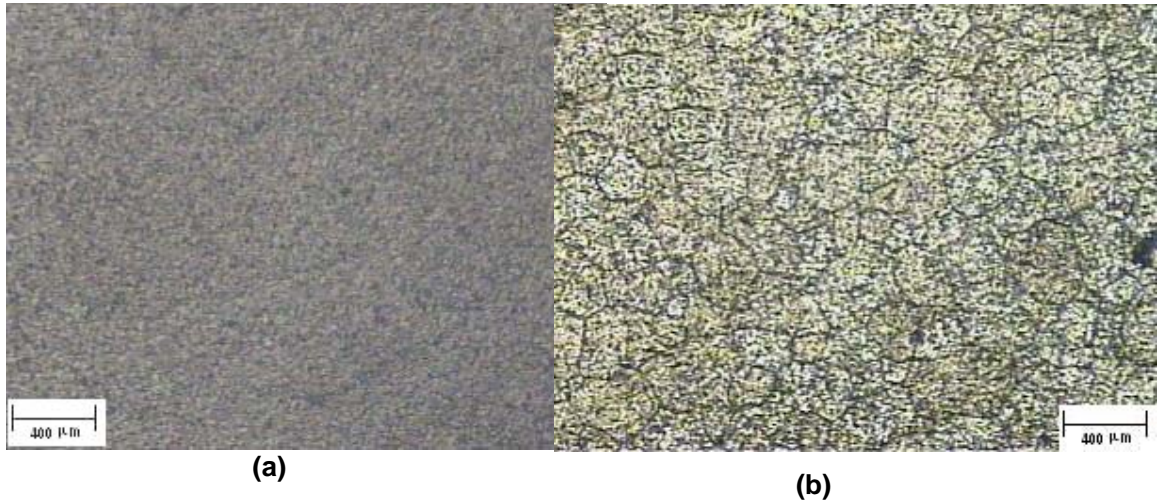


### Muestra 20, sección superficial



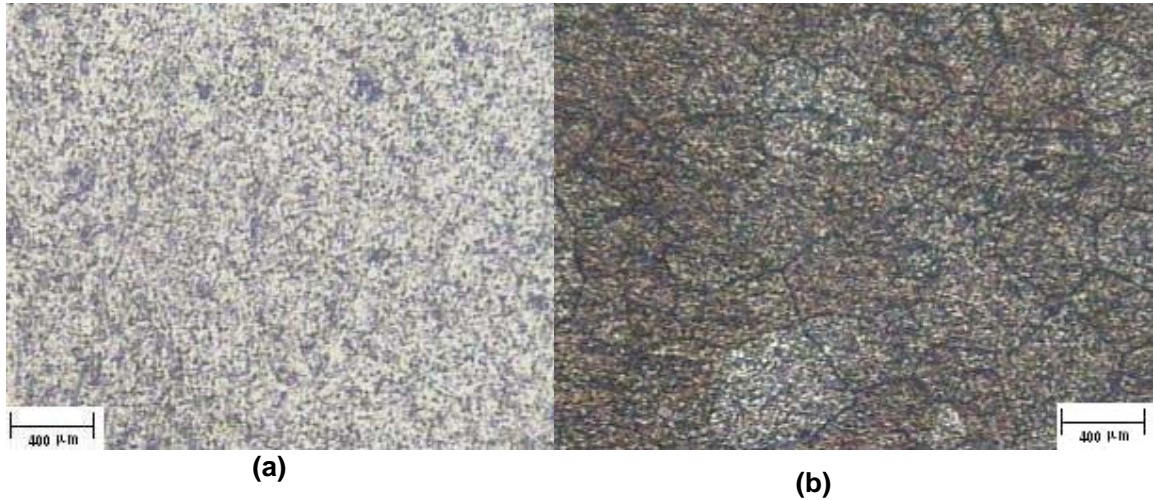
**Figura IV-39** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 20, sección transversal



**Figura IV-40** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

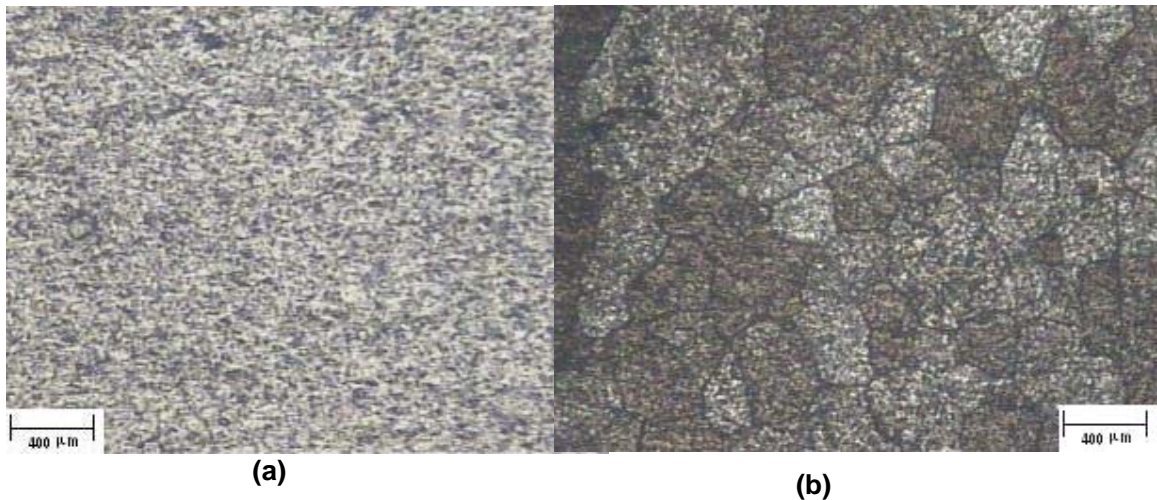
### **Muestra 21, sección superficial**



**Figura IV-41** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

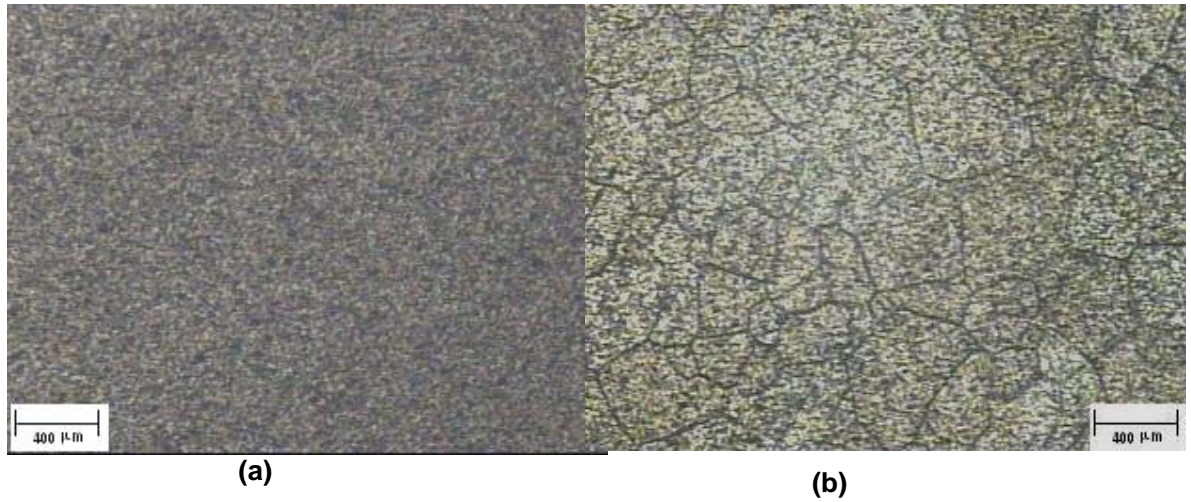
### **Muestra 21, sección transversal**



**Figura IV-42** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

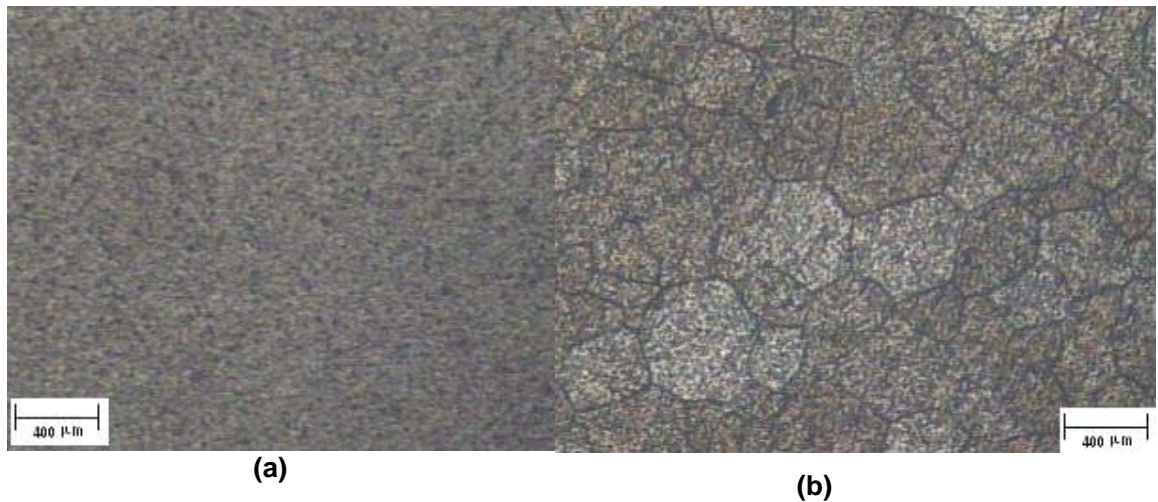
### **Muestra 22, sección superficial**



**Figura IV-43** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

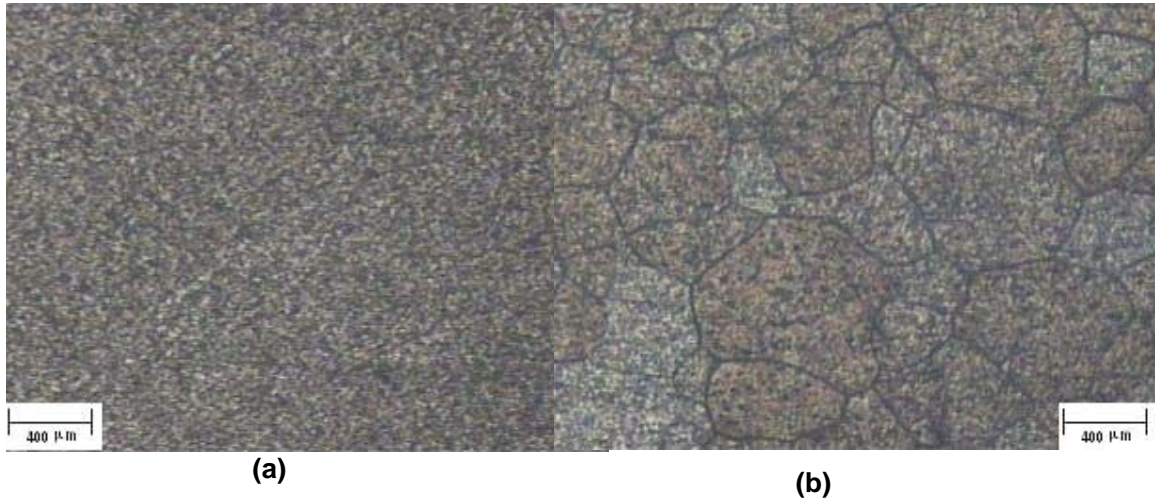
### **Muestra 22, sección transversal**



**Figura IV-44** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 511,67 °C (953 °F).

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 23, sección superficial**



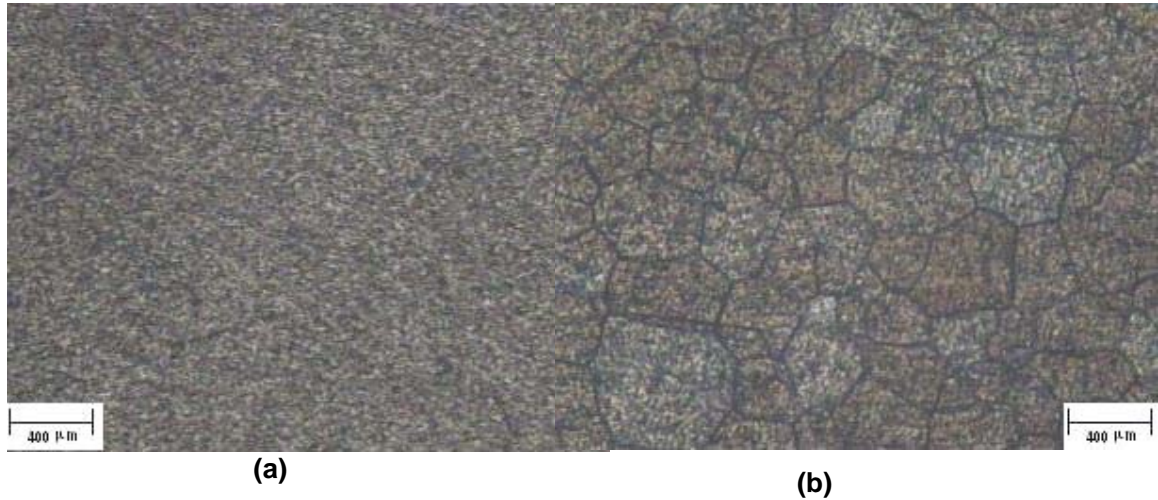
**Figura IV-45** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 23, sección transversal**



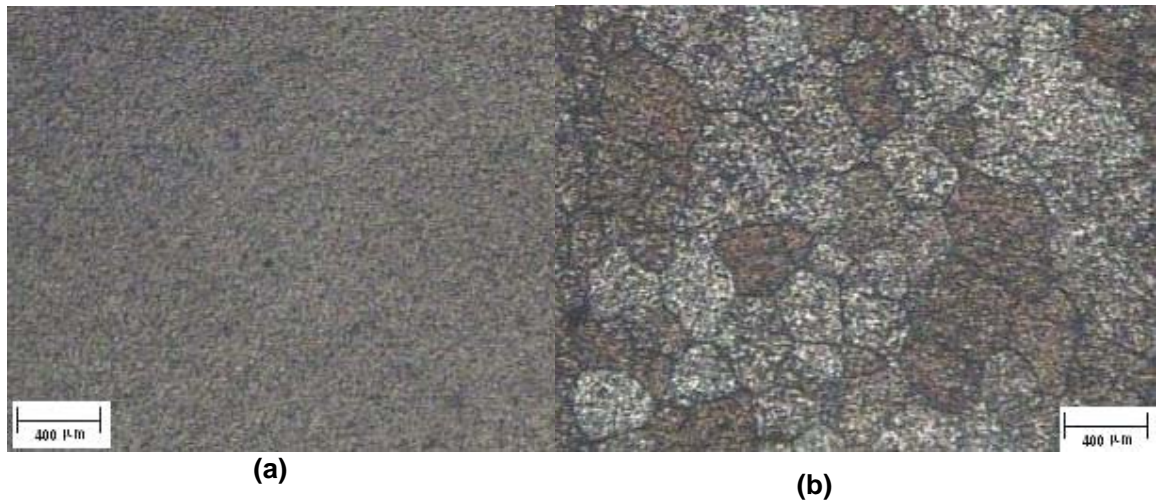
**Figura IV-46** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 530,56 °C (987 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -3. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 24, sección superficial**



**Figura IV-47** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 24, sección transversal**



**Figura IV-48** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 533,89 °C (993 °F).  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

**6. Quinta producción: Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho bajas y velocidad de extrusión del perfil 1029 baja.**

**a. Variables del proceso de extrusión, quinta producción**

**Tabla IV-17** Quinta producción. Toma de variables del proceso de extrusión.

Parámetros del tocho en el horno de precalentamiento			Parámetros del perfil 1029 extruido		
Zona de precalentamiento del tocho	Temperatura ajustada por parte del operario $T_{set}$ , °C (°F)	Temperatura real reportada al equipo $T_{real}$ , °C (°F)	Sección	Velocidad de extrusión $V_{ext}$ (m/min)	Temperatura de salida $T_{sal}$ , °C (°F)
1	421,11 (790)	411,67 (773)	Inicio	6	522,78 (973)
2	415,56 (780)	427,78 (802)	Medio	6	526,11 (979)
3	415,56 (780)	426,67 (800)	Final	5	519,11 (967)

**Tabla IV-18** Número de muestra de la quinta producción y su caracterización.

Muestra		
No.	Salida de la matriz	Sección del perfil
25	Superior	Inicio
26	Superior	Medio
27	Superior	Final
28	Inferior	Inicio
29	Inferior	Medio
30	Inferior	Final

**b. Resultados de la prueba de tensión, quinta producción**

**Tabla IV-19** Prueba de tensión realizada a la quinta producción

<b>Muestra</b>		<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	
<b>No.</b>	Medidas	Prom	
<b>25</b>	230,093	<b>228,721</b>	
	227,349		
<b>26</b>	227,394	<b>226,946</b>	
	226,498		
<b>27</b>	230,393	<b>230,848</b>	
	231,302		
<b>28</b>	233,983	<b>235,137</b>	
	236,290		
<b>29</b>	230,912	<b>230,422</b>	
	229,932		
<b>30</b>	227,390	<b>226,846</b>	
	226,301		

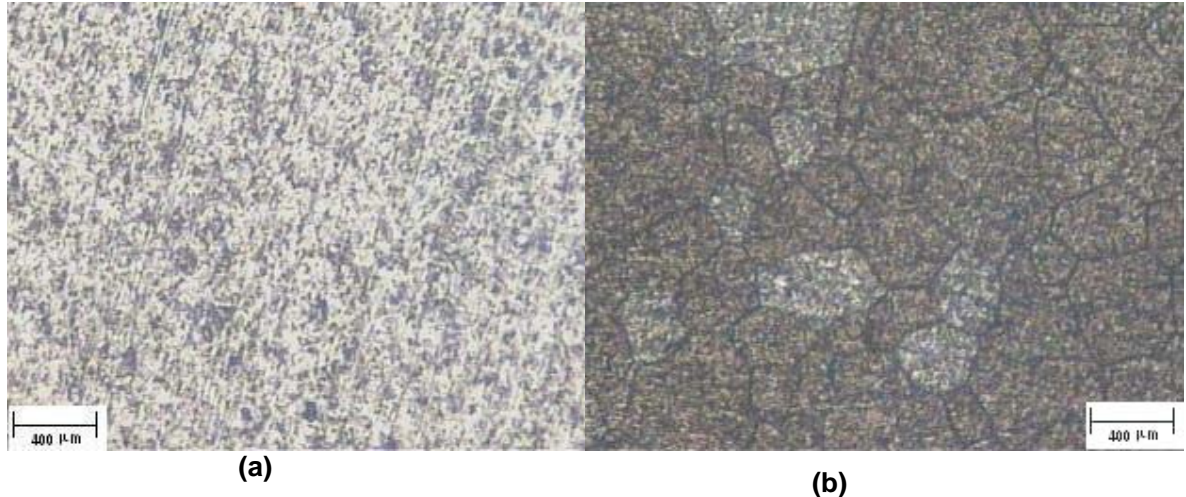
**c. Resultados de la prueba dureza, quinta producción**

**Tabla IV-20** Prueba de dureza realizada a las muestras de la quinta producción

<b>Muestra</b>	<b>Dureza Brinell (HBS)</b>
<b>No.</b>	Conversión desde la escala Rockwell superficial 15-T
<b>25</b>	<b>60,00</b>
<b>26</b>	<b>59,68</b>
<b>27</b>	<b>61,30</b>
<b>28</b>	<b>70,50</b>
<b>29</b>	<b>69,50</b>
<b>30</b>	<b>67,75</b>

d. Resultados metalográficos, quinta producción

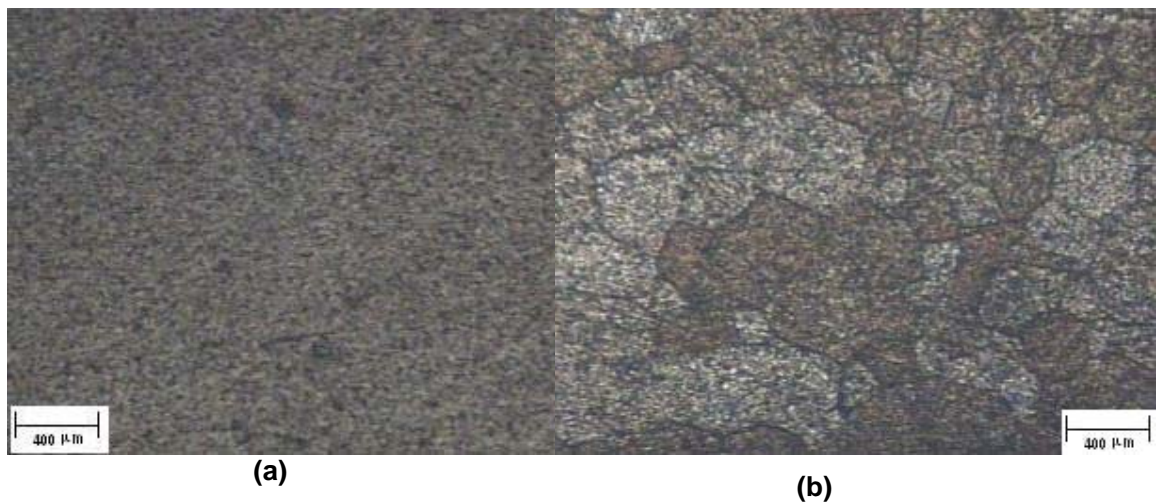
**Muestra 25, sección superficial**



**Figura IV-49** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

**Muestra 25, sección transversal**

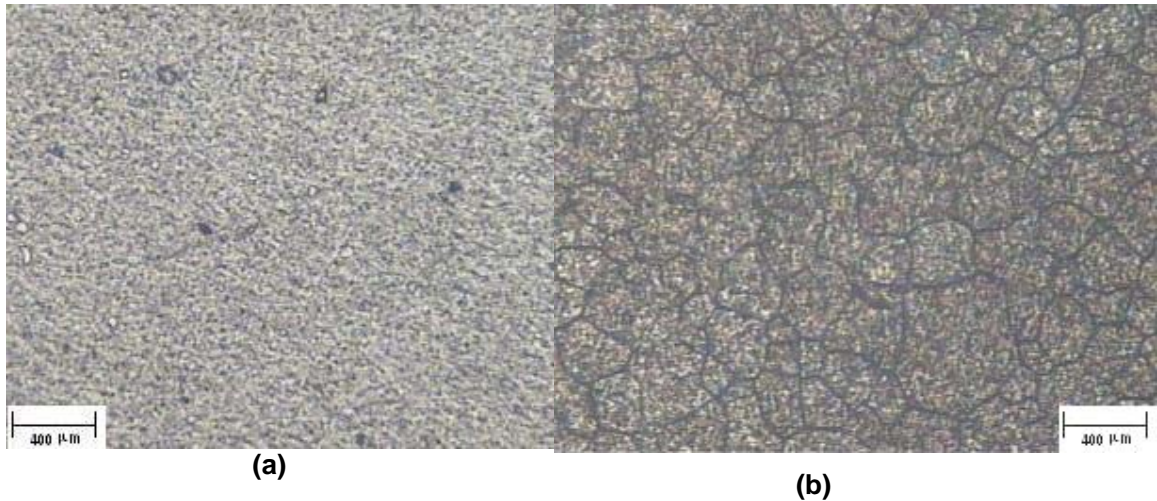


**Figura IV-50** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 3. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

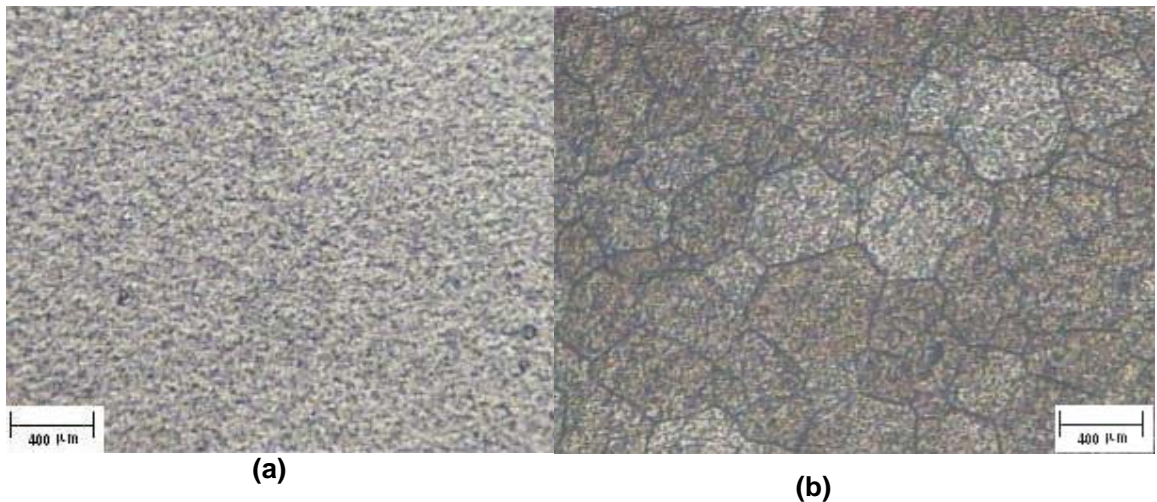


**Muestra 26, sección superficial**



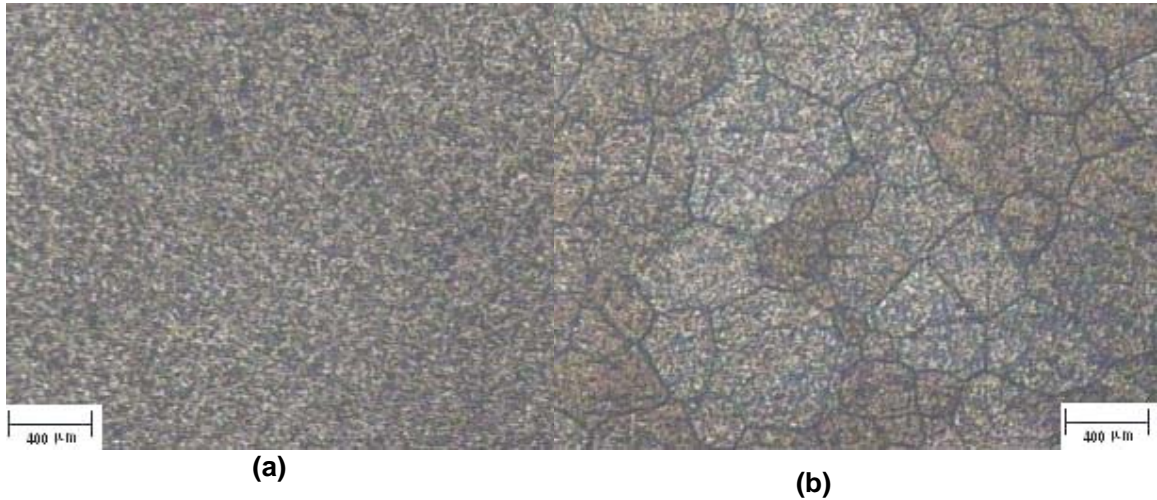
**Figura IV-51** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

**Muestra 26, sección transversal**



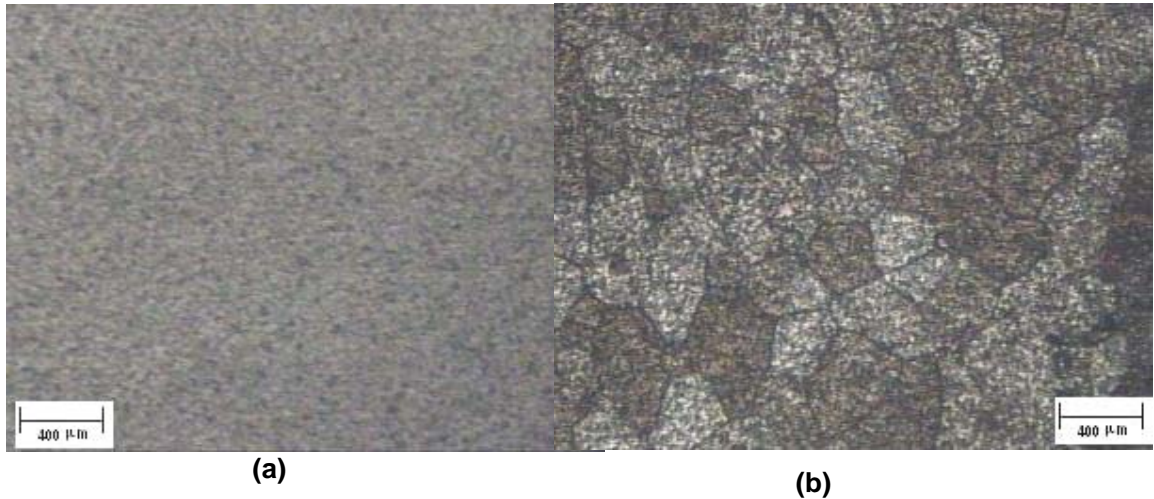
**Figura IV-52** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 27, sección superficial



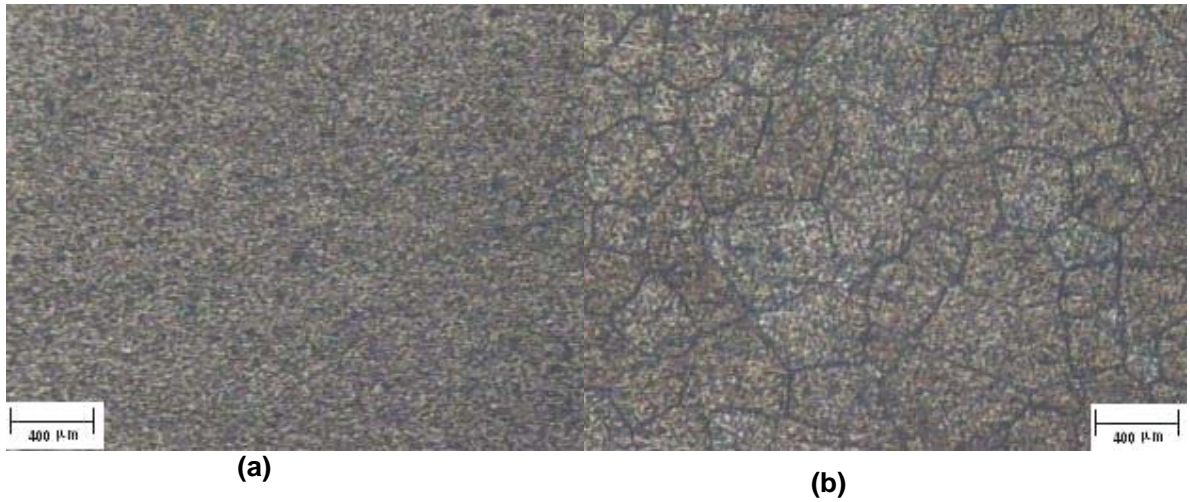
**Figura IV-53** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 27, sección transversal



**Figura IV-54** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)  
(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): -1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

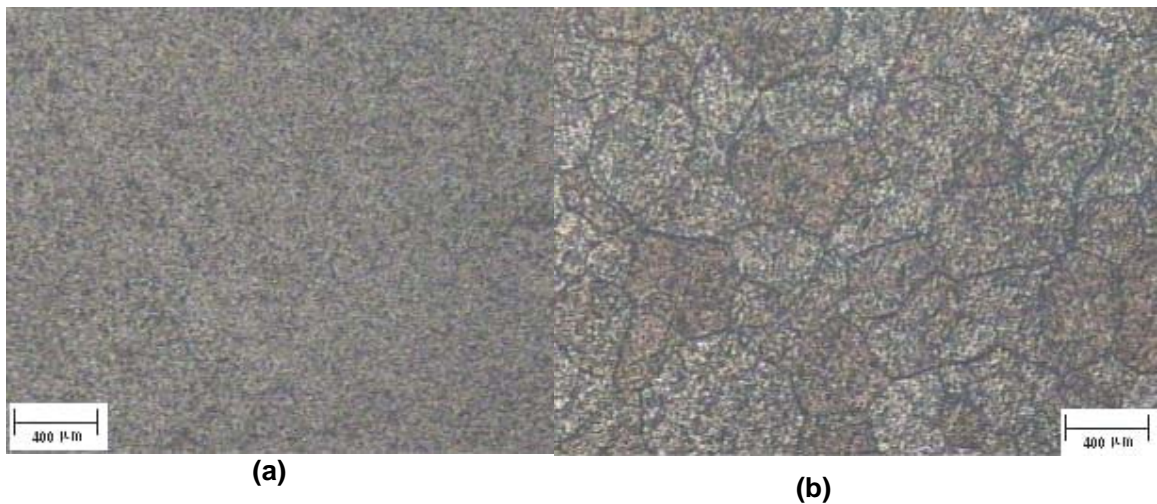
### Muestra 28, sección superficial



**Figura IV-55** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### Muestra 28, sección transversal



**Figura IV-56** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 522,78 °C (973 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 29, sección superficial**

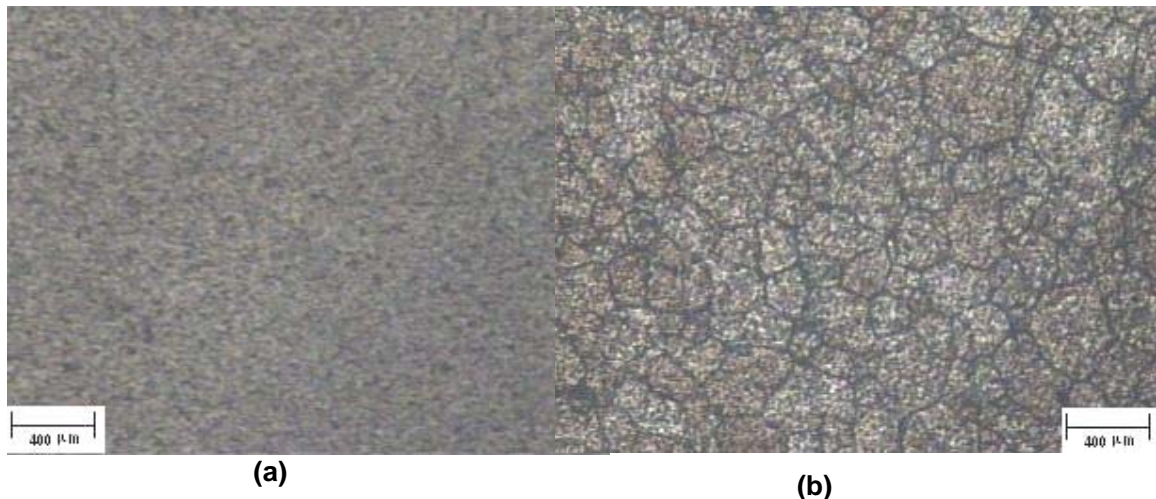


**Figura IV-57** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

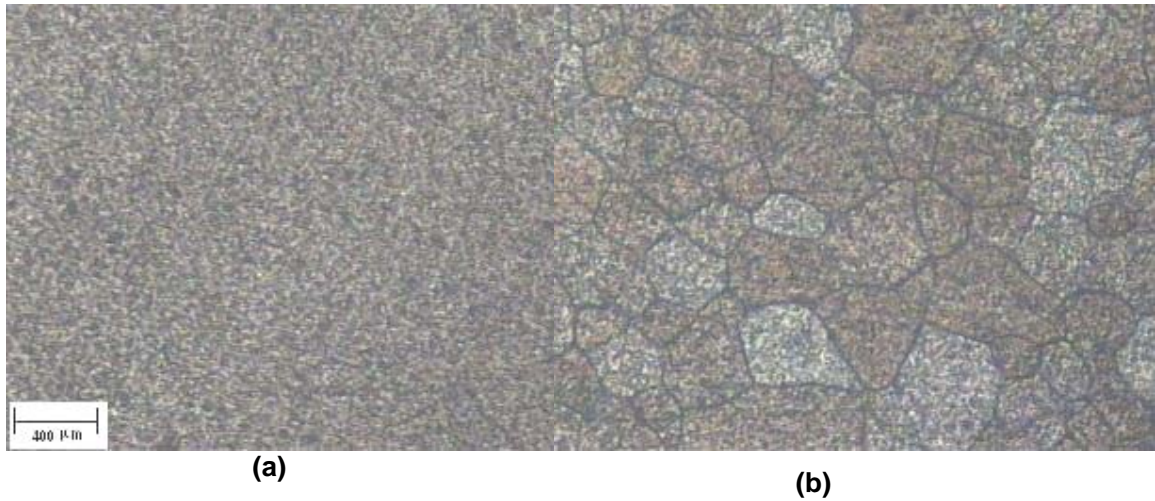
### **Muestra 29, sección transversal**



**Figura IV-58** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 526,11 °C (979 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 2. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

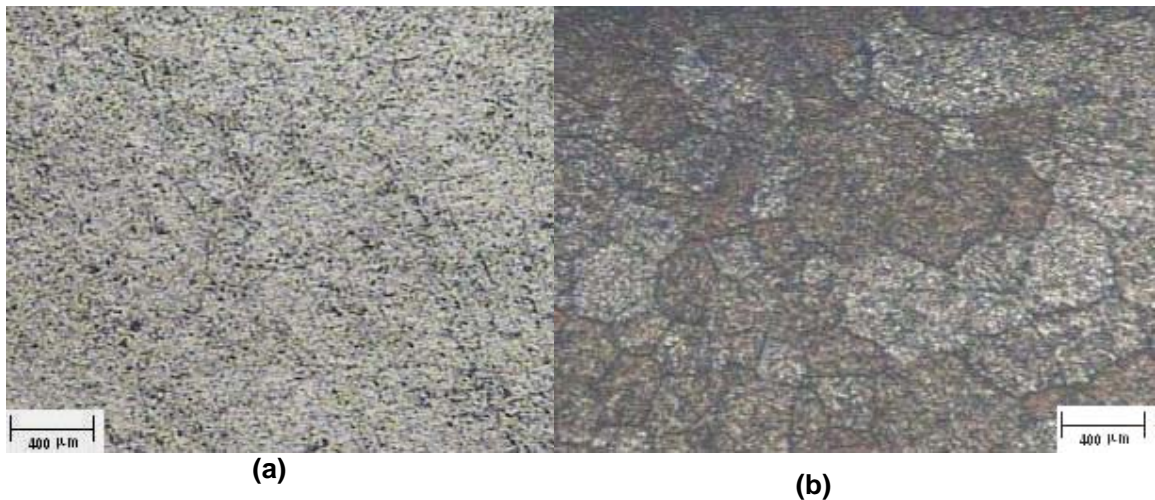
### **Muestra 30, sección superficial**



**Figura IV-59** Sección superficial de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 1. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

### **Muestra 30, sección transversal**



**Figura IV-60** Sección transversal de la aleación 6063T5 extruída a 519,11 °C (967 °F)

(a) Microestructura sin aplicar reactivo. Magnitud original: 200x. (b) Microestructura que muestra los límites de grano y su tamaño. Tamaño de grano promedio (índice ASTM): 0. Reactivo: 0,5% HF. Magnitud original: 200x.

## **B. Análisis de resultados**

### **1. Variables del proceso de extrusión**

#### **a. Temperaturas del horno de precalentamiento del tocho**

Las temperaturas tomadas del proceso de extrusión mostradas en las tablas IV-1, IV-5, IV-9, IV-13 y IV-17, muestran temperaturas para la zona 3 del horno de precalentamiento muy cercanas e incluso menores a los 426,67 °C (800 °F). De las tres zonas de precalentamiento que posee el horno, la zona 3 resulta ser la más importante al dar un reporte de temperatura, ya que ésta es la temperatura que se acerca al valor más real antes de posicionar el tocho en la prensa.

Luego de sacar el tocho del horno de precalentamiento, no se existe un instrumento de medición de temperatura que indique la temperatura a la que se encuentra el tocho al posicionarse en la prensa.

Según ASTM B807 (2002), los tochos deben ser calentados a una temperatura apropiada para la aleación en cuestión. Esta misma norma indica que si se da un cambio en la temperatura real a la cual el tocho se encuentra dentro del horno, con un cambio de  $\pm 2$  °F de las temperaturas a las que el tocho debe estar antes de entrar en la prensa, las cuales van desde 426,67 °C (800 °F) hasta 551,67 °C (1025 °F), se puede permitir el subir o bajar la temperatura, según sea el caso, para establecer la misma dentro del rango estipulado. Por ejemplo, si la temperatura llega a tener el valor que se obtuvo para la zona 3 de la primera producción (ver tabla IV-1), el cual fue de 356,56 °C (690 °F), se debe realizar un aumento en la zona 3 con tal de que la temperatura del tocho se encuentre dentro del rango establecido por ASTM B807 (2002).

El tener un adecuado control de la temperatura del tocho es un aspecto sumamente importante, ya que la temperatura a la que éste se encuentre va a determinar la facilidad de extrusión y la disminución en los defectos que pueda llegar a presentar el producto extruído. Si se trabaja con temperaturas en el tocho inferiores a 426,67 °C (800 °F), la prensa requerirá una mayor presión para el inicio de extrusión, así como para la culminación del proceso.

Otro punto importante es la carencia de un medidor de temperatura del tocho al posicionarse en la prensa. Es indispensable contar con este instrumento para poder determinar la diferencia de temperatura que se tiene entre la salida del tocho del horno

de precalentamiento y su ingreso a la extrusora. La importancia de tener este dato se hace necesaria para la corrección del proceso de extrusión. Como puede observarse en las tablas IV-1, IV-9, IV-13 y IV-17, las temperaturas reales de la zona 3 reportadas, indican valores muy cercanos a los 426,67 °C (800 °F); los valores captados van desde los 426,67 °C (800 °F) hasta los 437,78 °C (816 °F). Al salir el tocho del horno de precalentamiento al medio ambiente, se da una disminución en la temperatura, y al no poseer un instrumento de medición de temperatura cercano a la zona donde se posiciona el tocho en la prensa, se desconoce la temperatura real del tocho antes de iniciar la extrusión.

Conociendo la temperatura del tocho al posicionarse en la prensa se lograría estandarizar las temperaturas que debe establecer el operario para el horno de precalentamiento del tocho.

#### **b. Velocidad de extrusión del perfil 1029 y temperatura de salida del perfil**

El parámetro de temperatura de salida del perfil da un valor fundamental para la corrección del proceso de extrusión. Al tener la temperatura de salida del perfil entre el rango de 426,67 °C (800 °F) y 551,67 °C (1025 °F), se puede tener un proceso de extrusión cercano al satisfactorio. Desdichadamente, un 50% de los valores de temperatura reportados superan los 551,67 °C (1025 °F), para las primeras dos producciones, las cuales corresponden a condiciones normales de producción.

El realizar este estudio variando sólo los parámetros de velocidad de extrusión del perfil y temperaturas del horno de precalentamiento del tocho, permitió detectar con mayor facilidad los factores que afectan esta temperatura de salida. La geometría que presenta el perfil 1029 dificulta el control en las temperaturas, ya que al ser un perfil de espesor tan bajo (1 mm) se tienen velocidades de extrusión y temperaturas de salida del perfil altas. La obtención de estas altas temperaturas se debe a la temperatura del contenedor.

La temperatura del contenedor establecida actualmente oscila entre 398,89 °C (750 °F) y 426,67 °C (800 °F). Los autores Barrand & Gadeau (1968) recomiendan una temperatura del contenedor inferior a la temperatura del tocho, siendo esta diferencia de 20 °C (68 °F) a 50 °C (122 °F). Al ser la mínima temperatura del tocho de 426,67 °C (800 °F), es necesario establecer la temperatura en un rango comprendido entre 358,89 °C (678 °F) y 388,89 °C (732 °F). Esto disminuirá considerablemente la

temperatura de salida del perfil. Sin embargo, es necesario considerar temperaturas en el contenedor incluso más bajas, esto debido a la geometría que tiene el perfil 1029, en especial por su bajo espesor.

Es deseable tener velocidades de extrusión altas contra una temperatura de salida de extrusión baja. Con las variables que se establecen actualmente, no se obtiene esta condición. A lo largo de este proyecto se ha observado que el proceso de extrusión en Extralum se da, de manera general, a temperaturas y velocidades altas.

Las velocidades y temperaturas reportadas para todas las producciones, no cumplen cabalmente la condición de “Baja temperatura y Alta velocidad”. Esta es la principal razón del tamaño de grano observado, el cual se discutirá más adelante.

## **2. Análisis de tensión y dureza**

La prueba de tensión es necesario realizarla, ya que provee la información de la fuerza y la ductilidad de los materiales bajo una fuerza de tensión uniaxial. Esta prueba es útil para determinar el comportamiento de la aleación 6063 T5, control de calidad y designaciones al perfil 1029 bajo ciertas circunstancias.

La prueba de tensión pretende verificar el estado en que se encuentra el perfil 1029 luego de ser tratado térmicamente. Este perfil lleva un tratamiento denotado como T5, el cual, según la norma ASTM B221M (2005), debe tener un esfuerzo máximo con un valor mínimo 150 MPa.

Al realizar el ensayo de tensión en las probetas tomadas del perfil 1029, se determinó que los valores de esfuerzo máximo, en una totalidad, superaron el valor de 150 MPa que estipula la norma ASTM B221M (2005).

La mínima dureza que debe presentar el perfil 1029 es de 60 HBS, lo que se cumple para la un 93% de las muestras analizadas.



### 3. Análisis metalográfico

El tamaño de grano influye en las propiedades mecánicas del material y en el acabado superficial de los perfiles. Según la clasificación del tamaño de grano para un proceso de conformado, se tiene que todas las muestras analizadas presentan un tamaño de grano grueso, ya que los valores de estos van de un índice ASTM -3 hasta un índice ASTM 2.

Entre las posibles causas de presentar los tamaños de grano gruesos determinados para las muestras de cada producción están:

- a. Temperatura del tocho baja antes de posicionarse en la prensa
- b. Temperatura del contenedor alta
- c. Temperatura de la matriz
- d. Temperatura de salida del perfil alta
- e. Velocidad de extrusión
- f. Temperatura alta del perfil antes y luego de pasar por el sistema de enfriamiento
- g. Tiempo de permanencia entre la salida del sistema de enfriamiento y la entrada al horno de temple.
- h. Tiempo de salida del material del horno de temple

De estas posibles causas, se sabe con certeza que las causas de la (a) a la (b), y de la (d) a la (h) no se llevan conforme a lo establecido por norma, lo que son fuertes factores que influyen en el tamaño de grano del material. Para poder saber si la causa (c) influye en el tamaño de grano, se deben corregir los parámetros de las causas (a) a (b) y (d) a (h), que por norma se pueden establecer con seguridad.

El espesor de 1 mm del perfil 1029, lleva a presentar condiciones distintas al realizar el tratamiento térmico que las que actualmente se realizan, ya que por su espesor se debe tener un menor tiempo en el horno de tratamiento. El tiempo de tratamiento térmico para un perfil de aleación 6063 T5 es de 1 h a 2 h a 204,4 °C (400 °F ± 10 °F) o 3 h a 182 °C (360 °F ± 10 °F). El tratamiento empleado por Extralum tarda de 5 h a 5½ h, a una temperatura aproximada de 182 °C (360 °F).

El tiempo durante el proceso no es controlado de una manera adecuada, ya que no se tiene control sobre:

- Tiempo del material desde que pasa por los abanicos a la salida de la matriz hasta que entra al horno
- Tiempo de permanencia en el horno
- Salida del material al finalizar el proceso en el horno

El tamaño de grano se ve afectado por estos tiempos, así como las temperaturas empleadas a lo largo del proceso. Este tamaño de grano no disminuirá y seguirá siendo grueso, sino se da un cambio total en las causas antes enumeradas.

### **C. Conclusiones**

- La temperatura del tocho al salir del horno de precalentamiento tiene valores muy cercanos a los 426,67 °C (800 °F).
- Las temperaturas de salida del perfil de las producciones analizadas, sobrepasan en un 20% los 551,67 °C (1025 °F).
- Las altas temperaturas del perfil se deben, principalmente, a la temperatura del contenedor.
- Las pruebas de tensión analizadas cumplieron en un 100% con lo establecido por ASTM, por lo que se considera que el tratamiento térmico cumple con las propiedades de tensión mínimas para el perfil 1029.
- Las pruebas de dureza cumplieron, en un 93%, con la dureza deseada, la cual es de 60 HBS.
- Los tamaños de grano analizados muestran, en un 100%, un tamaño de grano grueso.
- El proceso de extrusión debe operarse a velocidades altas (aproximadamente 20 m/min) y temperaturas bajas (426,67 °C).
- La corrección del proceso de extrusión requiere de la implementación de instrumentos de medición de temperatura al posicionar el tocho en la prensa y al final del proceso de enfriamiento de los perfiles.

#### **D. Recomendaciones**

- Colocar un medidor de temperatura al posicionar el tocho en la extrusora, con el fin de obtener la variación de temperatura que hay entre la salida del horno y la entrada a la prensa.
- No sobrepasar la temperatura de 551,67 °C (1025 °F) para los perfiles a la salida de la matriz, para esto se debe reducir la temperatura del contenedor.
- Emplear una temperatura en el contenedor de 358,89 °C a 388,89 °C (678 °F a 732 °F).
- Colocar un medidor de temperatura después del proceso de enfriamiento de los perfiles, para establecer la eficiencia del proceso de enfriamiento de los perfiles a la salida de la extrusora y un control constante de la temperatura de los perfiles.
- Dar un tiempo de tratamiento térmico de 1 h a 2 h para el perfil 1029 a una temperatura de 204,44 °C (400 °F) o emplear un tiempo de 3 h a 182,22 °C (360 °F).
- Dejar enfriar el perfil a temperatura ambiente fuera del horno de tratamiento. No dejar reposar el material dentro del horno, una vez que se ha concluido el proceso de tratamiento.
- En caso de que se encuentre material que impida la salida del material del horno, es indispensable el establecer nuevos posicionamientos de los buggies que contienen los productos extruídos al salir del horno, de manera tal que no impida la salida inmediata de material que concluya el proceso dentro del horno.

## V. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Como alternativas de solución para obtener un tamaño de grano óptimo y posibles disminuciones en defectos que pueda presentar el perfil 1029 o cualquier otro producto con que cuenta Extralum, se tienen las siguientes:

### A. Disminuir la temperatura de salida del perfil

La salida del perfil presenta notables aumentos de temperatura conforme se da el proceso de extrusión. Es inaceptable una temperatura por encima de los 551,57 °C (1025 °F). La principal causa de este problema se refiere a la temperatura del contenedor.

#### 1. Reducir la temperatura del contenedor

Como se explicó anteriormente, la temperatura del contenedor con que trabaja Extralum está entre un rango establecido entre 398,89 °C (750 °F) y 426,67 °C (800 °F). A pesar de que Barrant & Gadeau (1968) recomiendan el dar una temperatura en el contenedor de entre 358,89 °C (678 °F) y 388,89 °C (732 °F), se debe tener cuidado ya que puede que estas temperaturas no sean recomendables para todos los productos de Extralum.

Al tener tanta diversidad de productos, se recomienda el realizar pruebas de temperatura de contenedor contra la geometría de diversos productos, tomando en cuenta, principalmente, el espesor del producto, ya que este define en gran parte, la presión requerida por la prensa de la extrusora.

Para poder realizar este estudio, es necesario ordenar la producción de acuerdo a la geometría del producto, de manera tal que la temperatura del contenedor se pueda bajar suavemente, sin provocar un cambio brusco que pueda afectar la extrusora. El realizar esto puede llegar a controlar en una totalidad la temperatura de salida del perfil.

## **B. Controlar la temperatura al pasar el perfil por los abanicos**

Actualmente se desconoce la eficiencia que presentan los abanicos posicionados luego de la extrusora. Al no tener conocimiento de las temperaturas de los perfiles luego de atravesar estos, se ignora si este punto pertenece a la gama de causas por las que el perfil presenta el tamaño de grano grueso.

Se debe tener un control permanente de la temperatura que tienen los perfiles al pasar por la zona de enfriamiento, de manera tal que se tenga como un valor aceptable, aquel en que la zona de enfriamiento presente una temperatura del perfil igual o inferior a 204,44 °C (400 °F).

## **C. Disminuir el tiempo de tratamiento térmico**

El tiempo de tratamiento térmico no cumple con lo recomendado por ASTM B918 (2001). Si bien es cierto que este tiempo puede variar y puede llegar a ser de 5 h a 5½ h para algunos perfiles, no se debe estandarizar este tiempo para todos los perfiles sin un estudio que lo respalde. Como este proyecto se centra en el proceso de extrusión, únicamente se hará la recomendación de adecuar este tiempo.

Para realizar esto, es necesario realizar un estudio de tiempos versus espesor del material, midiendo las durezas y principalmente el esfuerzo máximo y la elongación que tengan estos productos al pasar por el proceso de temple.

La prueba de tensión es requerida de manera mensual para establecer el control del perfil y la eficiencia del horno (ASTM B241, 2002).

## **D. Posicionar los buggies fuera del horno al terminar el proceso de tratamiento térmico**

ASTM B918 (2001) recomienda el posicionar los buggies, que contienen los productos extruídos, fuera del horno una vez que éste ha pasado por el proceso de tratamiento térmico. Los buggies, bajo ninguna circunstancia, deben dejarse reposar dentro de este.

Si los buggies tienen impedida la salida a causa de otros que están en la puerta de salida del horno, se debe estudiar la distribución de planta para encontrar un adecuado lugar para la salida de los perfiles del horno.

Estas alternativas de solución deben ser tomadas en su totalidad. El cambio de una sola de estas puede no implicar la obtención de un producto óptimo, ya que son muchas y muy grandes las causas por las cuales los productos extruídos presentan los tamaños de grano analizados. A esto es importante agregar que este estudio está centrado únicamente en el proceso de extrusión y sus variables de velocidad de extrusión del perfil 1029 y temperaturas del tocho en su horno de precalentamiento. Para una mayor determinación de la causa del problema, se debe corregir también el proceso de tratamiento térmico.

## VI. Bibliografía

- ASTM Handbook Comité (2005). *B221M Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles and Tubes [Metric]* (Vol. 02.02).
- ASTM Handbook Comité (2002). *B 241 / B 241M Standard Specification for Aluminum-Alloy Seamless Pipe and Seamless Extruded Tube* (Vol. 02.02).
- ASTM Handbook Comité (2002). *B 557M Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]* (Vol. 02.02).
- ASTM Handbook Comité (2002). *B 807 Standard Practice for Extrusion Press Solution Heat Treatment for Aluminum Alloys* (Vol. 02.02).
- ASTM Handbook Comité (2001). *B 918 / Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys* (Vol. 02.02).
- ASTM Handbook Comité (2004). *E 8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]* (Vol. 03.01).
- ASTM Handbook Comité (1996). *E 112 / Standard Test Methods for Determining Average Grain Size* (Vol. 03.01).
- ASTM Handbook Comité (2005). *E 140 / Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness and Scleroscope Hardness* (Vol. 03.01).
- ASTM Handbook Comité (2001). *E 918 / Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys* (Vol. 03.01).
- ASTM Handbook Comité (2002). *E 1181 / Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes* (Vol. 03.01).
- Barrand, P. & Gadeau, R. (1968). *Enciclopedia del Aluminio* (Vol. III). España: Urmo S.A.



Bello, Luis B. (1965). *Manual de Procedimientos para Extrusores de Aluminio*.

Dieter, George (1961). *Mechanical Metallurgy*. (3 ed.). United States: Mc Graw Hill.

Herenguel, Jean (1976). *Metalurgia Especial* (Tomo I). España: Urmo S.A.

Rowe, Geoffrey (1972). *Conformado de los Metales*. España: Urmo S.A.

## Apéndice 1: Resumen de las normas ASTM utilizadas

<b>Designación / Título</b>	E 8M / Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]
<b>Resumen</b>	<p>Las pruebas de esta norma cubren los ensayos de tensión aplicables a materiales metálicos de cualquier forma a temperatura ambiente, específicamente, los métodos para determinar la fuerza de cedencia, la elongación en el punto de cedencia, la fuerza de tensión, la elongación y la reducción de área.</p> <p>Esta norma no cubre todas las medidas de seguridad asociadas a su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma el establecer las prácticas de salud y seguridad apropiadas.</p>
<b>Designación / Título</b>	B 221M / Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles and Tubes [Metric]
<b>Resumen</b>	Esta especificación cubre al aluminio y sus aleaciones en productos como barras extruídas, cables, perfiles y tubos para ciertas aleaciones y temple.
<b>Designación / Título</b>	B 241/B 241M / Standard Specification for Aluminum-Alloy Seamless Pipe and Seamless Extruded Tube
<b>Resumen</b>	Esta especificación cubre a ciertas aleaciones de aluminio para aplicaciones a presión.
<b>Designación / Título</b>	B 557M / Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium-Alloy Products
<b>Resumen</b>	Estos métodos cubren las pruebas de tensión de aleaciones de aluminio fundidas y conformadas, así como los productos de las aleaciones de magnesio, a excepción de la lámina de aluminio. Estos métodos se derivan de los descritos en la E 8M, la cual cubre las pruebas de tensión para todo material metálico.

<b>Designación / Título</b>	B 807 / Standard Practice for Extrusion Press Solution Heat Treatment for Aluminum Alloys
<b>Resumen</b>	Esta práctica intenta cubrir los controles necesarios en la extrusión de aleaciones de aluminio de las series 6xxx y 7xxx antes de llegar a la prensa. Esta práctica es un proceso alternativo para la solución de tratamiento térmico en un horno, tal y como se especifica en ASTM B918 para los temple T3, T4, T6, T7, T8 y T9.
<b>Designación / Título</b>	B 918 / Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys
<b>Resumen</b>	Esta práctica es para uso en el tratamiento térmico aplicado al conformado de las aleaciones de aluminio para aplicaciones generales. Los tiempos y temperaturas presentados son típicos para varias formas, tamaños y métodos de manufactura y pueden no proveer el tratamiento térmico óptimo para alguna especificación. Esta práctica está en unidades de lb-pulg.
<b>Designación / Título</b>	E 112 / Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
<b>Resumen</b>	Los métodos presentados en esta práctica determinan el tamaño de grano en materiales metálicos, pero por su medición basada en geometría, las técnicas son independientes del metal o aleación en cuestión. Los procedimientos pueden ser utilizados para determinar el tamaño de grano de materiales no metálicos.