



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA FUNDICIÓN  
EN TROQUEL DE LAS ALEACIONES DE ALUMINO  
ASTM 355 Y ASTM 40E”**

**LONDO TENE PAULO CÉSAR  
TIERRA CUNACHI DIEGO FERNANDO**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2010**

**Espoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

**Mayo, 19 de 2010**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**PAULO CÉSAR LONDO TENE**

---

Titulada:

**“DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA FUNDICIÓN EN TROQUEL DE LAS  
ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Mario Pástor  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Raúl Cabrera  
ASESOR DE TESIS

# Espoch

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** PAULO CÉSAR LONDO TENE

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA FUNDICIÓN EN TROQUEL DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E”

**Fecha de Examinación:** Mayo, 19 de 2010

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo (Presidente Trib. Defensa)			
Ing. Mario Pástor (Director de Tesis)			
Ing. Raúl Cabrera (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

**Espoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Mayo, 19 de 2010

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**DIEGO FERNANDO TIERRA CUNACHI**

---

Titulada:

**“DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA FUNDICIÓN EN TROQUEL DE LAS  
ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Mario Pástor  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Raúl Cabrera  
ASESOR DE TESIS

# EsPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** DIEGO FERNANDO TIERRA CUNACHI

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA FUNDICIÓN EN TROQUEL DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E”

**Fecha de Examinación:** Mayo, 19 de 2010

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo (Presidente Trib. Defensa)			
Ing. Mario Pástor (Director de Tesis)			
Ing. Raúl Cabrera (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos- científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

f) Paulo César Londo Tene

---

f) Diego Fernando Tierra Cunachi

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa importante de nuestras vidas.

**Paulo César Londo Tene**

**Diego Fernando Tierra Cunachi**

## **DEDICATORIA**

A Dio, por darme a una familia maravillosa, a mis queridos padres que gracias a su sacrificio y apoyo incondicional pude terminar con éxito mi carrera de Ingeniería Mecánica, a mis abuelitos y tío que fueron un pilar fundamental en mi formación

¡Lo Logramos.....!

## **PCLT**

A Dios, por brindarme día a día la oportunidad de aprender a ser mejor persona; a mis queridos hermanos, por su gran afecto, cariño y apoyo incondicional y, en especial, a mi querida Madre, una persona maravillosa, por todas las cosas extraordinarias que ha hecho y que aún sigue haciendo por mí.

¡Ya era hora.....!

**DFTC**

## TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
<b>1</b>	<b>GENERALIDADES</b>	
1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4
<b>2</b>	<b>ALUMINIO Y SUS ALEACIONES</b>	
2.1	Introducción.....	6
2.2	Aluminio y sus aleaciones.....	6
2.3	Resistencia a la corrosión del aluminio y de sus aleaciones.....	9
2.4	Sistema de designación de las aleaciones para fundición.....	9
2.5	Designación de temple.....	10
2.6	Aleaciones de aluminio silicio magnesio.....	10
2.7	Aleaciones de aluminio zinc.....	11
2.8	Aleaciones de aluminio para fundición.....	12
2.8.1	Procesos de fundición.....	12
2.8.2	Aleaciones para fundición.....	14
2.9	Propiedades y características de la aleación de aluminio ASTM 355.....	14
2.10	Propiedades y características de la aleación de aluminio ASTM 40E.....	16
2.11	Tecnología de los moldes para fundición.....	17
2.11.1	Nociones generales sobre el molde metálico.....	17
2.11.2	Elaboración del molde.....	17
2.11.3	Proceso tecnológico de elaboración de piezas fundidas.....	18
2.12	Fundición en moldes metálicos.....	18

2.12.1	Generalidades.....	18
2.12.2	Colado por gravedad.....	19
2.12.3	Característica de la fundición en molde metálico.....	20
2.13	Fundición de aleaciones de aluminio.....	22
2.14	Ventajas y desventajas del proceso de fundición en moldes metálicos.....	22

### **3 EXPERIMENTACIÓN**

3.1	Introducción.....	24
3.2	Diseño del molde metálico.....	24
3.2.1	Dimensiones de la probeta estándar para ensayo de tracción.....	25
3.2.2	Cálculo de las dimensiones de la probeta estándar tomando en cuenta los efectos de contracción.....	26
3.2.2.1	Contracción lineal.....	26
3.2.2.2	Contracción de fundición.....	26
3.2.3	Cálculo de las dimensiones de la probeta estándar tomando en cuenta el mecanizado.....	28
3.2.4	Cálculo de la mazarota.....	29
3.2.5	Cálculo de los sistemas de alimentación.....	33
3.2.5.1	Sistemas de alimentación.....	33
3.2.5.2	Elementos del sistema de alimentación.....	34
3.2.5.3	Cálculo de la masa a fundir.....	36
3.2.6	Altura y sección de los canales.....	36
3.2.6.1	Entrada por la parte superior.....	37
3.2.7	Tiempo de colado (llenado).....	38
3.2.8	Caudal requerido.....	39
3.2.9	Cálculo de la velocidad de colado.....	40
3.2.10	Cálculo de las secciones de los alimentadores.....	40
3.2.11	Cálculo de la sección de salida del alimentador.....	40
3.2.12	Cálculo de la sección de entrada del alimentador.....	41
3.2.13	Espesor de las paredes del molde.....	--
3.2.14	Aireación del molde (respiraderos).....	46
3.3	Construcción del molde metálico.....	47

3.3.1	Materiales utilizados para el cuerpo del molde.....	48
3.3.2	Duración del molde.....	48
3.3.3	Obtención de las placas para la construcción del molde.....	49
3.3.4	Mecanizado de los bloques.....	49
3.3.5	Centrado, guiado y sujeción.....	50
3.4	Preparación de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y 40E.....	52
3.4.1	Cargas.....	52
3.4.1.1	Cálculo de cargas.....	52
3.4.2	Cálculo de carga para la aleación de aluminio ASTM 355.....	53
3.4.3	Cálculo de carga para la aleación de aluminio ASTM 40E.....	55
3.5	Fusión.....	56
3.5.1	Reglas generales de fusión.....	57
3.5.2	Presiones de vapor de los elementos presentes en las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E.....	57
3.5.3	Crisoles.....	59
3.6	Colado.....	60
3.6.1	Procedimientos para suministrar la masa fundida al molde metálico.....	61
3.6.2	Temperatura de colado y temperatura del molde.....	61
3.6.3	Calentado de las coquillas.....	61
3.6.4	Pinturas y revestimientos para coquillas.....	62
3.6.5	Enlucidos.....	63
3.6.5.1	Aplicación de los enlucidos.....	63
3.6.6	Puesta a punto de las condiciones para la utilización de una coquilla.....	64
3.7	Procedimiento de fundición.....	64
3.7.1	Procedimiento de fundición para la aleación de aluminio ASTM 355.....	64
3.7.2	Procedimiento de fundición para la aleación de aluminio ASTM 40E.....	65
3.8	Tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio.....	66
3.8.1	Tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento.....	66
3.8.2	Requisitos para el endurecimiento por envejecimiento.....	67
3.8.3	Procedimiento general para realizar el tratamiento térmico de	

	endurecimiento por envejecimiento o por precipitación.....	67
3.8.3.1	Tratamiento de solubilización.....	67
3.8.3.2	Templado.....	68
3.8.3.3	Envejecimiento.....	69
3.8.4	Tratamiento térmico para la aleación de aluminio ASTM 355.....	69
3.8.4.1	Procedimiento.....	70
3.8.5	Tratamiento térmico para la aleación de aluminio ASTM 40E.....	70
3.8.5.1	Procedimiento.....	71
3.9	Caracterización de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y 40E.....	72
3.9.1	Metalografía.....	72
3.9.1.1	Preparación de las muestras.....	73
3.9.2	Dureza.....	73
3.9.2.1	Ensayo de dureza Brinell.....	75
3.9.2.2	Procedimiento.....	75
3.9.3	Ensayo de tracción.....	76
3.9.3.1	Diagrama esfuerzo deformación.....	76
3.9.3.2	Límite de elasticidad.....	78
3.9.3.3	Límite de fluencia.....	79
3.9.3.4	Resistencia última.....	80
3.9.3.5	Resistencia a la ruptura.....	80
3.9.4	Ensayo de tracción.....	80
3.9.4.1	Procedimiento.....	81
3.9.5	Resistencia al impacto.....	82
3.9.5.1	Tenacidad y pruebas de impacto.....	83
3.9.5.2	Ensayo Charpy.....	84
3.9.5.3	Procedimiento.....	85
3.9.6	Porosidad.....	86
3.9.6.1	Determinación de poros.....	87

## 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1	Introducción.....	88
4.2	Análisis del proceso de fundición.....	88
4.3	Evaluación microestructural de la aleación de aluminio ASTM 355.....	89
4.3.1	Probetas en condiciones de fundido.....	89
4.3.2	Probetas tratadas térmicamente (T6).....	93
4.4	Evaluación microestructural de la aleación de aluminio ASTM 40E.....	100
4.4.1	Probetas en condiciones de fundido.....	101
4.4.2	Probetas tratadas térmicamente (T4).....	107
4.5	Evaluación de propiedades mecánicas.....	113
4.5.1	Aleación de aluminio ASTM 355.....	113
4.5.1.1	Probetas en condiciones de fundido.....	113
4.5.1.2	Probetas tratadas térmicamente.....	117
4.5.2	Aleación de aluminio ASTM 40E.....	119
4.5.2.1	Probetas en condiciones de fundido.....	119
4.5.2.2	Probetas tratadas térmicamente.....	121
4.6	Tiempo óptimo de permanencia de las aleaciones dentro de molde metálico.....	122
4.6.1	Aleación de aluminio ASTM 355.....	123
4.6.1.1	Probetas en condiciones de fundido.....	123
4.6.2	Aleación de aluminio ASTM 40E.....	126
4.6.2.1	Probetas en condiciones de fundido.....	126
4.6.3	Evaluación de propiedades mecánica.....	131
4.6.3.1	Aleación de aluminio ASTM 355 (F).....	131
4.6.3.2	Aleación de aluminio ASTM 40E (F).....	133
4.6.4	Evaluación de la porosidad.....	135
4.6.4.1	Aleación de aluminio ASTM 355.....	136
4.6.4.2	Aleación de aluminio ASTM 40E.....	141
4.7	Evaluación de composición química.....	148
4.7.1	Aleación de aluminio ASTM 355.....	149

4.7.2	Aleación de aluminio ASTM 40E.....	149
4.8	Evaluación de defectos y soluciones.....	150
4.8.1	Gotas frías.....	150
4.8.2	Grietas.....	150
4.9	Medidas de prevención contra la formación de sopladuras de gas y porosidad en las molduras.....	152
4.10	Comparación de las propiedades obtenidas con datos estándar.....	153

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	155
5.2	Recomendaciones.....	156

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

## LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	EFEECTO DE LOS MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.....	8
2.2	DESIGNACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN.....	9
2.3	DESIGNACIÓN DE TEMPLE PARA ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS.....	10
2.4	PROPIEDADES MECÁNICA.....	15
2.5	LÍMITESTES DE COMPOSICIÓN.....	15
2.6	TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	16
3.1	DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA PROBETA PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	25
3.2	DIMENSIONES DE LA PROBETA TOMANDO EN CUENTA LA CONTRACCIÓN.....	27
3.3	DIMENSIONES DE LA PROBETA TOMANDO EN CUENTA EL MECANIZADO.....	28
3.4	DÍAMETRO DEL MONTANTE SEGÚN EL TIPO DE ALEACIÓN.....	30
3.5	DIMENSIONES DE LA MAZAROTA.....	33
3.6	TIEMPO ESTIMADO PARA EL COLADO SEGÚN EL MODO DE ACCESO.....	39
3.7	COMPOSICIÓN PARA UN MOLDE METÁLICO DE FUNDICIÓN GRIS.....	48
3.8	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 4032 Y ASTM 6063.....	53
3.9	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PISTONES Y PERFILERÍA FUNDIDOS.....	54
3.10	VALORES DE LAS CONSTANTES PARA DETERMINAR LA PRESIÓN DE VAPOR DE ALGUMOS ELEMENTOS.....	58
3.11	COMPOSICIÓN USUAL DE UN CRISOL DE HIERRO	

	FUNDIDO.....	60
3.12	COMPOSICIÓN DE RESCUBRIMIENTOS PARA CRISOLES DE HIERRO FUNDIDO.....	60
4.1	DISTANCIA ENTRE BRAZOS DENDRÍTICOS SECUNDARIOS (en $\mu\text{m}$ ).....	90
4.2	DISTANCIA ENTRE BRAZOS DENDRÍTICOS SECUNDARIOS (en $\mu\text{m}$ ).....	93
4.3	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO.....	96
4.4	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD.....	100
4.5	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO.....	102
4.6	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD.....	106
4.7	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO.....	108
4.8	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD.....	112
4.9	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	113
4.10	DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA LA PROBETA NÚMERO 2 (P2).....	114
4.11	VALORES DE $S_{ut}$ Y DE LA SDAS PARA CONDICIONES DE FUNDIDO.....	117
4.12	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	118
4.13	VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.....	118
4.14	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	120
4.15	VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.....	120
4.16	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	121

4.17	VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.....	122
4.18	VALORES DE LA SDAS PARA CONDICIONES DE FUNDIDO.....	126
4.19	ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD.....	130
4.20	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	131
4.21	VALORES DE $S_{ut}$ Y DE LA SDAS PARA CONDICIONES DE FUNDIDO.....	131
4.22	VALORES DE $S_{ut}$ Y TIEMPO $t$ DE PERMANENCIA DENTRO DEL MOLDE METÁLICO.....	132
4.23	PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.....	133
4.24	VALORES DEL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO (G) Y LA RESISTENCIA ( $S_{ut}$ ).....	133
4.25	VALORES DE $S_{ut}$ Y TIEMPO $t$ DE PERMANENCIA DENTRO DEL MOLDE METÁLICO.....	134
4.26	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	137
4.27	CANTIDAD DE POROS.....	137
4.28	TAMAÑO DE POROS.....	137
4.29	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	138
4.30	CANTIDAD DE POROS.....	138
4.31	TAMAÑO DE POROS.....	139
4.32	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	139
4.33	CANTIDAD DE POROS.....	140
4.34	TAMAÑO DE POROS.....	140
4.35	VALORES DE % DE POROSIDAD Y DE LA RESISTENCIA ( $S_{ut}$ ).....	140
4.36	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	142
4.37	CANTIDAD DE POROS.....	142
4.38	TAMAÑO DE POROS.....	142
4.39	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	143
4.40	CANTIDAD DE POROS.....	143

4.41	TAMAÑO DE POROS.....	143
4.42	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	144
4.43	CANTIDAD DE POROS.....	144
4.44	TAMAÑO DE POROS.....	145
4.45	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	145
4.46	CANTIDAD DE POROS.....	146
4.47	TAMAÑO DE POROS.....	146
4.48	VALORES DE % DE POROSIDAD Y DE LA RESISTENCIA (Sut).....	146
4.49	DATOS DE ESFEROIDICIDAD.....	148
4.50	CANTIDAD DE POROS.....	148
4.51	TAMAÑO DE POROS.....	148
4.52	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355.....	149
4.53	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E.....	149
4.54	GOTAS FRÍAS CAUSAS Y SOLUCIONES.....	150
4.55	GRIETAS CAUSAS Y SOLUCIONES.....	151
4.56	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS ENTRE DATOS ESTÁNDAR Y LOS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355.....	153
4.57	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS ENTRE DATOS ESTÁNDAR Y LOS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355.....	154

## LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Diagrama de equilibrio Al-Mg <sub>2</sub> Si.....	11
2.2	Diagrama de equilibrio Al-Zn.....	11
2.3	Molde permanente de fundición.....	13
2.4	Moldes metálico con plano de separación vertical.....	21
2.5	Canales para la evacuación de gases en las coquillas.....	21
3.1	Probetas para realizar ensayos de tracción.....	25
3.2	Dimensiones de la probeta tomando en cuenta los efectos de contracción.....	28
3.3	Dimensiones de la probeta considerando el proceso de mecanizado.....	29
3.4	Mazarota.....	30
3.5	Elementos de un sistema de alimentación.....	34
3.6	Vista frontal del conjunto (mazarota + probeta).....	36
3.7	Esquema para el cálculo de la velocidad media del metal, según la posición de la entrada.....	37
3.8	Parámetros del molde a calcularse: (a) alimentador, (b) respiraderos, y (c) espesor.....	38
3.9	Parámetros del sistema de alimentación.....	41
3.10	Canales para la evacuación de gases en las coquillas (respiraderos).....	47
3.11	Dimensiones de los respiraderos en el molde metálico.....	47
3.12	Bloques de fundición gris.....	49
3.13	Moldes metálicos mecanizados mediante CNC.....	50
3.14	Sistema de sujeción de bisagra.....	51
3.15	Sistema de sujeción aprieta-juntas.....	51
3.16	Molde metálico con su sistema de sujeción.....	51
3.17	Carga: a la izquierda, perfilería; a la derecha, pistones fundidos.....	54
3.18	Carga: arriba, zinc puro; abajo, perfilería.....	56
3.19	Presiones de vapor.....	59
3.20	Carga de material en un crisol.....	59

3.21	Diagrama de equilibrio de dos soluciones solidas con punto Eutéctico.....	69
3.22	Ciclo de tratamiento térmico de envejecimiento artificial.....	70
3.23	Diagrama de equilibrio Al-Zn.....	71
3.24	Ciclo de tratamiento térmico de envejecimiento natural.....	72
3.25	Ensayos de dureza.....	74
3.26	Durómetro.....	76
3.27	Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos.....	77
3.28	Diagrama esfuerzo-deformación para un material frágil típico.....	78
3.29	Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.....	79
3.30	Comparación de diagramas de distintos materiales.....	80
3.31	Máquina Universal para ensayos mecánicos en materiales metálicos.....	82
3.32	Ensayo de impacto: (a) ensayos de Charpy e Izod y (b) dimensiones estándar.....	83
3.33	Máquina de péndulo Charpy.....	85
3.34	Esquema de la formación de rechupes de contracción en una Moldura.....	86
4.1	Presiones de Vapor.....	88
4.2	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	89
4.3	Distancia entre brazos dendríticos secundarios.....	90
4.4	(a) Representación de la estructura original de silicio ramificado (b) Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355.....	90
4.5	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	91
4.6	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	91
4.7	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	92

4.8	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: <b>(a) 100x y (b) 400x</b> .....	92
4.9	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	93
4.10	Representación esquemática de la evolución experimentada por el silicio eutéctico durante el tratamiento térmico T6.....	94
4.11	Determinación del índice de tamaño de grano por el método de Intersección a 100x.....	95
4.12	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	98
4.13	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	98
4.14	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	99
4.15	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	99
4.16	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: <b>(a) 100x y (b) 400x</b> .....	101
4.17	Determinación del tamaño de grano por el método de intersección a 130x.....	102
4.18	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: <b>(a) 100x y (b) 400x</b> .....	104
4.19	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: <b>(a) 100x y (b) 400x</b> .....	105

4.20	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	105
4.21	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	106
4.22	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	107
4.23	Determinación del índice de tamaño de grano mediante el método de intersección.....	108
4.24	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	110
4.25	Microestructura de una aleación de aluminio ASRM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	111
4.26	Microestructura de una aleación de aluminio ASRM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	111
4.27	Microestructura de una aleación de aluminio ASRM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.....	111
4.28	Diagrama esfuerzo – deformación unitaria.....	115
4.29	Diagrama esfuerzo – deformación unitaria: determinación de $S_y$ .....	115
4.30	Relación entre la resistencia última a la tensión ( <b>S<sub>ut</sub></b> ) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios <b>SDAS</b> .....	117
4.31	Relación entre la resistencia última a la tensión ( <b>S<sub>ut</sub></b> ) y el índice de tamaño de grano ( <b>G</b> ).....	119
4.32	Relación entre la resistencia última a la tensión ( <b>S<sub>ut</sub></b> ) y el índice de tamaño de grano ( <b>G</b> ).....	120
4.33	Relación entre la resistencia última a la tensión ( <b>S<sub>ut</sub></b> ) y el índice de tamaño de grano ( <b>G</b> ).....	122

4.34	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x y (c) 400x.....	123
4.35	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x y (c) 400x.....	124
4.36	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, y (c) 400x.....	125
4.37	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, y (c) 400x.....	127
4.38	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, y (c) 400x.....	128
4.39	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, y (c) 400x.....	129
4.40	Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, y (c) 400x.....	130
4.41	Relación entre el límite de ruptura ( <b>Sut</b> ) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios <b>SDAS</b> .....	132
4.42	Relación entre el límite de ruptura Sut y el tiempo de permanencia t dentro del molde metálico.....	132
4.43	Relación entre la resistencia última a la tensión ( <b>Sut</b> ) y el índice de tamaño de grano ( <b>G</b> ).....	134
4.44	Relación entre el límite de ruptura Sut y el tiempo de permanencia t dentro del molde metálico.....	134
4.45	Representación simplificada de la forma de un poro.....	136
4.46	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dentro de un tubo metálico. Porosidad: 1.1 %.....	136
4.47	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dos minutos dentro del moldeo metálico. Porosidad: 2.5 %.....	138
4.48	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada tres minutos dentro del molde metálico. Porosidad 0.9%.....	139
4.49	Relación entre el % de porosidad y la resistencia última a tensión (Sut) .....	141

4.50	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dentro de un tubo metálico. Porosidad: 1 %.....	141
4.51	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada tres minutos dentro del molde metálico. Porosidad 1%.....	142
4.52	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada siete min dentro del molde metálico. Porosidad 2.1%.....	144
4.53	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada cinco minuto dentro del molde metálico. Porosidad 3.5%.....	145
4.54	Relación entre el % de porosidad y la resistencia última a tensión (Sut) .....	147
4.55	Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada en molde de arena. Porosidad 1.1%.....	147

## SIMBOLOGÍA

$Al$	Aluminio
$Cu$	Cobre
$^{\circ}C$	Temperatura en grados centígrados
$\rho$	Densidad a la temperatura de interés
$\rho_o$	Densidad del metal líquido a la temperatura de fusión
$d_o$	Diámetro de entrada del sistema de alimentación
$d_1$	Diámetro a la salida del sistema de alimentación
$d\rho/dT$	Coefficiente de variación de densidad respecto a la temperatura
$e$	Espesor de las paredes de los moldes metálicos
$Fe$	Hierro
$g$	Aceleración de la gravedad
$H$	Hidrógeno
$h_o$	Altura de entrada de la colada en el sistema de alimentación
$h_1$	Altura de salida de la colada del sistema de alimentación
$^{\circ}K$	Temperatura en grados Kelvin (absoluta)
$m$	Masa de la moldura
$Mg$	Magnesio
$O_2$	Oxígeno molecular
$Q$	Caudal
$R$	Constante universal de los gases
$Re$	Número de Reynolds
$S_o$	Sección transversal de la entrada del sistema de alimentación
$S_1$	Sección transversal a la salida del sistema de alimentación
$Si$	Silicio
$T$	Temperatura de interés (la de vaciado)
$T_o$	Temperatura de fusión del metal líquido
$t$	Tiempo de llenado
$v$	Velocidad de colado
$\mu$	Viscosidad dinámica a la temperatura de interés

$\mu_o$	Viscosidad dinámica a la temperatura de fusión
$\gamma$	Peso específico a la temperatura de interés
$V$	Volumen de la moldura

## LISTA DE ABREVIACIONES

<i>ASM</i>	American Society for Materials
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CEDAL</i>	Corporación Ecuatoriana de Aluminio
<i>CNC</i>	Computer Numerical Control
<i>Pv</i>	Presión de vapor

## **LISTA DE ANEXOS**

- ANEXO 1:** Cálculo de carga para la aleación de aluminio ASTM 355
- ANEXO 2:** Cálculo de carga para la aleación de aluminio ASTM 40E
- ANEXO 3:** Composición química de la aleación de aluminio ASTM 355
- ANEXO 4:** Composición química de la aleación de aluminio ASTM 40E
- ANEXO 5:** Plano del molde metálico

## RESUMEN

Se ha realizado el Desarrollo Tecnológico para la Fundición en Troquel de las Aleaciones de Aluminio ASTM 355 (Al-Si) y ASTM 40E (Al-Zn). Con el propósito de obtener datos relacionados con la influencia de la composición química sobre las propiedades mecánicas en las aleaciones antes citadas, se realizaron ensayos normalizados de Espectrometría, Dureza, Impacto, Tensión y Metalográficos (índice de tamaño de grano y porosidad) en 10 probetas de cada tipo de aleación.

Para obtener las probetas de ensayo de tensión con la forma y dimensiones bajo norma ASTM E 8, se diseñó y construyó un molde metálico (hecho de fundición gris) mediante el proceso de mecanizado por Control Numérico. Las barras fundidas fueron sometidas a Tratamiento Térmico de Precipitación.

Los ensayos mecánicos y metalúrgicos demostraron que las probetas de ambos tipos de aleaciones alcanzaron su resistencia máxima para un tiempo de solidificación de 3 minutos dentro del molde metálico. Adicionalmente, la aleación de aluminio ASTM 40E (Al-Zn) no requiere de tratamiento térmico alguno, pues alcanza su máxima resistencia en condiciones de fundido en molde metálico, superando significativamente las propiedades mecánicas de barras fundidas en arena.

Los resultados obtenidos indican que la aleación de aluminio ASTM 355 (Al-Si) encontraría aplicaciones en la elaboración de matrices para inyectar plástico, cuerpos para bombas, pistones para compresores, mientras que la aleación de aluminio ASTM 40E (Al-Zn) podría usarse principalmente como revestimiento superficial para protección anticorrosiva del acero y también para elaborar matrices para inyectar plástico.

## SUMMARY

The present investigation concerns the technological development for the Die Casting in Aluminum Alloys ASTM 355 (Al-Si) and ASTM 40E (Al-Zn). In order to obtain data related to the influence of chemical composition on the mechanical properties in alloys above, standard tests were performed Spectrometry, Hardness, Impact, Stress and Metallographic (index grain size and porosity) in 10 specimens of each alloy type.

For the tensile test specimens with the shape and dimensions under ASTM E 8, was designed and built a metal mold (made of cast iron) through the process of Numerical Control machining. The cast bars were subjected to Precipitation Heat Treatment.

The mechanical and metallurgical testing showed that of both types of alloys, reached their maximum strength for a setting time of 3 minutes into the metal mold. Additionally, ASTM 40E aluminum alloy (Al-Zn) requires no heat treatment it reaches maximum strength in terms of die cast metal, significantly exceeding the mechanical properties of bars cast in sand.

The results indicate that aluminum alloy ASTM 355 (Al-Si) find applications in the production of dies for plastic injection, body pump, piston compressors, while the ASTM 40E aluminum alloy (Al-Zn) could be used mainly as a surface coating for corrosion protection of steel to make molds for plastic injection.

# CAPÍTULO I

## 1 GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La conformación de piezas por fundición de metales consiste en obtener una pieza introduciendo metal en estado líquido en un recipiente con la forma adecuada, llamado molde.

El recipiente puede ser de arena y en este caso el proceso de obtención del molde se denomina moldeo en arena; o el recipiente puede ser metálico y en este caso se llama coquilla.

Este procedimiento de conformación de piezas por fundición de metales se aplica para obtener, principalmente, piezas de gran tamaño y formas complicadas, como por ejemplo: bancadas para máquinas herramientas, culatas para motores de explosión, hélices para buques, campanas, etc.

En este trabajo se utilizará la técnica del **MOLDEADO EN MOLDE METÁLICO** por gravedad.

En la fundición en **MOLDE METÁLICO**, a veces llamada **FUNDICIÓN POR GRAVEDAD**, un molde metálico consiste en dos o más partes que se usan para la fundición repetida de muchas piezas de la misma forma. El metal líquido ingresa al molde por acción de la gravedad.

La fundición en molde permanente es particularmente conveniente para un alto volumen de producción de fundiciones con espesores de pared uniformes. El proceso también puede ser utilizado para producir fundiciones de forma compleja, pero las cantidades de producción deben ser bastante altas para justificar el coste de los moldes.

La fundición en molde permanente permite la producción de fundiciones más uniformes, con tolerancias dimensionales exactas, superior acabado superficial y elevadas propiedades mecánicas.

Las piezas fundidas por esta técnica, tienen una estructura de grano más fino y son más resistentes que las piezas fundidas en moldes de arena, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida. Además, las piezas fundidas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidad que las piezas fundidas en arena [29].

Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño, y para piezas complejas puede resultar caro, difícil o imposible fundirlas por este método [21].

Como material para el molde metálico se emplea normalmente hierro fundido. La fundición en coquilla de metales de alta densidad no férricos es más difícil que la de los metales ligeros, debido a que los primeros tienen altos puntos de fusión. La viscosidad y capacidad de conducción del calor son menores, el enfriamiento es más rápido que en el metal ligero. La disminución del enfriamiento, se puede controlar mediante el revestimiento del molde.

## **1.2 ANTECEDENTES**

El aluminio es uno de los materiales más abundantes de la tierra ya que constituye aproximadamente el 8% de su corteza, ocupando el tercer lugar en abundancia y sólo el silicio y el oxígeno lo superan.

El aluminio y sus aleaciones son materiales que destacan por su ligereza y resistencia a la corrosión, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica.

Las propiedades mecánicas del aluminio puro son bastante moderadas, pero aleado con otros elementos, éstas se mejoran notablemente.

Si se comparan la resistencia o la rigidez específica (en relación con la densidad) las aleaciones de aluminio son más ventajosas que los aceros en determinadas aplicaciones (aeronáutica, vehículos, piezas a grandes aceleraciones).

Estas cualidades, junto con la gran aptitud para la conformación (deformación en frío, forja, moldeo, extrusión, mecanizado), han convertido a las aleaciones de aluminio en el segundo grupo de materiales metálicos más empleados [23].

Se han desarrollado aleaciones de aluminio que ofrecen cualidades de fundición tales como, fluidez y colabilidad, además de propiedades tales como solidez, ductilidad y resistencia a la corrosión. Por lo tanto, tienen composiciones químicas muy diferentes a las de forja.

El silicio, en el rango del 5 al 12% aproximadamente, es el elemento de aleación más importante en las aleaciones de aluminio de fundición pues aumenta la fluidez del metal fundido y la colabilidad dentro del molde. El magnesio en el rango del 0.3 al 1% se adiciona para incrementar la resistencia, sobre todo mediante el endurecimiento por precipitación durante el tratamiento térmico. El cobre, en el rango del 1 al 4% aproximadamente, se añade también a algunas aleaciones de aluminio de fundición para aumentar la resistencia, sobre todo a altas temperaturas. Asimismo, otros elementos de aleación, como el zinc, estaño, titanio y cromo, se agregan a algunas aleaciones de aluminio de fundición [1].

En la Escuela de Ingeniería Mecánica, se han realizado varios trabajos de investigación relacionados con la fundición en moldes metálicos, a pesar de lo cual, la información concerniente a este tema aún sigue siendo escasa.

El propósito de este trabajo de investigación es seguir ampliando la información que existe sobre el tema, tanto desde el punto de vista teórico así como del práctico, y ponerlo a disposición de quienes lo requieran.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La fundición en moldes metálicos es uno de los procedimientos para obtener molduras de elevada precisión y calidad de la superficie. La importancia económica de emplear este procedimiento depende de la estabilidad y la estructura de las coquillas, del grado de mecanización y automatización, como también del carácter de la producción (en gran escala, en series y unitaria).

El ciclo de vida más corto de los productos y la mejora considerable de las características de las aleaciones basadas en aluminio para fabricar moldes hace que el acero ya no sea el material indiscutible para inyectar piezas de plástico.

Para inyección-soplado y prototipos, hace tiempo que los moldes se construyen con aluminio, pero este material está ganando adeptos para muchas otras aplicaciones [2].

El material con que se construyen los moldes siempre ha debido cumplir unas exigencias muy estrictas e incompatibles la mayoría de las veces: extremadamente duro y muy resistente al desgaste y a la corrosión, fácilmente mecanizable, estable dimensionalmente y con buena conductibilidad térmica para evacuar el calor [21]

En este trabajo de investigación asumiremos la tarea de desarrollar una tecnología adecuada para el proceso de fundición en troquel de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E, con el propósito de elaborar y obtener probetas fundidas con la menor cantidad de porosidad y asegurar un material adecuado para fabricar moldes de inyección de plástico, claro está, seleccionando los datos e información general de varias fuentes relacionadas con este tema de estudio.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar el procedimiento de fabricación de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E y su tecnología de fundición en troquel.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el proceso de fundición y fabricación de moldes metálicos para colado de aleaciones de aluminio.
- Conocer los factores importantes que influyen en la selección de parámetros para la producción de aleaciones de aluminio de fundición.
- Diseñar los componentes de un molde.
- Analizar y preparar las cargas adecuadas para obtener las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E.
- Determinar el tiempo de solidificación de la pieza en el molde metálico.

- Determinar mediante ensayos las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E (Sy, Sut, Impacto, HB, Porosidad).
- Desarrollar el procedimiento adecuado para la fundición en troquel de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E con porosidad mínima controlada.

## CAPÍTULO II

### 2 ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones metálicas se pueden dividir en dos grandes grupos: ferrosas y no ferrosas. Las primeras son aquellas que tienen como elemento principal al hierro y las segundas, a elementos diferentes del hierro como constituyente principal.

El grupo de las aleaciones ferrosas está formado principalmente por el acero y las fundiciones, mientras que el de las no ferrosas está formado por las aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo y zinc.

En el presente trabajo se ha tomado en consideración las aleaciones no ferrosas basadas en aluminio, pues éste es el material de mayor uso en la actualidad (reemplazando incluso al acero) en muchas aplicaciones de ingeniería debido, principalmente, a su baja densidad.

A continuación se describen las principales características del aluminio y de sus aleaciones y sus principales aplicaciones ingenieriles.

#### 2.2 ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio es el tercer elemento más abundante sobre la Tierra (después del oxígeno y del silicio), pero, hasta finales del siglo XIX, era costoso y difícil de producir [4].

Éste posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil en ingeniería. Tiene una densidad baja ( $2.7 \text{ gramos/cm}^3$ ), que le confiere una utilidad particularmente importante para el transporte de productos manufacturados. También, tiene buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos naturales debido a la película de óxido que se forma en su superficie [1].

El aluminio se puede conformar con facilidad, tiene una elevada conductividad eléctrica y térmica, y a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil. No es tóxico y se puede reciclar mediante sólo el 5% de la energía que fue necesaria para su fabricación a partir de la alúmina. Esta es la razón por la cual tiene tanto éxito el reciclaje del aluminio. Las propiedades físicas benéficas del aluminio incluyen un comportamiento no magnético y su resistencia a la oxidación y a la corrosión [4].

Ciertas aleaciones al aluminio tienen mejor proporción resistencia/peso que la de los aceros de alta resistencia. Una forma de aluminio ultra puro se utiliza para reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de alta reflectividad a la luz y de no decoloración superficial. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica, como cajas para barras conductoras o cubierta para equipo eléctrico.

Aunque la conductividad eléctrica del aluminio de la clase conductor eléctrico (EC) es como el 62% que la del cobre, su peso ligero lo hace más apropiado como conductor eléctrico para muchas aplicaciones industriales.

El aluminio puro tiene una resistencia tensil de unos 13000 psi, sin embargo, grandes incrementos en resistencia se obtienen mediante el trabajado en frío o por aleación. Algunas aleaciones, adecuadamente tratadas en forma térmica, se aproximan a resistencias tensiles de 100000 psi. Sin embargo, el aluminio no exhibe un límite de resistencia a la fatiga verdadero, por lo que en algún momento, incluso a esfuerzos reducidos, puede ocurrir la falla debido a la fatiga [3].

Debido a su bajo punto de fusión, el aluminio no funciona bien a temperaturas altas. Además, las aleaciones de aluminio tienen dureza baja y, en consecuencia, su resistencia al desgaste es pobre. El aluminio muestra una buena respuesta a los mecanismos de endurecimiento. Sus aleaciones pueden llegar a ser hasta 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

La Tabla 2.1 compara la resistencia de aluminio puro recocido con la de aleaciones endurecidas mediante varias técnicas.

**Tabla 2.1:** EFECTO DE LOS MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES [4].

<b>Material</b>	<b>Resistencia a la tensión (psi)</b>	<b>Resistencia de cedencia (psi)</b>	<b>% de elongación</b>	<b>Relación de la resistencia de cedencia de la aleación del metal puro</b>
Aluminio puro	6500	2500	60	1
Aluminio puro comercial (por lo menos 99% puro)	13000	5000	45	2
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16000	6000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24000	22000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42000	22000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83000	73000	11	29.2

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajado; se puede fundir mediante cualquier método conocido, laminado a cualquier espesor deseado, estampado, estirado, enrolado, forjado y extruido a casi cualquier forma imaginable.

El aluminio comercialmente puro, aleación 1100 (99.0 + % de aluminio), es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o gran resistencia a la corrosión (o ambas) y en las que no se necesita alta resistencia. Se ha utilizado ampliamente en utensilios para cocina, varios componentes arquitectónicos, equipo de manejo y almacenamiento de alimentos y agentes químicos, así como en ensamblajes soldados [3].

Aproximadamente el 25% del aluminio que se produce hoy en día se utiliza en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas para bebidas y otros empaques, el 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones [4].

### 2.3 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ALUMINIO Y DE SUS ALEACIONES

La alta resistencia a la corrosión del aluminio se debe a la autoprotectora, delgada e invisible película de óxido que se forma inmediatamente al exponer las superficies a la atmósfera. Esta película protege al metal de posterior corrosión. Si se elimina la película de óxido en muchos ambientes, una nueva película se formará de inmediato y el metal permanecerá totalmente protegido.

Si se coloca el metal dentro de una solución acuosa que contenga de 15 a 25% de ácido sulfúrico, se puede producir una película de óxido relativamente gruesa sobre el aluminio y sus aleaciones. Este proceso, conocido como anodizado, produce una película clara y transparente que contiene poros submicroscópicos generalmente sellados antes de usarse, para evitar la absorción y que se manche el aluminio [3].

### 2.4 SISTEMA DE DESIGNACIÓN DE LAS ALEACIONES PARA FUNDICIÓN

Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grupos principales: aleaciones para forja y aleaciones para fundición, dependiendo de su método de fabricación.

En este trabajo sólo se considerarán las aleaciones de aluminio para fundición.

La Tabla 2.2 muestra la designación para las aleaciones de aluminio para fundición.

**Tabla 2.2:** DESIGNACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN [4].

<b>Aleaciones para fundición:</b>		
1xx.x	Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento (algunas)
4xx.x	Al-Si	No endurecible por envejecimiento
5xx.x	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
7xx.x	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento

## 2.5 DESIGNACIÓN DE TEMPLE

Esta designación se basa en las secuencias de los tratamientos térmicos básicos utilizados para producir los diversos temple.

El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico. Excepto para los temple en condición de recocido y aquellos en condición de fabricado sin tratamiento térmico se definen más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro temple básicos: **F**, condición de fabricado; **O**, recocido; **H**, endurecido por deformación y **T**, tratado térmicamente.

La Tabla 2.3 recoge las características más importantes de este sistema de designación.

**Tabla 2.3:** DESIGNACIONES DE TEMPLE PARA ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS [4].

**T:** Endurecida por envejecimiento

**T1:** Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.

**T2:** Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente.

**T3:** Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.

**T4:** Tratada por solución y envejecida naturalmente.

**T5:** Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.

**T6:** Tratada por solución y envejecida artificialmente.

**T7:** Tratada por solución y estabilizada por sobre-envejecimiento.

**T8:** Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

**T9:** Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.

**T10:** Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.

## 2.6 ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO-MAGNESIO

El magnesio y el silicio se combinan para formar un compuesto siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ), que a su vez forma un sistema eutéctico simple con aluminio.

La Figura 2.1 muestra la porción rica en aluminio del sistema Al-  $Mg_2Si$ ; es la precipitación del  $Mg_2Si$  después del envejecimiento artificial (temple T6), el cual permite que estas aleaciones alcancen su resistencia total.

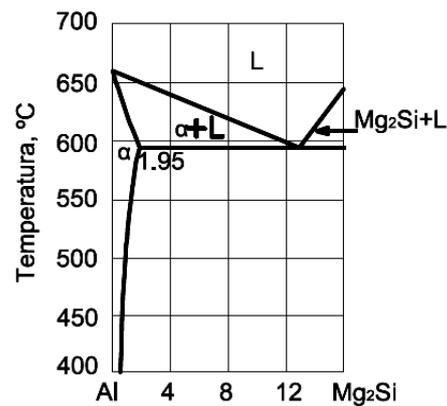


Figura 2.1: Diagrama de equilibrio Al-Mg<sub>2</sub>Si [3].

Estas aleaciones se caracterizan por la excelente resistencia a la corrosión y se pueden trabajar más que otras, tratables térmicamente. Entre las aplicaciones típicas se incluyen mallas de refuerzo en pistas de aterrizaje para aviones, canoas, muebles, tubería para aspiradora, pasamanos para puentes, y aplicaciones arquitectónicas.

Las aleaciones de fundición aluminio-silicio-magnesio 355, 356 y 360 proporcionan una deseable combinación de capacidad de fundido, aguante a fugas de presión, resistencia en general y resistencia a la corrosión. En la condición de tratamiento térmico, sus propiedades mecánicas se aproximan a las de las aleaciones aluminio-cobre. Se usan ampliamente con fines aeronáuticos, en piezas para máquina-herramienta y en piezas fundidas para propósitos generales [3].

## 2.7 ALEACIONES ALUMINIO-ZINC

La Figura 2.2 muestra la porción rica en aluminio del sistema de aleación aluminio-zinc.

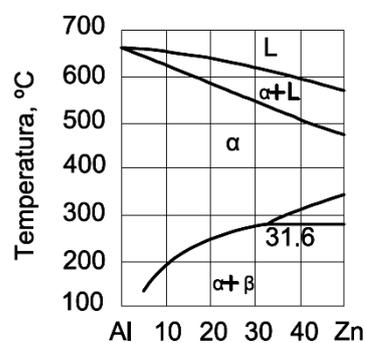


Figura 2.2: Diagrama de equilibrio Al-Zn [3].

La solubilidad del zinc en aluminio es del 31.6% a 275 °C, disminuyendo hasta 5.6% a 125 °C. Mediante la adición de cromo y el tratamiento térmico adecuado, la susceptibilidad de estas aleaciones a la corrosión por esfuerzo se ha minimizado. Tienen aplicaciones en las que se requiere alta resistencia en general y buena resistencia a la corrosión, tales como piezas de estructuras para aviones.

La aleación de fundición aluminio-zinc, conocida como 40E, que contiene 5.5% de zinc, 0.6% de magnesio, 0.5% de cromo y 0.2% de titanio, proporciona altas propiedades mecánicas sin tratamiento de solución. Esta aleación también tiene regulares características de fundición, buena resistencia a la corrosión y muy buena maquinabilidad. Se emplea en accesorios para avión, cubiertas para torres y equipo de radio [3].

## **2.8 ALEACIONES DE ALUMINO PARA FUNDICIÓN**

### **2.8.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN**

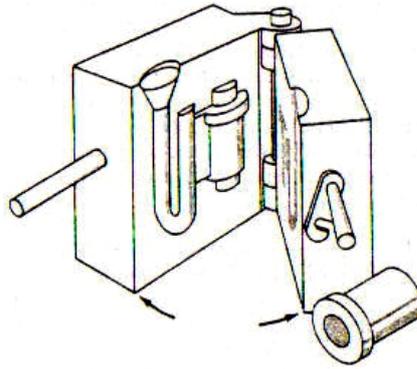
Las aleaciones de aluminio normalmente se moldean en arena y en molde permanente.

La *fundición en arena* es el más sencillo y el más versátil entre los procesos de fundición de aluminio.

El proceso de piezas moldeadas en arena se elige normalmente para la producción de cantidades pequeñas de piezas moldeadas idénticas, para piezas moldeadas complejas con núcleos complicados, para grandes piezas moldeadas y para piezas moldeadas estructurales.

En la *fundición en molde permanente* se vierte el metal fundido en un molde metálico permanente bajo gravedad, baja presión o presión centrífuga solamente.

La Figura 2.3 muestra un molde permanente abierto.



**Figura 2.3:** Molde permanente de fundición [1].

Las piezas moldeadas de la misma aleación y forma producidas por un molde permanente tienen una estructura de grano más fino, y son más resistentes que las piezas moldeadas en moldes de arena.

La velocidad de enfriamiento (más rápida) de las piezas moldeadas en molde permanente produce una estructura de grano más fino. Además, las piezas moldeadas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidades que las piezas moldeadas en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño y para piezas complejas puede resultar difícil o imposible la fundición en un molde permanente.

Las dos partes de la matriz de metal se cierran de forma segura para poder resistir la fundición a alta presión. El aluminio fundido es obligado a repartirse por las cavidades de la matriz. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices se desbloquean y se abren para extraer la pieza caliente recién moldeada. Las dos partes de la matriz se vuelven a cerrar y el ciclo se repite de nuevo.

Algunas ventajas de la fundición en coquilla son: (1) las piezas moldeadas a presión están casi completamente acabadas y pueden producirse a ritmo alto; (2) las tolerancias dimensionales de cada parte de la pieza moldeada pueden mantenerse más cercanas que con otros procesos de piezas moldeadas; (3) en las fundiciones es posible la obtención de superficies tersas; (4) un rápido enfriamiento de las piezas moldeadas produce una estructura de grano fino, y (5) el proceso puede automatizarse fácilmente [1].

## 2.8.2 ALEACIONES PARA FUNDICIÓN

Muchas de las aleaciones de aluminio comunes para fundición contienen suficiente silicio para provocar una reacción eutéctica, lo que da bajos puntos de fusión, buena fluidez y buena colabilidad para fundiciones.

El silicio en un rango entre el 5 al 12% es el elemento de aleación más importante dentro de las aleaciones de aluminio para fundición, ya que promueve un aumento de la fluidez en los metales fundidos y de su capacidad de alimentación en los moldes, además de servir como refuerzo al aluminio.

La adición de manganeso, en un porcentaje entre el 0.3 y el 1%, aumenta la resistencia, principalmente mediante reforzamiento por precipitación a través de un tratamiento térmico.

En algunas aleaciones de aluminio para fundición también se añade cobre, en una porción comprendida entre el 1 y el 4%, con el fin de aumentar la resistencia, especialmente a temperaturas elevadas. También se añaden a algunas aleaciones de este tipo otros elementos de aleación como zinc, estaño, titanio y cromo.

## 2.5 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACION DE ALUMINIO

### ASTM 355 [17]

1. **Composición:** (5% Si, 1.3% Cu, 0.5% Mg)
2. **Nombre comercial:** aleación 355 (fundición en arena y en molde permanente)
3. **Número ASTM:** B26, aleación SC51A (arena); B108, aleación SC51A (molde permanente).
4. **Números de designación:** QQ-A-601, clase 10 (arena); QQ-A-596, clase 6 (molde permanente).
5. **Otras designaciones:** SAE 322; AMS 4210, 4212, 4214, 4280, 4281.
6. **Densidad a 68 °F (20 °C):** 2.71 gramos/cm<sup>3</sup> (0.098 lb/cm<sup>3</sup>).
7. **Temperatura Liquidus:** 1150 °F (621 °C).
8. **Temperatura Solidus:** 1071 °F (545 °C).

9. **Propiedades mecánicas:** Véase la Tabla 2.4. Módulo de elasticidad, 10200000 psi; módulo de rigidez, 3800000 psi; coeficiente de Poisson, 0.33.

**Tabla 2.4: PROPIEDADES MECÁNICAS**

Fundición en Molde Permanente							
Condición	Esfuerzo de tensión psi	Esfuerzo de fluencia psi	Elongación %	Dureza BHN	Esfuerzo de Corte psi	Límite de fatiga psi	Esfuerzo de fluencia a compresión psi
T51	30000	24000	2	75	24000	.....	24000
T6	42000	27000	4	90	34000	10000	27000
T62	45000	40000	1.5	105	36000	10000	40000
T7	40000	30000	2	85	30000	10000	30000
T71	36000	31000	3	85	27000	10000	31000

10. **Límites de composición:** Véase la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5: LÍMITES DE COMPOSICIÓN**

Forma	Designación	Componentes			Máx. impurezas					Otras	
		Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	cada una	total
Fundición en Molde Permanente	QQ-A-596	4.5	1	0.4	0.8	0.5	0.35	0.25	0.25	0.05	0.15
		5.5	1.5	0.6							

11. **Consecuencias cuando los límites de impurezas exceden:** La ductilidad y la resistencia a la corrosión se ven afectadas por los altos contenidos de Fe y Ni, respectivamente. También reducen las propiedades mecánicas.
12. **Intervalos de temperatura de fundición:** en arena y en molde permanente, 1250 a 1450 °F (677 a 788 °C);
13. **Tratamientos térmicos:** Véase la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6: TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

<b>Fundiciones en Molde Permanente</b>				
Proceso	Temperatura		Tiempo hr	Enfriamiento
	°C	°F		
Precipitación, T51	224 a 230	435 a 445	7 a 9	No crítico
Tratamiento térmico de solución	524 a 529	975 a 985	8	Agua a 150 a 212 °F
Precipitación, T6	152 a 157	305 a 315	3 a 5	No crítico
Precipitación, T62	168 a 174	335 a 345	14 a 18	No crítico
Precipitación, T7	224 a 230	435 a 445	7 a 9	No crítico
Precipitación, T71	243 a 249	470 a 480	4 a 6	No crítico

## 2.10 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E [17]

1. **Composición:** (5.5% Zn, 0.6% Mg, 0.5% Cr, 0.2% Ti)
2. **Nombre comercial:** aleación 40E
3. **Número ASTM:** B26, Aleación ZG61A.
4. **Números de designación:** QQ-A-601, clase 17.
5. **Otras designaciones:** SAE 310.
6. **Densidad a 68 °F (20 °C):** 2.81 gramos/cm<sup>3</sup> (0.101 lb/cm<sup>3</sup>).
7. **Temperatura Liquidus:** 1140 °F (615 °C).
8. **Temperatura Solidus:** 1060 °F (572 °C).
9. **Propiedades mecánicas:** Esfuerzo de tensión, 35000 psi; esfuerzo de fluencia, 25000 psi; elongación ( para especímenes, ½ in de diámetro); BHN (carga, 500 kg; esfera, 10 mm), 75; módulo de elasticidad, 10300000 psi; valor de impacto (Charpy), 2 a 3 ft-lb; esfuerzo de corte, 26000 psi; límite de fatiga (basado en 500000000 ciclos, usando la máquina de viga rotatoria de R.R. Moore), 9000 psi; coeficiente de Poisson, 0.33; límite proporcional a la compresión, 14000 psi; esfuerzo a baja temperatura luego de 24 hr a -94 °F, esfuerzo de tensión, 38400 psi y elongación, 5%.
10. **Límites de composición química:** (QQ-A-601, clase 17), componentes: 5 a 7 Zn; 0.5 a 0.65 Mg; 0.4 a 0.6 Cr; 0.1 a 0.25 Ti; máx. de impurezas: 0.3 Cu; 1 Fe; 0.3 Si; 0.30 Mn; otras (cada una) 0.05, (total) 0.25.

## 2.11 TECNOLOGÍA DE LOS MOLDES PARA FUNDICIÓN

### 2.11.1 NOCIONES GENERALES SOBRE EL MOLDE METÁLICO

La pieza fundida se obtiene al llenar con metal líquido la cavidad del *molde para fundición*, esperando su enfriamiento y endurecimiento posteriores.

La masa fundida vaciada en el molde, al enfriarse y endurecerse disminuye de volumen. Este fenómeno se denomina *contracción*. En aquellos sitios donde la pieza fundida será mecanizada por corte, es necesario tener un *sobreespesor* para el mecanizado, o sea, una capa de metal, que será eliminada durante el mecanizado. Por consiguiente, para obtener molduras con dimensiones determinadas, el modelo debe tener medidas mayores que la pieza fundida, para la magnitud de la contracción, y también los sobreespesores para el mecanizado [2].

### 2.11.2 ELABORACIÓN DEL MOLDE

Durante la colada, la masa fundida penetra en la cavidad del molde por los canales de colada. El sistema de canales por los cuales el metal llega al molde se llama *bebederos*. El sistema de bebederos se compone del canal de flujo ascendente (canal vertical), el atrapador de escoria y el alimentador, por el cual la masa fundida pasa al molde. Pertenece también al sistema de bebederos el respiradero. El respiradero sirve para la salida del aire y gases del molde y para controlar el llenado del molde.

Hallan amplia aplicación los *moldes metálicos* (coquillas), denominados *permanentes*. En estos moldes es posible fundir piezas de acero, hierro colado y aleaciones no ferrosas desde algunas decenas hasta miles de piezas. En moldes metálicos con más frecuencia se funden molduras de masa pequeña y media (hasta unas decenas de kilogramos) de aleaciones ligeras no ferrosas.

Las molduras obtenidas en moldes metálicos tienen una superficie limpia y una elevada exactitud de sus dimensiones. El empleo de moldes permanentes permite excluir la mezcla de moldeo, mejorar las condiciones de trabajo, mecanizar y automatizar la producción. Sin embargo, el costo de los moldes metálicos es bastante elevado, por eso éstos se emplean en la producción de grandes lotes y en gran escala [2].

### **2.11.3 PROCESO TECNOLÓGICO DE LA ELABORACIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS**

Se llaman *hornos de fundir* los equipos destinados para la fusión y recalentamiento de metales ferrosos, no ferrosos y sus aleaciones. Para las aleaciones no ferrosas se utilizan hornos eléctricos y hornos de reverbero.

El metal fundido (masa fundida) debe ser recalentado en el horno hasta una temperatura determinada, para que llene bien el molde de fundición. Después de la fusión y el recalentamiento, la masa fundida del horno se hecha a las cucharas de colada y se transporta a la sección de colada de los moldes. La masa fundida que se echa en el molde, transmite su calor al molde, se enfría y se solidifica. Luego de esto, las piezas fundidas son expuestas a limpieza y control.

Para obtener las estructuras y propiedades mecánicas requeridas y eliminar las tensiones internas, las molduras con frecuencia son expuestas a *tratamiento térmico*, calentamiento y enfriamiento en regímenes estrictamente prefijados (en tiempo y temperatura) en hornos térmicos. Después de esto, las piezas fundidas son expuestas nuevamente a limpieza y control [2].

## **2.12 FUNDICIÓN EN MOLDES METÁLICOS**

### **2.12.1 GENERALIDADES**

La fundición en moldes metálicos (coquillas) es uno de los procedimientos para obtener molduras de elevada precisión y calidad de la superficie. A diferencia de los moldes en arena, que se destruyen después de obtenerse la moldura, un mismo molde metálico se llena de metal desde varias centenas hasta unas cuantas decenas de miles de veces.

La cavidad del molde metálico puede ser elaborada con gran precisión y pequeña rugosidad de la superficie, por eso las molduras que se obtienen en ellos tienen dimensiones exactas y una superficie lisa.

La alta conductividad térmica del material del molde acelera considerablemente la solidificación y enfriamiento de la moldura, lo que en muchos casos influye favorablemente en sus propiedades mecánicas.

En comparación con la fundición en moldes de arena, la fundición en moldes metálicos aumenta la producción de molduras en 2-5 veces (con la misma superficie del taller), la producción de molduras útiles (a cuenta de la reducción de los sobreespesores para el maquinado de la moldura, los desechos), se reduce el precio de costo de las molduras y el gasto de mezcla de moldeo, se facilita la mecanización y automatización de la producción, mejoran considerablemente las condiciones de trabajo [2].

El ingreso del metal líquido al molde se lo puede hacer de tres maneras:

- Colado por Gravedad
- Colado Centrífugo y,
- Colado a Presión.

### **2.12.2 COLADO POR GRAVEDAD**

El colado por gravedad (*Permanent Mold Casting*) puede a su vez realizarse en forma directa o por centrifugación.

Un molde permanente es especialmente recomendable para un alto volumen de producción de pequeñas piezas, simples de fundir, con un espesor de pared regular y sin núcleos internos intrincados y complejos.

El proceso puede ser también usado para piezas moderadamente complejas, siempre y cuando la producción se justifique con el costo de construcción del molde.

Cuando las piezas a producir tienen forma compleja, en lo referente a lo intrincado de sus cavidades internas, suelen usarse machos de arena o yeso; en este caso, el proceso es llamado de fundición en moldes semipermanentes [13].

El proceso tecnológico para elaborar las molduras en coquilla consta de las siguientes operaciones:

1. Preparación de los moldes (limpieza, calentamiento, aplicación del revestimiento y pintura a la superficie útil).
2. Armado del molde (montaje de los machos en el molde, cerrado y fijación de las partes del molde).
3. Llenado del molde con metal líquido, solidificación de la moldura.
4. Extracción de las molduras del molde después del enfriamiento (apertura del molde con ayuda de mecanismos o a mano).
5. Desbarbado, limpieza y, de ser necesario, el tratamiento térmico de las molduras [2].

### **2.12.3 CARACTERÍSTICAS DE LA FUNDICIÓN EN MOLDE METÁLICO**

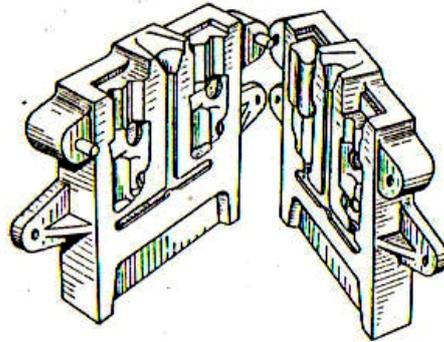
Las coquillas se elaboran de fundición, acero, aluminio y cobre. Las coquillas pequeñas y medianas se hacen de fundición y las grandes se hacen de acero.

La fundición gris para la elaboración de coquillas debe tener una estructura perlito ferrítica sin vestigios de cementita estructuralmente libre, puesto que al llenar el molde con metal líquido y su calentamiento en la fundición del molde pueden ocurrir transformaciones estructurales y, como consecuencia, la deformación del molde.

La cantidad de ferrita en la estructura no debe superar un 5-10%. La composición aproximada de esta fundición, en %, es: 3.4-3.6 de C; 1.8-2.2 de Si; 0.9-1 de Mn; 0.12-0.15 de P y 0.6-0.8 de S. Las piezas importantes de las coquillas se elaboran de aceros aleados, los machos metálicos de aceros de alto carbono.

Al fundir aleaciones de aluminio y magnesio, la superficie útil libre de la coquilla se mecaniza por corte, lo que aumenta la precisión y la finura de la superficie de las molduras, pero al mismo tiempo eleva su costo. Con frecuencia las coquillas pequeñas se elaboran por corte de piezas forjadas de acero.

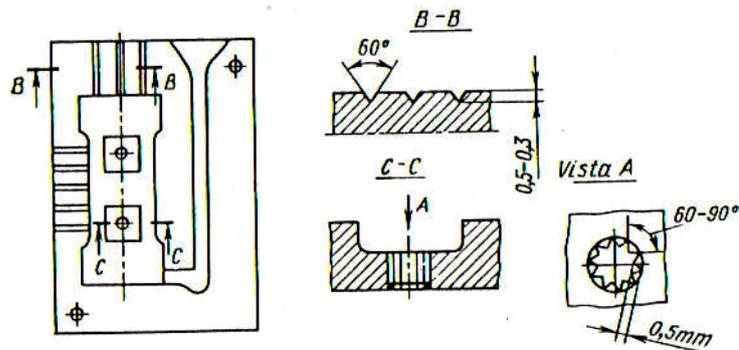
Las coquillas pueden ser enterizas y con plano de separación horizontal, vertical o complejo. Véase la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Molde metálico con plano de separación vertical [2].

Las coquillas con plano de separación vertical se emplean para molduras pequeñas de hasta 75 kg de masa, como también para molduras planas o de paredes delgadas con machos.

Al diseñar el molde metálico se debe prestar especial atención a la ventilación, o sea, a la evacuación de los gases del molde con ayuda de respiraderos y canales para la expulsión de gases (Figura 2.5).



**Figura 2.5:** Canales para la evacuación de gases en las coquillas [2].

**Canales para la evacuación de gases** se llaman los canales pequeños y estrechos de una profundidad no mayor de 0.3 mm, practicados en el plano de separación del molde.

A veces los canales para evacuar el gas se mecanizan en las paredes de las cavidades de trabajo para facilitar la salida del aire y gases a través de los lugares de unión de las diversas piezas de la coquilla [2].

### **2.13 FUNDICIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO**

Las aleaciones de aluminio se oxidan con facilidad durante la fusión, disuelven los gases y las impurezas nocivas.

En la superficie de la masa fundida se forma una capa resistente de óxidos, la cual protege a la misma de la oxidación posterior. La aleación puede contaminarse con óxido de aluminio, que no se disuelve en el aluminio fundido, éste puede ser eliminado sólo mediante el afino.

Las aleaciones de aluminio disuelven intensivamente los gases, principalmente el hidrógeno y, como resultado, en las molduras se crean porosidades. Por esta razón para la fusión de aleaciones de aluminio tiene gran importancia la elección correcta de los materiales de la carga y el grupo de fusión.

### **2.14 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN MOLDES METÁLICOS**

Las ventajas de la fundición en moldes metálicos son:

- Un mismo molde metálico puede llenarse de metal líquido desde varias centenas hasta unas cuantas decenas de miles de veces.
- La cavidad del molde metálico puede ser elaborada con gran precisión y pequeña rugosidad, lo que da como resultado dimensiones exactas y una superficie lisa.
- La alta conductividad térmica del material del molde acelera considerablemente la solidificación y enfriamiento de la moldura, lo que en muchos casos influye favorablemente en sus propiedades mecánicas.

Los inconvenientes de la fundición en moldes metálicos son:

- Un costo elevado de la elaboración de los moldes, por lo que este procedimiento de fundición no es racional para la producción unitaria.
- La posibilidad de templarse al aire las molduras de fundición y para remediarlo éstas deben ser expuestas al recocido.

- El tamaño máximo no ha sido establecido, por lo cual el proceso es prácticamente recomendable para la producción de pequeñas piezas.
- El proceso puede ser productivo en lo referente al precio por niveles bajos de producción.
- Algunas piezas no pueden ser construidas por la dificultad de su forma, puesto que la línea de partición no se halla con facilidad y presentan gran dificultades de dimensión de la pieza.

La racionalidad económica de emplear este procedimiento depende de la estabilidad y la estructura de las coquillas, del grado de mecanización y automatización, como también del carácter de la producción (en gran escala, en serie y unitaria).

Es racional la elaboración de molduras en coquilla, si se reducen los gastos para fabricar la pieza teniendo en cuenta el costo de la coquilla, los desechos del metal en virutas y el mecanizado por corte de la moldura.

La fundición en moldes metálicos es rentable con la condición de que se obtenga por cada molde no menos de 200-400 molduras medianas y 50-200 grandes [2].

## CAPÍTULO III

### 3 EXPERIMENTACIÓN

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Todos los metales y aleaciones exigen, para su fusión, procesos y materiales que respondan a ciertas exigencias intrínsecas de sus propiedades específicas: el aluminio y sus aleaciones, aunque tienen temperaturas de fusión y de colado inferiores a las de los metales a base de hierro o de cobre, no son la excepción.

En este capítulo se describen los procedimientos adecuados del cálculo de sistemas de alimentación para la fundición de aluminio y de sus aleaciones, el proceso de colado, así como el de ciertos ensayos (destrutivos y no destrutivos) que se realizan para determinar algunas de las propiedades mecánicas y metalúrgicas más importantes del aluminio y sus aleaciones.

#### 3.2 DISEÑO DEL MOLDE METÁLICO

El diseño significa un proceso innovador e iterativo. También, es un proceso de toma de decisiones. Algunas veces las decisiones se tienen que hacer con muy poca información, en ocasiones con apenas la cantidad adecuada, o con un exceso de información parcialmente contradictoria.

En este trabajo, por *Diseño* se entiende el cálculo, dimensionamiento y distribución apropiada de las medidas de una probeta estándar para ensayos de tracción, con el propósito de llevarlas sobre un material base, de modo que se pueda obtener una cavidad (molde) con la forma y dimensiones de dicha probeta.

### 3.2.1 DIMENSIONES DE LA PROBETA ESTÁNDAR PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

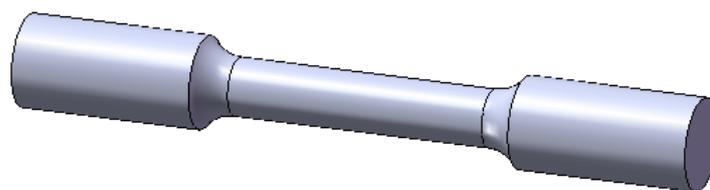
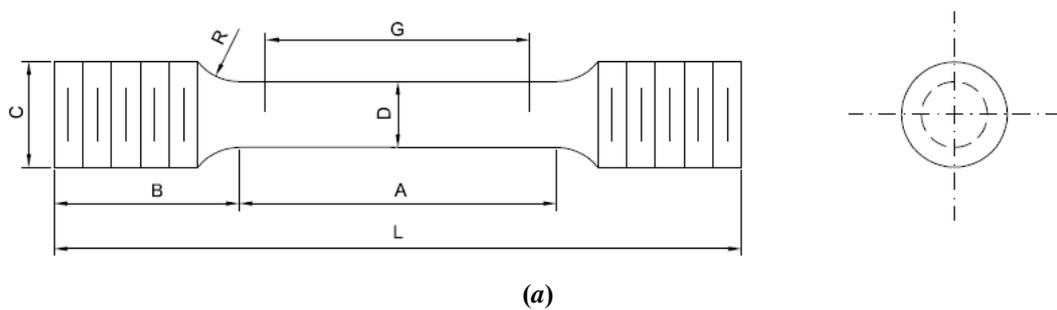
En el presente trabajo se realizará el diseño y construcción de un molde metálico para obtener probetas estándar, mismas que se utilizarán para realizar ensayos mecánicos (dureza, tracción e impacto) y metalúrgicos (microestructura, porosidad).

La Tabla 3.1 muestra las dimensiones de una probeta para ensayos de tracción, según lo establece la norma **ASTM E8**.

**Tabla 3.1:** DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA PROBETA PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN [20].

PARÁMETROS		Dimensiones (mm)
<b>G</b>	Longitud de ensayo	50
<b>D</b>	Diámetro	12,5
<b>R</b>	Radio de filete mínimo	10
<b>A</b>	Longitud de reducción de sección	60
<b>L</b>	Longitud total aproximada	125
<b>B</b>	Longitud final de sección	35
<b>C</b>	Diámetro final de sección	20

En la Figura 3.1 se muestran los parámetros dados en la Tabla anterior.



**Figura 3.1:** Probeta para realizar ensayos de tracción: (a) parámetros estándar [20], (b) vista tridimensional.

### 3.2.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PROBETA ESTÁNDAR TOMANDO EN CUENTA LOS EFECTOS DE CONTRACCIÓN

La *contracción* es la propiedad de los metales y aleaciones de reducir su volumen durante la solidificación y enfriamiento. Se acostumbra diferenciar las contracciones las contracciones lineal  $\varepsilon_{lineal}$  y de fundición  $\varepsilon_{fundición}$  [3].

#### 3.2.2.1 CONTRACCIÓN LINEAL

Se define como la disminución de las dimensiones (y por ende de su volumen) en un componente durante el enfriamiento.

La contracción lineal no se expresa en valor absoluto, sino en relativo mediante la ecuación siguiente:

$$\varepsilon_{lineal} = \left( \frac{l_m - l_p}{l_p} \right) \times 100\% \quad (3-1)$$

donde:

$l_m$  = dimensión lineal del molde de fundición, (mm)

$l_p$  = dimensión lineal de la pieza fundida a una temperatura de 20 °C después de la solidificación, (mm)

La contracción lineal no comienza desde el momento de la solidificación definitiva de la moldura, sino con cierta anterioridad, después de crearse un esqueleto bastante resistente de cristales que tienen contacto mutuo, capaz de resistir la presión de la aleación líquida.

Por consiguiente, la temperatura de inicio de la contracción lineal será la temperatura que se halla entre el liquidus y el solidus. Al elevar la intensidad del intercambio térmico (enfriamiento) la contracción lineal de la pieza fundida aumenta [3].

#### 3.2.2.2 CONTRACCIÓN DE FUNDICIÓN

Se llama contracción de fundición a la diferencia entre las dimensiones lineales del modelo y la de la moldura.

Se calcula mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{fundición} = \left( \frac{l_{modelo} - l_{moldura}}{l_{moldura}} \right) \times 100\% \quad (3-2)$$

donde:

$\varepsilon_{fundición}$  = contracción de fundición.

$l_{modelo}$  = dimensión lineal del modelo, (mm).

$l_{moldura}$  = dimensión lineal de la moldura, (mm).

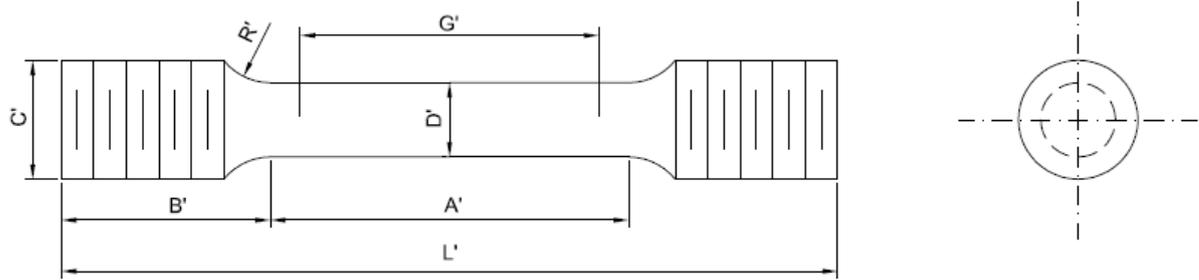
La contracción de fundición se diferencia de la contracción lineal (aunque generalmente se determina como la lineal) por el hecho de que la primera depende no sólo de las propiedades y el estado del metal y la aleación, sino también de la estructura de la moldura, la estructura del molde y algunos otros factores [3].

Para el respectivo cálculo y diseño del molde se debe tomar en cuenta la contracción del material a fundir cuando este se solidifica, la contracción del aluminio está dentro del rango del 6 al 7,5% [12].

La Tabla 3.2 muestra las dimensiones de la probeta para ensayo de tracción tomando en cuenta el porcentaje de contracción del aluminio (6%).

**Tabla 3.2:** DIMENSIONES DE LA PROBETA TOMANDO EN CUENTA LA CONTRACCIÓN.

Ecuación: <b>E' = 1,06xE</b>	Dimensiones (mm)
<b>G'</b>	53
<b>D'</b>	13.25
<b>R'</b>	10.6
<b>A'</b>	63.6
<b>L'</b>	132.5
<b>B'</b>	37.1
<b>C'</b>	21.2



**Figura 3.2:** Dimensiones de la probeta tomando en cuenta los efectos de contracción.

### 3.2.3 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PROBETA ESTÁNDAR TOMANDO EN CUENTA EL MECANIZADO

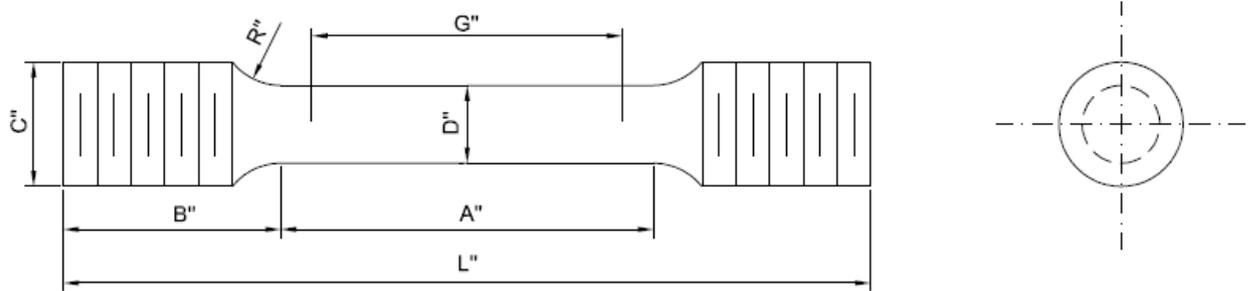
Se sabe que después de un proceso de colado, las piezas obtenidas generalmente presentan ciertos defectos superficiales tales como poros, contracciones e irregularidades (desniveles), mismos que proporcionan una imagen desagradable de las piezas.

Con el propósito de reducir significativamente los defectos antes mencionados, se procede a aumentar las dimensiones de la probeta en 1.5 mm, de manera que con los procesos de taller, tales como el limado y/o rectificado, sólo se disminuyan las dimensiones en 1.5 mm.

La Tabla 3.3 recoge las nuevas dimensiones.

**Tabla 3.3:** DIMENSIONES DE LA PROBETA TOMANDO EN CUENTA EL MECANIZADO.

Ecuación: $E'' = E' + 1.5$	Dimensiones (mm)
<b>G''</b>	54.5
<b>D''</b>	14.75
<b>R''</b>	12.1
<b>A''</b>	65.1
<b>L''</b>	134
<b>B''</b>	38.6
<b>C''</b>	22.7



**Figura 3.3:** Dimensiones de la probeta considerando el proceso de mecanizado.

Puesto que la construcción del molde metálico se realizará mediante procesos de CNC, no es necesario tomar en cuenta las dimensiones sugeridas en la Tabla 3.3, sino únicamente las que se muestran en la Tabla 3.2, ya que este proceso de mecanizado garantiza las dimensiones sugeridas por la norma.

### 3.2.4 CÁLCULO DE LA MAZAROTA

La mazarota o montante sirve para alimentar las partes gruesas de la moldura. Las mazarotas se disponen de tal manera que la masa fundida en ellas se solidifique en último término. Las mazarotas de grandes dimensiones no son convenientes desde el punto de vista económico, puesto que aumentan el gasto de metal y el costo de las molduras.

Al diseñar las mazarotas se siguen las siguientes reglas:

1. La mazarota debe solidificarse después de la parte de la moldura que se alimenta.
2. Las dimensiones de la mazarota deben ser suficientes para compensar la contracción de las molduras.
3. La altura de la mazarota debe ser tal, que toda la oquedad de contracción se disponga en ella sobre la garganta, en el lugar de unión con la moldura. La garganta debe ser lo más corta posible y lo mismo que la mazarota, debe solidificarse después de la moldura. Si la moldura tiene varios lugares de mayor espesor, separados con paredes finas, en cada uno de ellos debe disponerse una mazarota [12].

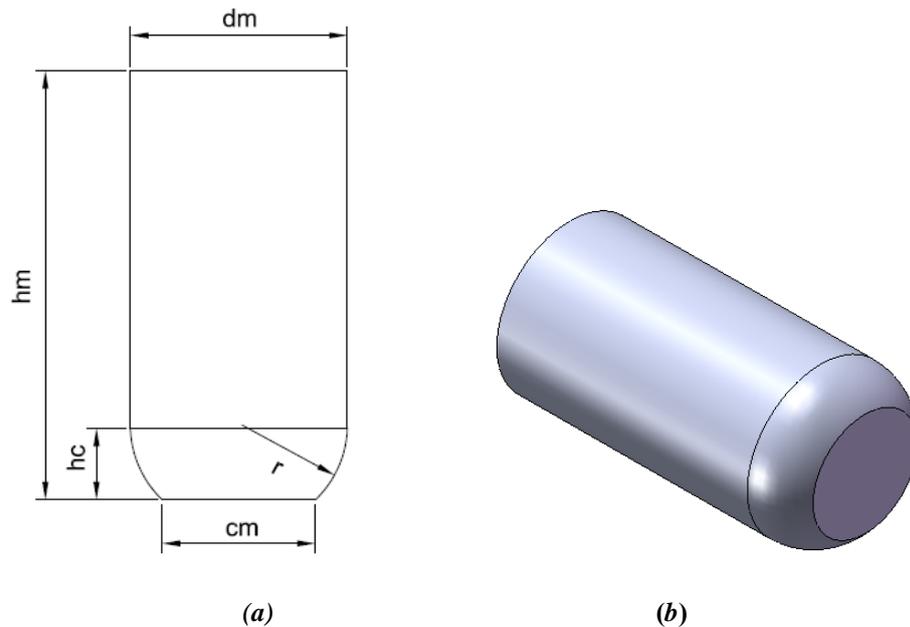
Con más frecuencia las mazarotas se emplean al fabricar molduras de acero y aleaciones no ferrosas. La sección del montante, en relación con el tipo de aleación, se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4:** DIÁMETRO DEL MONTANTE SEGÚN EL TIPO DE ALEACIÓN [12].

ALEACIÓN	Sección del montante
Fundición gris	1.075A*
Fundición perlítica con 15% de acero	1.100A
Bronce de maquinaria	1.150A
Fundición perlítica 20-25 % acero	1.200A
Latón 38 % Zinc	1.250A
Fundición perlítica 25-40 % acero	1.300A
Fundición perlítica 60 % y más	1.500A
Acero moldeado al carbono y aleado	1.600A
Aluminio	1.650A

\*A: sección transversal de la pieza colada

La Figura 3.4 muestra los parámetros que deben determinarse al diseñarse la mazarota.

**Figura 3.4:** Mazarota: (a) parámetros, (b) vista tridimensional.

Ahora bien, la sección del montante, según la Tabla 3.4, se obtiene de la siguiente manera:

$$S_{\text{montante}} = 1.650xA \quad (3-3)$$

donde:

$S_{\text{montante}}$  = sección del montante, ( $\text{mm}^2$ ).

$A$  = sección transversal de la pieza colada, ( $\text{mm}^2$ ).

Además:

$$A = 0.25x\pi(C')^2 \quad (3-4)$$

donde:

$C'$  = diámetro final de sección, ( $mm^2$ ). Véase la Tabla 3.2.

Reemplazando valores en (3-4), se obtiene:

$$A = 0.25x\pi(21.2)^2 \text{ mm}^2 = 353 \text{ mm}^2 \quad (3-5)$$

Llevando (3-5) a (3-3), se determina la sección del montante:

$$S_{\text{montante}} = 1.650(353) \text{ mm}^2 = 582.45 \text{ mm}^2 \quad (3-6)$$

El diámetro del montante está dado por:

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_{\text{montante}}}{\pi}} \quad (3-7)$$

Llevando (3-6) a (3-7), se obtiene el diámetro del montante:

$$d_m = \sqrt{\frac{4(582.45)}{\pi}} \text{ mm} = 27.23 \text{ mm} \quad (3-8)$$

Por seguridad y tomando en consideración la facilidad de mecanizado, se toma:

$$d_m = 30 \text{ mm} \quad (3-9)$$

Ahora se calcula la altura del montante, mediante la ecuación:

$$h_m = 2d_m \quad (3-10)$$

Llevando (3-8) a (3-9), se tiene:

$$h_m = 2(30) \text{ mm} = 60 \text{ mm} \quad (3-11)$$

Para calcular la altura del cuello del montante se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{d_m}{3} \quad (3-12)$$

Llevando (3-8) a (3-11), se determina:

$$h_c = \frac{30}{3} \text{ mm} = 10 \text{ mm} \quad (3-13)$$

Para calcular el cuello del montante se utiliza la siguiente ecuación:

$$c_m = 0.85d_m \quad (3-14)$$

Llevando (3-8) a (3-13), se determina:

$$c_m = (0.85 \times 30) \text{ mm} = 25.5 \text{ mm} \quad (3-15)$$

Para este trabajo, es más adecuado considerar que,  $c_m = C'$ , para evitar efectos de turbulencia, por lo tanto:

$$c_m = 21.2 \text{ mm} \quad (3-16)$$

Las ecuaciones anteriores, necesarias para el cálculo de los diferentes parámetros que se requieren en el dimensionamiento de la mazarota, fueron tomadas de la referencia [12].

En la Tabla 3.5 se resumen las dimensiones para la mazarota.

**Tabla 3.5:** DIMENSIONES DE LA MAZAROTA.

PARÁMETROS	Dimensiones (mm)
Diámetro del montante ( <i>dm</i> )	30
Altura del montante ( <i>hm</i> )	60
Altura de cuello del montante ( <i>hc</i> )	10
Diámetro del cuello del montante ( <i>cm</i> )	21.2
Acuerdo ( <i>r</i> ) (de los planos)	11.42

### 3.2.5 CÁLCULO DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN

Una de las condiciones más importantes para obtener molduras de calidad, es la correcta estructura del sistema de alimentación.

El sistema de alimentación sirve para el suministro suave de la masa fundida a la cavidad del molde para fundición y la alimentación de las molduras en el proceso de endurecimiento.

La elección del sistema de alimentación, que asegure la obtención de molduras de elevada calidad, es la parte más importante del diseño de la tecnología de fundición.

#### 3.2.5.1 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN

Un sistema de alimentación se compone principalmente de:

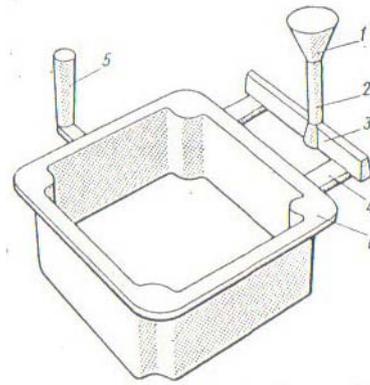
- *Un canal de colada vertical*
- *Los órganos de distribución* (canal y los accesos de colada) dispuestos en principio sobre un plano horizontal y que deben ser concebidos para retener las escorias que se pueden formar al final del canal de colada.

Un sistema de bebederos correctamente construido debe asegurar un buen llenado del molde con la masa fundida y la alimentación de la moldura en el proceso de su solidificación; contribuir a la obtención de una moldura de dimensiones exactas, sin defectos superficiales (atascamientos, oquedades, inclusiones de escoria y otros) y una solidificación dirigida de la moldura; el gasto de metal para el sistema de bebederos debe ser mínimo [2].

El estudio de la colada debe evitar todas las turbulencias del metal líquido y retener las impurezas accidentales para no introducir en el molde más que un metal físicamente sano [15].

### 3.2.5.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

En la Figura 3.5 se muestra una moldura de fundición con los bebederos.



**Figura 3.5:** Elementos de un sistema de alimentación: (1) embudo de colada, (2) canal vertical, (3) colector de escoria, (4) alimentador, (5) respiradero y, (6) moldura.

A los elementos de alimentación del sistema de bebederos pertenecen el embudo de colada *1*, el canal vertical *2*, el colector de escoria *3*, los alimentadores *4*. Estos elementos deben asegurar un gasto de metal fundido determinado, una velocidad determinada de su movimiento y atrapar la escoria.

1) **El embudo de colada** (para molduras pequeñas) o bacía de colada (para las molduras grandes), está destinado para recibir el chorro de masa fundida que se vierte de la cuchara (o desde un crisol) y para la retención de la escoria que penetra junto con el metal fundido a la bacía.

Durante la colada, la bacía de colada debe estar obligatoriamente llena. Al no ser suficientemente grande la profundidad de la masa fundida en la bacía, sobre el canal vertical se crea un embudo, a través del cual el aire y la escoria, que flota en la superficie del metal fundido, pueden penetrar en el canal vertical y por él a la moldura.

2) **El canal vertical** sirve para transmitir la masa fundida del embudo a los otros elementos del sistema de bebederos.

Este se hace algo más angosto abajo para la comodidad del moldeo y para crear la presión piezométrica positiva en el sistema de bebederos. La conicidad del canal está en el rango del 2 al 4%.

3) **El colector de escoria**, dispuesto en el plan horizontal, sirve para retener la escoria y transmitir la masa fundida del canal vertical a los alimentadores.

En el proceso de llenado del molde con la masa fundida, para una mejor retención de la escoria, el colector de escoria debe estar obligatoriamente llenado con masa fundida. Esto se logra con la relación correspondiente de las secciones del canal vertical, el colector de escoria y el alimentador.

Si el consumo a través del canal vertical es menor que a través de los alimentadores, el colector de escoria no está lleno y la escoria penetrará a la moldura. De esta manera, para retener la escoria, la sección del canal vertical debe ser mayor que la sección del colector de escoria, y la sección del colector de escoria mayor que la sección total de los alimentadores.

4) **Los alimentadores** (bebederos) son canales destinados para suministrar la masa fundida directamente a la cavidad del molde.

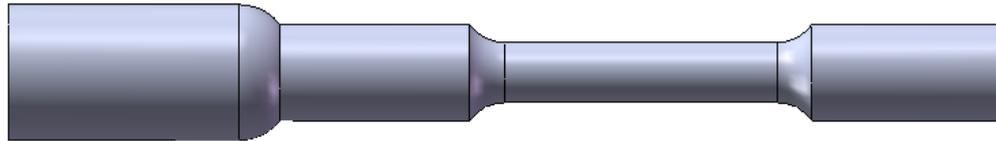
La sección de los alimentadores debe ser de una configuración tal que la masa fundida llegue suavemente a la cavidad del molde, se enfríe poco en el trayecto del colector de escoria a la moldura, y que después de su solidificación los alimentadores se quiebren con facilidad de la moldura.

5) **Los respiraderos** sirven para la evacuación de los gases de la cavidad del molde.

Éstos también disminuyen la presión dinámica del metal sobre el molde e indican el final de la colada. En dependencia de la magnitud del molde se emplean uno o varios respiraderos [2].

### 3.2.5.3 CÁLCULO DE LA MASA A FUNDIR

Con las respectivas dimensiones de la probeta (según Tabla 2.3), se procede a calcular el volumen (mazarota + probeta), obteniéndose un valor de  $82211.96 \text{ mm}^3$ . El valor del volumen se obtuvo con la ayuda del software *SolidWorks 2007*.



**Figura 3.6:** Vista frontal del conjunto (mazarota + probeta).

El valor de la masa a fundir se obtiene a partir de la ecuación:

$$m = \rho V \quad (3-17)$$

donde:

$m$  = cantidad de masa a fundir, (gr).

$\rho$  = densidad de la aleación de aluminio, ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

$V$  = volumen de la probeta, ( $\text{cm}^3$ ).

Recordando que la densidad de la aleación de aluminio ASTM 355 es algo menor que la densidad de la aleación ASTM 40E (véanse las secciones 2.9 y 2.10), se toma el valor de densidad de ésta última y se procede al cálculo de la masa a fundir:

$$m = 2.81 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times 82211.96 \text{ mm}^3 \left( \frac{1 \text{ cm}^3}{10^3 \text{ mm}^3} \right)$$

de donde:

$$m = 231 \text{ gr} \quad (3-18)$$

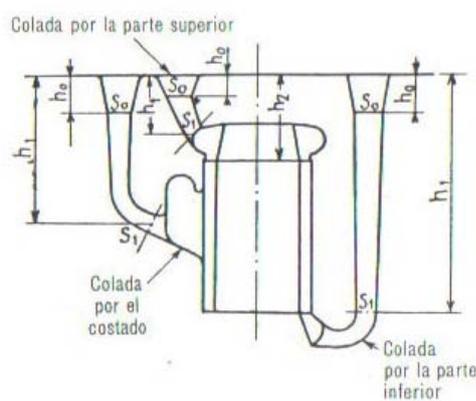
### 3.2.6 ALTURA Y SECCIÓN DE LOS CANALES

La altura del orificio de colada, por encima del punto superior de la pieza, varía con la forma de entrada y la misión que se exige al canal de colada. Puede ser reducida si la colada se hace lentamente por la parte superior.

En los moldes que se llenan por la parte inferior o por el costado, a veces está comprendida entre la altura de la pieza y el tercio de esta altura. En los moldes pequeños pocas veces se reducen las alturas por debajo de los 40 mm [15].

### 3.2.6.1 ENTRADA POR LA PARTE SUPERIOR

El colado por la parte superior se utiliza a menudo en el moldeo en coquilla, pues favorece una correcta solidificación.



**Figura 3.7:** Esquema para el cálculo de la velocidad media del metal, según la posición de la entrada [15].

Permite que las capas sucesivas del metal que rellenan el molde se solidifiquen sin esperar la terminación del llenado; cada capa es alimentada por otra que la recubre.

Un llenado lento es posible y a menudo ventajoso. La temperatura de colada puede ser baja. Se alcanza un porcentaje bajo de dimensiones para las secciones de los bebederos y las masas alimentadoras no es necesario que sean grandes.

El riesgo de la colada realizada por la parte superior consiste en realizarla bruscamente y provocar inclusiones de aire, porosidades con óxidos o repliegues de la superficie. Pero este riesgo se atenúa, generalmente, en el moldeo en coquilla [15].

El llenado por la parte superior es tanto más aceptable cuanto menor sea la altura de la pieza. El empleo de una taza permite verter el metal con cuidado a lo largo de una pared.

Para el canal de colada se escoge un trazado y una posición que eviten los rebotes del metal sobre las paredes.

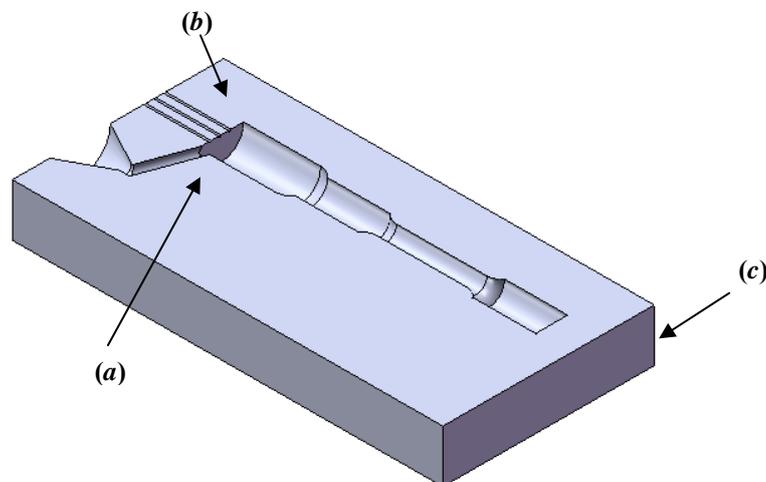
Se puede reducir la turbulencia y facilitar la salida del aire manteniendo la coquilla inclinada durante el llenado, de manera que el metal fluya en lugar de caer. El medio más seguro consiste en hacer bascular la coquilla. El molde se mantiene inclinado al principio del llenado, y se le endereza al final del mismo. En un molde inclinado o basculado, el canal de la colada debe estar, si es posible, en la prolongación de la superficie sobre la que colocará el metal [15].

Ahora que ya se conocen las dimensiones finales de la probeta (véase la Tabla 3.2), así como las de su montante (mazarota), es posible realizar el cálculo del sistema de alimentación para el molde metálico.

### 3.2.7 TIEMPO DE COLADO (LLENADO)

Jander [15] ha propuesto una simple regla para la elección de este tiempo de llenado. Según él, el tiempo óptimo  $t$  para un moldeo inferior a 10 kg sin comprender las cañas de colada depende de la aleación colada, del modo de acceso (por la parte inferior, por el costado o por la superior) y, sobre todo, del menor espesor  $e$  de pared de la pieza.

La Figura 3.8 muestra los parámetros que requieren calcularse para un molde.



**Figura 3.8:** Parámetros del molde a calcularse: (a) alimentador, (b) respiraderos, y (c) espesor.

La Tabla 3.6 indica el tiempo de llenado  $t$  (en segundos).

**Tabla 3.6:** TIEMPO ESTIMADO PARA EL COLADO SEGÚN EL MODO DE ACCESO [15].

Modo de acceso	Al-Si
Por la parte inferior	$t = e - 1$
Por el costado	$t = e$
Por la parte superior	$t = e + 1$

En este trabajo se eligió el colado por la parte superior del molde (por lo mencionado en el apartado anterior), se tiene:

$$t = e + 1 \quad (3-19)$$

donde:

$e$  = espesor de la pieza ( $e = D'$ ), (mm).

$t$  = tiempo de colado, (seg).

Reemplazando valores tenemos:

$$t = (13.25 + 1) \text{ seg} = 14.25 \text{ seg} \quad (3-20)$$

### 3.2.8 CAUDAL REQUERIDO

Del tiempo de llenado así elegido se deduce (conociendo ya el volumen de la pieza), el caudal medio de colada que fluirá entre el principio y el final de llenado. Esto permite calcular la sección pudiendo determinar la velocidad [15].

En Mecánica de Fluidos se demuestra que el caudal se obtiene de la expresión:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3-21)$$

Reemplazando valores:

$$Q = \frac{82211.96 \text{ mm}^3}{14.25 \text{ seg}} = 5769.26 \frac{\text{mm}^3}{\text{seg}} \quad (3-22)$$

### 3.2.9 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE COLADO

La velocidad del metal en la parte baja del canal de colada tiene por valor medio en el caso de la colada por la parte superior [15]:

$$v = 0.7\sqrt{2gh_1} \quad (3-23)$$

donde:

0.7 es un coeficiente empírico, que tiene en cuenta las pérdidas de carga.

$g$  = aceleración de la gravedad ( $mm/s^2$ ).

$h_1 = 40 \text{ mm}$  (altura sugerida). Véase la Fig.3.9.

Reemplazando valores, resulta:

$$\begin{aligned} v &= 0.7\sqrt{2 \times 9800 \times 40} \text{ mm/seg} = 619.806 \text{ mm/seg} \\ v &= 61.98 \text{ cm/seg} \end{aligned} \quad (3-24)$$

### 3.2.10 CÁLCULO DE LAS SECCIONES DE LOS ALIMENTADORES

Para obtener la sección de los alimentadores, se utiliza la Ecuación de Continuidad para un fluido, dada por:

$$Q = Av \quad (3-25)$$

donde:

$Q$  = caudal requerido, ( $mm^3/seg$ ).

$A$  = sección, ( $mm^2$ ).

$v$  = velocidad de colado, ( $mm/seg$ ).

#### 3.2.5.10 CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE SALIDA DEL ALIMENTADOR

Para calcular la sección de salida del alimentador,  $A_1$ , se determina:

$$A_1 = \frac{Q}{v} \quad (3-26)$$

Llevando (3-25) y (3-27) a (3-29), se determina:

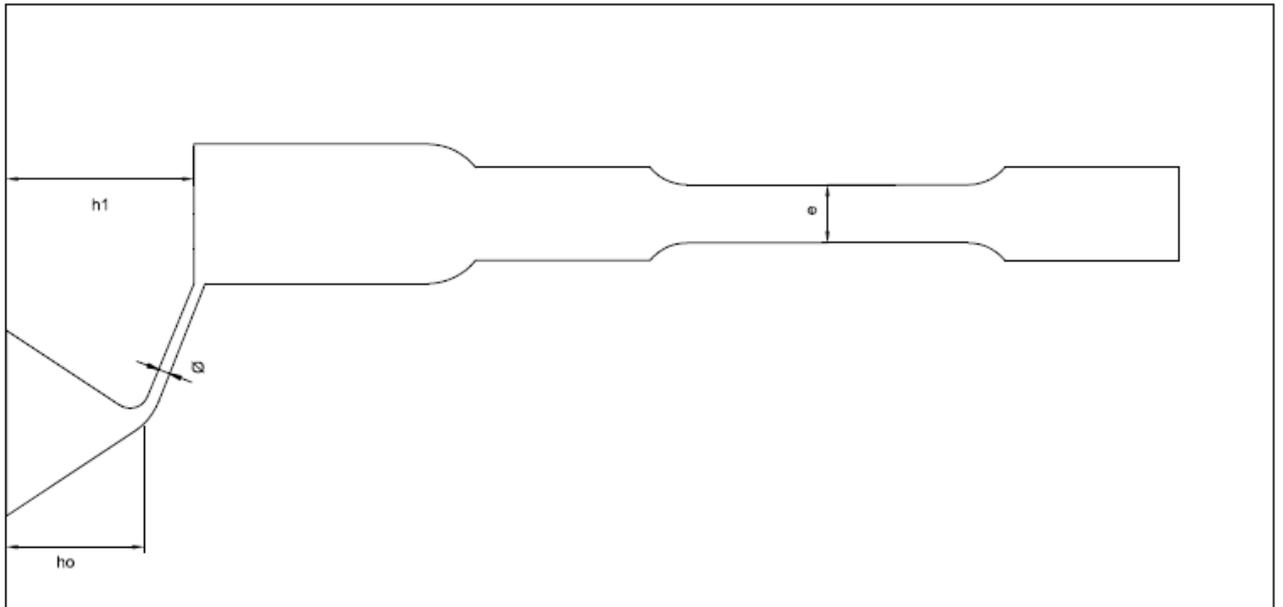
$$A_1 = \frac{5769.26}{619.806} \text{ mm}^2 = 9.308 \text{ mm}^2 \quad (3-27)$$

Ahora se puede calcular la sección correspondiente de la salida del alimentador:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} \quad (3-28)$$

Reemplazando (3-30) en (3-31), se halla:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4(9.308)}{\pi}} \text{ mm} = 3.44 \text{ mm} \quad (3-29)$$



**Figura 3.9:** Parámetros del sistema de alimentación:  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $\phi$  y  $e$ .

### 3.2.12 CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE ENTRADA DEL ALIMENTADOR

Jander [15] aconseja hacer variar la sección entre la parte baja del embudo y la parte baja del canal según la regla:

$$A_0 = A_1 \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (3-30)$$

En (3-33),  $h_0 = 30 \text{ mm}$  (véanse los planos),  $h_1 = 40 \text{ mm}$  y teniendo en cuenta (3-30), se tiene entonces:

$$A_0 = 9.308 \sqrt{\frac{40}{30}} \text{ mm}^2 = 10.747 \text{ mm}^2 \quad (3-31)$$

Ahora se puede calcular la sección correspondiente de la salida del alimentador:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} \quad (3-32)$$

Reemplazando (3-34) en (3-31), se halla:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4(10.747)}{\pi}} \text{ mm} = 3.699 \text{ mm} \quad (3-33)$$

Ahora bien, cuando se realiza el colado por gravedad, esta última no proporciona la suficiente presión para forzar el metal líquido hacia el interior del molde metálico cuando las secciones son menores o iguales a  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6.35 mm) [25].

El uso de diámetros de  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6.35 mm) para alimentadores, proporciona un flujo uniforme. Este diámetro es el necesario para obtener la presión mínima de entrada durante la primera etapa del colado [26].

Se ha determinado que para un diámetro de los alimentadores de 10 mm y una velocidad de entrada de 100 cm/seg, el número de Reynolds es cerca de 7900 en el caso de aleaciones de aluminio [26].

Tomando en consideración lo antes mencionado, se toma un diámetro para el alimentador de  $\phi = 8 \text{ mm}$ . Este valor de diámetro es aceptable, puesto que la velocidad de ingreso del metal líquido (11,47758 cm/seg) no supera el valor para el cual se producirá turbulencia (150 cm/seg).

La determinación del número de Reynolds se hace necesaria para verificar que lo mencionado anteriormente es correcto.

El número de Reynolds está dado por la ecuación:

$$\text{Re} = \frac{\rho v \phi}{\mu} \quad (3-34)$$

donde:

Re = número de Reynolds, (adimensional).

$\rho$  = densidad del fluido, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$v$  = velocidad del fluido, (m/s).

$\phi$  = diámetro por el cual circula el fluido, (m).

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido, ( $\text{Ns}/\text{m}^2$ ).

La densidad se evalúa a la temperatura de colado ( $750^\circ\text{C}$ ) mediante la ecuación [19]:

$$\rho = \rho_o + (T - T_o) \left( \frac{d\rho}{dT} \right) \quad (3-35)$$

donde:

$\rho_o$  = densidad del metal líquido a la temperatura de fusión  $T_o$ .

$T$  = temperatura de interés, en este caso, la de colado, ( $^\circ\text{K}$ ).

$\left( \frac{d\rho}{dT} \right)$  = variación de la densidad con respecto a la temperatura, ( $\text{kg}/^\circ\text{K} \cdot \text{m}^3$ ).

Reemplazando valores en (3-35), se halla el valor de la densidad:

$$\rho = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + (90^\circ \text{K}) \left( -0.28 \frac{\text{kg}}{^\circ\text{K} \cdot \text{m}^3} \right)$$

$$\rho = 2274.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3-36)$$

La viscosidad dinámica se evalúa también a la temperatura de colado (750 °C) mediante la ecuación [19]:

$$\mu = \mu_o \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (3-37)$$

donde:

$$\mu_o = 0.0001492 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}, \text{ (constante). Valor para el Al puro, siendo éste un valor}$$

bastante adecuado para las aleaciones de aluminio.

$$E = 16500 \frac{\text{J}}{\text{mol}}, \text{ (constante).}$$

$$R = 8.3144 \frac{\text{J}}{\text{°K.mol}}, \text{ (constante universal de los gases).}$$

$T$  = temperatura de interés, en este caso, la de colado, (°K).

Reemplazando valores en (3-37), se determina el valor de la viscosidad dinámica:

$$\mu = 0.0001492 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2} \cdot \exp\left(16500 \frac{\text{J}}{\text{mol}} * \frac{\text{°K.mol}}{8.3144\text{J}} * \frac{1}{1023\text{°K}}\right)$$

$$\mu = 0.0010381 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2} \quad (3-38)$$

La velocidad del metal líquido se determina de la Ecuación de Continuidad:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3-39)$$

donde:

$$Q = 0.000005769 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}, \text{ (de la ecuación 3.22).}$$

$$A = 0.000050265\text{m}^2, \text{ (para un diámetro de 8 mm).}$$

Reemplazando valores en (3-39), se encuentra el valor de la velocidad del metal líquido:

$$v = \frac{0.000005769}{0.000050265} \frac{m}{s} = 0.11477 \frac{m}{s} \quad (3-40)$$

Llevando los valores de las ecuaciones (3-36), (3-38) y (3-40) a la ecuación (3-34), se determina el valor del número de Reynolds:

$$Re = 2274.8 \frac{kg}{m^3} * 0.11477 \frac{m}{s} * 0.008m * \frac{m^2 \cdot s^2}{0.0010381kg \cdot ms}$$

$$Re = 2012 \quad (3-41)$$

El valor dado por (3-41) demuestra que el flujo del metal líquido es laminar. ( $Re < 2000$ , flujo laminar).

### 3.2.13 ESPESOR DE LAS PAREDES DEL MOLDE

El espesor del molde debe ser proporcional al de la pieza. Un molde demasiado estrecho y delgado sufre grandes variaciones de temperatura: se calienta fuertemente en cada llenado y se enfría rápidamente en cada desmoldeo.

Por el contrario, es inútil un espesor demasiado grande porque puede generar una gran inercia térmica (necesita un largo tiempo de enfriamiento a temperatura ambiente).

Se adopta un espesor medio comprendido, generalmente, entre el doble y el quintuple del de la pieza, a veces entre el triple y el cuádruple. Se toma al menos 15 mm; rara vez se superan los 60 mm.

Un molde cuyo espesor sea casi constante es más favorable para obtener una solidificación regular [15].

Tomando en cuenta los factores antes mencionados, para este trabajo se ha tomado en consideración un espesor para el molde de 3 veces el de la pieza a fundir.

Considerando en el mayor diámetro de la probeta y por seguridad, el espesor para cada parte del molde está dado por:

$$e_{molde} = 3 \left( \frac{C''}{2} \right) \quad (3-42)$$

Reemplazando valores:

$$e_{molde} = 3 \left( \frac{21.2}{2} \right) mm = 31.80 mm \quad (3-43)$$

Tomando en consideración el diámetro de la mazarota, el espesor del molde metálico será:

$$e_{molde} = 35 mm \quad (3-44)$$

dimensión que no afecta de forma considerable en el funcionamiento de todos los elementos que constituyen el molde metálico.

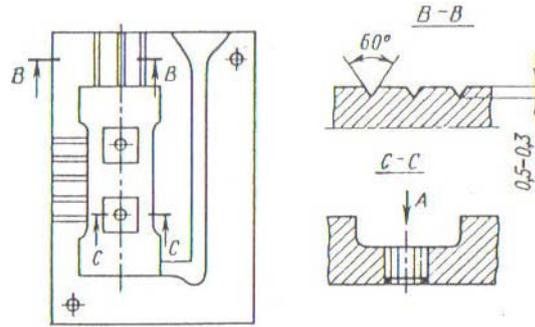
### 3.2.14 AIREACIÓN DEL MOLDE (RESPIRADEROS)

Una condición indispensable para obtener piezas correctas es la evacuación fácil del aire durante el llenado. La verdadera causa del fallo de una pieza delgada es a veces la dificultad de evacuar el aire; el fundidor debe aumentar la temperatura del metal y de la coquilla, si el llenado sigue siendo imperfecto.

En las uniones y en las portadas de los machos, se facilita la ventilación por los respiraderos que pueden ser:

- Canales planos, de 10 a 20 mm de anchura y 0.2 a 0.3 mm de profundidad, fresados.
- Ranuras de sección triangular de 0.6 a 1 mm de profundidad (a menudo hechas con un límite).

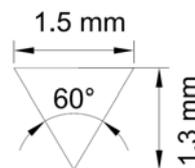
Estos respiraderos parten de la cavidad de la coquilla y alcanzan el exterior, directa o indirectamente.



**Figura 3.10:** Canales para la evacuación de gases en las coquillas (respiraderos) [2].

Hay que vigilar que estos respiraderos no se obstruyan, por ejemplo, con los recubrimientos. Estos respiraderos deben ser lo suficientemente estrechos para que el metal no penetre en ellos, lo que los obstruiría [15].

En la Figura 3.11 se indican las dimensiones de los respiraderos para el molde metálico que se utilizará en este trabajo de investigación.



**Figura 3.11:** Dimensiones de los respiraderos en el molde metálico.

### 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE METÁLICO

De manera similar a lo expuesto en la sección 3.2, se entiende por *Construcción* al proceso de elaboración del molde metálico mediante procesos tecnológicos de mecanizado tradicionales (utilizando torno, fresa, rectificadora, etc.) o especiales, en este caso, mediante Control Numérico por Computadora (CNC).

Ahora bien, el molde está dividido en tantos elementos cuantos sean necesarios para extraer la pieza, saliendo con los bebederos de colada y sus mazarotas.

Se distinguen, por una parte, los elementos que constituyen *el cuerpo del molde*, y, por otra parte, *los machos*. Estos sirven, generalmente, para formar las superficies internas o entrantes de las piezas [15].

### 3.3.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA EL CUERPO DEL MOLDE

Se utiliza muy a menudo *una fundición gris* de buena calidad, de estructura perlítica, de grano fino y compacto, con débil contenido de fósforo y de azufre:

**Tabla 3.7:** COMPOSICIÓN PARA UN MOLDE METÁLICO DE FUNDICIÓN GRIS [15].

ELEMENTO	(%)
Carbono	3.2
Silicio	1.5 a 2
Manganeso	0.7 a 0.9
Fósforo	< 0.3
Azufre	< 0.1

El contenido de silicio de 2% es conveniente para los bloques de hierro fundidos colados con un espesor bajo; para los bloques espesos es más conveniente un contenido más débil. El hierro fundido puede ser mejorado por adiciones de Cr o de Cr-Ni o de Cr-Mo.

Los elementos de la coquilla se mecanizan, generalmente, en los desbastes de fundición, moldeados de acuerdo con un modelo y siguiendo aproximadamente la superficie de la pieza. Los elementos de dimensiones pequeñas o de forma simple pueden ser cortados en los bloques de hierro fundido.

Se emplea también el *acero semiduro*. El hierro fundido tiene, sobre el acero, las ventajas de ser menos fácilmente atacado por el aluminio líquido, si falta el recubrimiento, y de tener menos tendencia a deformarse de forma permanente por efecto de repetidos calentamientos [15]. El acero resiste mejor el agrietamiento.

Para los moldes que van a tener gran uso, se puede recurrir a *aceros aleados* que lleven o no tratamientos térmicos. En todos los casos, se recomienda utilizar recubrimientos.

### 3.3.2 DURACIÓN DEL MOLDE

La duración de un molde depende mucho del tipo de utilización y de los cuidados que se tengan en su empleo. Un molde mecanizado, cuyos elementos están dirigidos y sometidos a fuerzas bien centradas y sin brutalidad, dura mucho más un molde manejado con medios rudimentarios.

La vida del molde depende también de la aleación que se utilice. A veces se considera que una coquilla bien hecha y bien utilizada debe servir para 20000 ó 40000 piezas sin retoques importantes (considerando aparte los machos). Estas cifras son susceptibles de superación si la coquilla está mecanizada [15].

### **3.3.3 OBTENCIÓN DE LAS PLACAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE**

Para obtener las placas que servirán de base para la construcción del molde metálico, se realizó la fundición en un horno de inducción de 100 lb de chatarra (camisas de fundición gris) en molde de arena, debido a que estos materiales cumplen con los requerimientos de composición química.

Puesto que los bloques obtenidos serán sometidos a un proceso de mecanizado mediante Control Numérico por Computadora (CNC) se añadieron 900 gr de ferrosilicio, con el propósito de mejorar la maquinabilidad de los bloques.

Las placas obtenidas se muestran en la Figura 3.12.



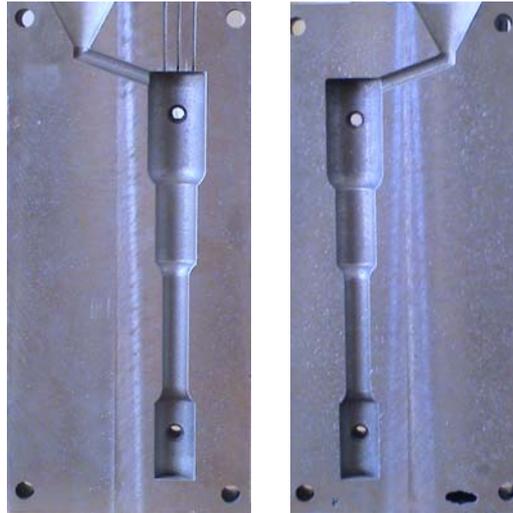
**Figura 3.12:** Bloques de fundición gris.

### **3.3.4 MECANIZADO DE LOS BLOQUES**

Para realizar el mecanizado de los bloques y obtener la forma de la probeta, mazarota, sistemas de alimentación y respiraderos, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Los planos se realizaron mediante el software *SolidWorks 2007 SPO.0*.
2. Los perfiles de las cavidades se mejoraron mediante el software *Rinoceros V.4*.
3. La simulación del mecanizado se efectuó utilizando el software *Visual Mil*.

Al final de este proceso, se obtuvieron los moldes siguientes:

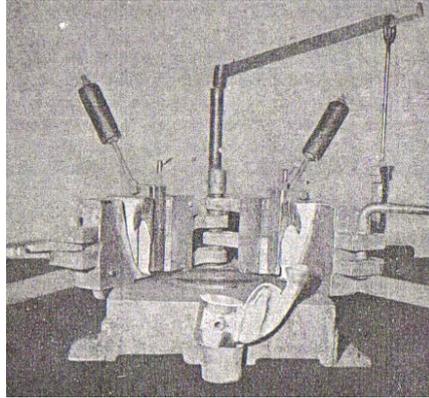


**Figura 3.13:** Moldes metálicos mecanizados mediante CNC.

### 3.3.5 CENTRADO, GUIADO Y SUJECIÓN

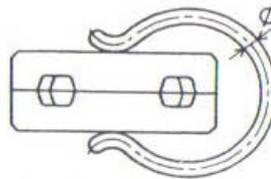
La disposición conveniente de los moldes entre sí se realiza por medio de *pasadores* de cabeza cónica; los pasadores, fijos en uno de los moldes se encuentran en el molde opuesto a los alojamientos correspondientes. No se debe multiplicar su número sobre una superficie de unión, pues a veces basta con dos. Las guías deben tener un juego suficiente para permitir las diferencias de dilatación de las distintas partes.

Algunos moldes se abren alrededor de una bisagra, generalmente, vertical (Figura 3.14). Deben estar contruidos de forma que la presión debida al cierre no fuerce ni la bisagra ni los moldes intermedios [15].



**Figura 3.14:** Sistema de sujeción de bisagra [15].

En el caso de un molde sencillo o sin acabar, se pueden cerrar los moldes uno contra otro por medio de órganos móviles, como el estribo elástico (Figura 3.15) o el aprieta-juntas.



**Figura 3.15:** Sistema de sujeción aprieta-juntas [15].

Generalmente, la sujeción de los moldes intermedios se realiza por uno de los siguientes dispositivos: gancho, gancho con leva y abrazadera de tuerca, entre otras [15].

Puesto que la pieza a obtener es pequeña, se seleccionó una junta de pernos. Véase la Figura 3.16.



**Figura 3.16:** Molde metálico con su sistema de sujeción.

### **3.4 PREPARACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E**

Siendo las principales propiedades físicas del aluminio y de sus aleaciones en estado líquido, la facilidad de oxidación, la absorción de gas y la acción sobre el hierro, los principios generales de un adecuado proceso de fusión y de colado conducirán obviamente a conseguir, una composición correcta, ausencia de óxido en el metal, un contenido suficientemente escaso de gas y la obtención de un grano fino.

Las diferencias de composición en el material pueden tener distintas causas: composición de las cargas, enriquecimiento o empobrecimiento de un elemento durante la fusión y la heterogeneidad de la colada.

En esta sección se describen, entre otros temas, la manera correcta de calcular la carga, así como los procesos adecuados de fusión y colado, con el propósito de obtener las aleaciones de composición y características requeridas.

#### **3.4.1 CARGAS**

Las cargas están constituidas, generalmente, por cierto porcentaje de metales nuevos (lingotes de origen) y cierto porcentaje de chatarras (mazarotas, piezas defectuosas, restos de fundición) que provienen de fabricaciones anteriores. En algunos casos, las cargas se preparan partiendo de aleaciones garantizadas, a las cuales se añade muy a menudo aluminio puro.

Los metales nuevos (lingotes de primera fusión) tienen una composición bien determinada y conocida: esta composición permite obtener piezas cuyo contenido de elementos e impurezas queda incluido dentro de los límites impuestos por normas, manuales, etc., si la fusión se ha efectuado en buenas condiciones en todo momento [15].

##### **3.4.1.1 CÁLCULO DE CARGAS**

El cálculo de la carga se realiza teniendo en cuenta el porcentaje de evaporación de los componentes de la aleación. La magnitud de la evaporación depende de la oxidación de los desechos, del tipo de aluminio, el estado del grupo de fusión, el procedimiento de afino, la duración de la fusión, etc.

Para realizar el cálculo de carga, se selecciona el material que servirá como materia prima base para la preparación de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E.

Considerando la composición química de las aleaciones de aluminio que existen en el mercado y que son necesarias para realizar la experimentación, se utilizarán los perfiles arquitectónicos de designación ASTM 6063 y los pistones de automotores con la designación ASTM 4032.

En la Tabla 3.8 se muestran las composiciones químicas de estas aleaciones.

**Tabla 3.8:** COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 4032 Y ASTM 6063 [14].

ALEACION	%Si	%Mg	%Ni	%Cu
ASTM 4032 (pistones)	12,5	1	0,9	0,9
ASTM 6063 (perfilería)	0,4	0,7	----	---

El porcentaje de evaporación del aluminio en hornos eléctricos y de crisol es de **0.5-1%**; en los hornos de reverbero, **1-2%**, y si la carga está muy oxidada, la oxidación llega a **2.5%**.

La oxidación del silicio constituye **0.5-1%** y depende poco del estado de la carga y el tipo de horno de fusión. La oxidación del magnesio alcanza **2-3%**; con una carga llega a **5%**.

La oxidación del cobre forma **0.5-1.5%**. La oxidación del zinc alcanza **5-9%**. Los productos de la oxidación de los componentes de la aleación son los **óxidos\*** [2].

### 3.4.2 CÁLCULO DE CARGA PARA LA ALEACION DE ALUMINIO ASTM 355

La aleación de aluminio ASTM 355 estándar tiene la siguiente composición química:

**5% Si, 1,3% Cu, %0,5 Mg [17]**

---

\* Al cristalizarse las molduras, los óxidos se disponen entre las dendritas y los límites de grano, contribuyendo a la reducción de la plasticidad y al aumento de la fragilidad de las molduras.

Los rangos de composición química dados para esta aleación en molde permanente son:

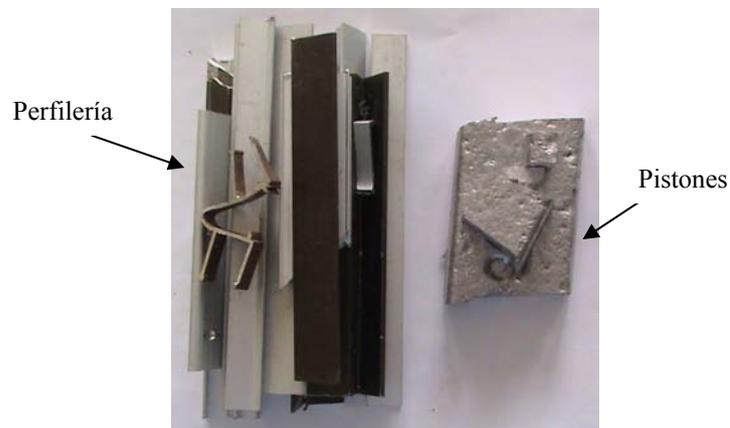
(4,5-5,5)% Si, (1-1,5)% Cu, (0,4-0,6)% Mg [17]

Puesto que la composición química varía según el tamaño de los pistones (especialmente el contenido de Si), se procedió a fundir 20 lb de pistones de todo tipo y tamaño. Del mismo modo se fundió 20 lb de perfilería, obteniéndose la siguiente composición\*:

**Tabla 3.9:** COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PISTONES Y PERFILERÍA FUNDIDOS.

ALEACIÓN	%Si	%Mg	%Ni	%Cu
Pistones	13,1	0,332	0,9	1,24
Perfilería	0,4	0,7		0,1

En la Figura 3.17 se muestra el material utilizado para obtener la aleación de aluminio ASTM 355.



**Figura 3.17:** Carga: a la izquierda, perfilería; a la derecha, pistones fundidos.

Considerando la composición química que se muestra en la Tabla 3.9, así como el porcentaje de oxidación de los elementos, para el cálculo de carga se procede de la siguiente manera:

\* Estos resultados se obtuvieron mediante en ensayo de *Espectrometría* en CEDAL-Latacunga. Los resultados completos se encuentran en los ANEXOS.

1. Se hace un cálculo para una masa de 100 kg de aleación.
2. Se inicia con una masa arbitraria tanto de pistones fundidos como de perfilería de aluminio fundida.
3. Para este trabajo, se toma una masa de pistones fundidos de 36,65 kg y una masa de perfilería de aluminio fundida de  $(100 - 36,65) \text{ kg} = 63,35 \text{ kg}$ .
4. Luego, cada una de estas masas se divide para 100, encontrando una fracción (porcentaje en peso).
5. Esta fracción se multiplica por el porcentaje de cada uno de los elementos presentes en la materia prima (pistones y perfilería fundidos), obteniendo los porcentajes que se requieren para obtener la aleación.
6. Luego se suman estos porcentajes para saber si estos se ajustan a los porcentajes estándar.
7. A cada una de estas cantidades se le disminuye el porcentaje de evaporación que tiene cada uno de los elementos, encontrando de esta manera, el porcentaje que cada uno de los elementos tendrá en la aleación a obtener.
8. El proceso se repite en el caso de que los porcentajes estén muy por debajo (o por encima) hasta que los porcentajes se ajusten a los estándares.

### 3.4.3 CÁLCULO DE CARGA PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

La aleación de aluminio ASTM 40E estándar tiene la siguiente composición química:

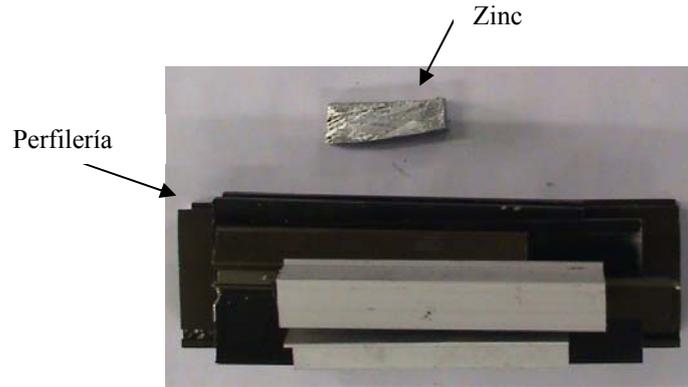
**5,5% Zn, %0,6 Mg, %0,5 Cr, %0,2 Ti [17]**

Los rangos de composición química dados para esta aleación en molde permanente son:

**(5-7)% Zn, (0,5-0,65)% Mg, (0,4-0,6)% Cr, (0,1-0,25)% Ti [17]**

El procedimiento para el cálculo de carga para esta aleación es similar al descrito en la sección anterior.

En la Figura 3.18 se muestra el material utilizado para obtener la aleación de aluminio ASTM 40E.



**Figura 3.18:** Carga: arriba, zinc puro; abajo, perfilería.

Los resultados del cálculo de carga efectuados para ambos tipos de aleaciones se encuentran al final de este trabajo.

### 3.5 FUSIÓN

La temperatura de colada de las aleaciones de aluminio se halla entre límites de 700-800°C.

La intensidad de enfriamiento y solidificación de la masa fundida en la coquilla es considerablemente mayor que en el molde de arena, por eso las molduras de aleaciones de aluminio en coquillas resultan con una estructura de grano fino más compacta. Esto eleva sus propiedades mecánicas: resistencia a la tracción en un 20-25%, y el alargamiento en 1.5-2 veces.

Estas aleaciones tienen una gran contracción, por lo que para la alimentación de la moldura, sus moldes deben disponer de mazarotas, además de asegurar la solidificación consecutiva mediante el suministro correspondiente del metal a la moldura.

Al fundir molduras complicadas de paredes delgadas, como también molduras de aleaciones con baja fluidez, la coquilla se calienta hasta 300-350°C. Para la fundición de aleaciones con buena fluidez, como también al fundir molduras macizas de paredes gruesas, la coquilla se calienta hasta 200-250°C [2].

### 3.5.1 REGLAS GENERALES DE FUSIÓN

#### *a) Temperatura.*

- Fundir en un tiempo mínimo.
- Evitar la permanencia del metal líquido durante tiempos prolongados a temperatura elevada. Se puede utilizar un pirómetro para controlar la temperatura.

#### *b) Humedad.*

- Evitar toda traza de humedad (crisoles, refractarios, herramientas de fusión, metal, fundente, etc.).
- Utilizar materiales limpios (ni húmedos, ni oxidados, ni grasientos).
- Evitar todos los movimientos inútiles de la superficie del baño; quitar las escorias solamente cuando sea necesario.
- Reducir al mínimo la altura de caída del metal durante la colada.

#### *c) Hierro.*

- Utilizar herramientas de fusión de hierro o de hierro fundido, cuidadosamente revestidos y precalentados.
- Evitar el empleo de crisoles de hierro fundido.

#### *d) Fundente.*

- Utilizar fundentes totalmente secos.
- Utilizar los fundentes apropiados para la aleación considerada [15].

### 3.5.2 PRESIONES DE VAPOR DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E

Los aspectos más importantes que se debe tomar en cuenta en la obtención de piezas fundidas de aluminio para que éstas, presenten el menor número de defectos posibles, son la oxidación y la evaporación que sufre el metal líquido al ser expuesto al sobrecalentamiento, al mantenimiento prolongado a temperaturas de utilización o a un proceso de refusión, éste último, provoca además una degradación progresiva del metal.

Para determinar la evaporación que pueden sufrir las aleaciones de aluminio estudiadas, las cuales contienen además del aluminio, elementos como: Mg, Si, Ni, Zn, se debe conocer la presión de vapor que tiene cada elemento a diferentes temperaturas que se alcanzan en los procesos de fusión [14].

La presión de vapor de un elemento puede ser determinada por la siguiente ecuación [19]:

$$\log p = -\frac{A}{T} + B + C \cdot \log T + 10^{-3} DT \quad (3-45)$$

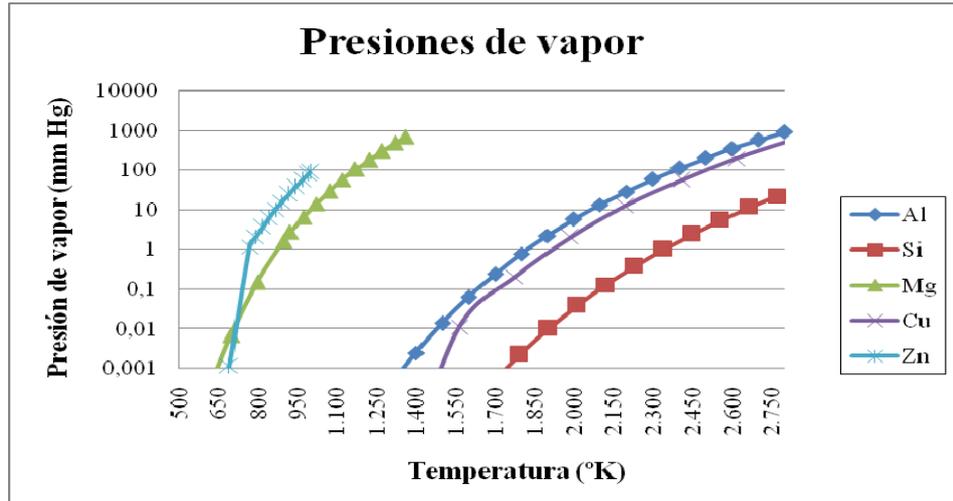
Los valores de las constantes A, B, C y D, así como el rango para la temperatura T, se muestran en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10:** VALORES DE LAS CONSTANTES PARA DETERMINAR LA PRESIÓN DE VAPOR DE ALGUNOS ELEMENTOS [19].

ELEMENTO	A	B	C	D	T (°K)
<b>Al</b>	16450	12,36	-1,023	---	1200-2800
<b>Cu</b>	17870	10,63	-0,236	-0,16	298-1356
<b>Mg</b>	7780	11,41	-0,855	---	298-922
	7550	12,79	-1,41	---	922- 1363
<b>Si</b>	20900	10,84	-0,565	---	1412-3270
<b>Zn</b>	6883	9,418	-0,0503		473-692,5
	6670	12	-1,126	-0,33 ---	692,5-1000

La Figura 3.19 muestra las curvas de presiones de vapor de los elementos más importantes que se consideran en las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E para el rango de temperaturas especificado.

En la Figura antes citada, se puede apreciar que para una determinada temperatura (en este caso la temperatura de colado, 750°C), el Zn es el elemento con mayor predisposición a evaporarse a esta temperatura, razón por la cual, éste debe añadirse luego de que se haya fundido el Al (perfilería), principalmente, y mantenerlo durante un tiempo aproximado de 10 minutos.



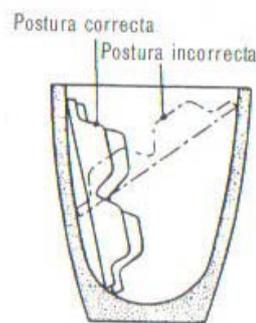
**Figura 3.19:** Presiones de vapor.

De la Figura 3.19, es evidente que a la temperatura de colado, 750°C (1023 °K), los elementos que tienen una mayor predisposición a evaporarse son el Zn y el Mg.

### 3.5.3 CRISOLES

Son recipientes que se utilizan para albergar el metal líquido. Cuando los crisoles son de grafito hay que tomar las siguientes precauciones:

- Evitar todo choque térmico.
- Almacenarlos en un lugar cálido y seco.
- Precalentarlos antes de su primer empleo y vigilar su carga (choque de los lingotes y dilatación) (Figura 3.20).



**Figura 3.20:** Carga de material en un crisol [15].

En el caso del empleo de crisoles de hierro fundido, se puede utilizar la composición siguiente, que resiste bastante bien al aluminio fundido:

**Tabla 3.11:** COMPOSICIÓN USUAL DE UN CRISOL DE HIERRO FUNDIDO [15].

Carbono total	3.2-3.4%	Azufre	<= 0.12
Silicio	2-2.2%	Fósforo	<= 0.3%
Manganeso	0.7-0.9%	Cromo (facultativo)	0.4-0.6%

Los crisoles de acero no se utilizan con tanta frecuencia, porque son más sensibles al ataque de las aleaciones de aluminio fundidas, que los crisoles de hierro fundido.

Los crisoles de hierro fundido deben ser *recubiertos diariamente* y con mucho cuidado con los recubrimientos que se indican en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12:** COMPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS PARA CRISOLES DE HIERRO FUNDIDO [15].

Blanco de España	2.5 kg
Silicato de sosa (36 °Bé)	0.5 litros
Agua	10 litros
o bien:	
Grafito en polvo	1.2 kg
Silicato de sosa	0.45 litros
Agua	10 litros

Estos recubrimientos se aplican con pincel o mejor con pistola, en capas sucesivas, sobre superficies limpiadas con chorro de arena o cepilladas, calentadas a 120-150°C [15].

Puesto que no se va a fundir una cantidad considerable de muestras (menor a 100) se utilizarán crisoles de tubos de acero.

### 3.6 COLADO

A continuación se describen los aspectos relacionados con el proceso de colado, siendo los más importantes: la temperatura de colado, temperatura del molde y los métodos más utilizados para el recubrimiento de los moldes metálicos.

### 3.6.1 PROCEDIMIENTOS PARA SUMINISTRAR LA MASA FUNDIDA AL MOLDE

Al elegir el modo de suministrar el metal fundido al molde, se debe tener en cuenta que éste debe llegar al molde suavemente, sin chocar con las paredes, sin remolinos, con una velocidad de elevación del nivel en el molde determinada, como también asegurar una sucesiva expulsión del aire y gases del molde. Además, el modo de suministrar el metal fundido debe asegurar una solidificación dirigida a la moldura, teniendo en cuenta su estructura y las propiedades de la masa fundida.

El metal fundido que penetra en el molde no debe impedir la salida de los gases. La velocidad de elevación de la masa fundida en el molde debe ser suficiente para que el aire y los gases creados que se hallan en la cavidad del molde puedan salir libremente del mismo.

La longitud de los canales debe ser la menor posible, y en ellos no se admiten ángulos agudos, virajes y bruscos cambios de las secciones, o sea, las pérdidas térmicas e hidráulicas durante el movimiento del metal en el sistema de bebederos deben ser mínimas.

Para obtener molduras de calidad, la velocidad de movimiento de la masa fundida durante el llenado del molde no debe exceder *150 cm/s* [2].

### 3.6.2 TEMPERATURA DE COLADA Y TEMPERATURA DEL MOLDE

Por regla general se debe colar un *metal frío* en un *molde caliente*.

Una temperatura suficientemente elevada del molde permite reducir los riesgos de las grietas, porque reduce la contracción de la pieza en el interior de la coquilla. La temperatura conveniente es alrededor de 350-550°C para las aleaciones sensibles a las grietas.

La mayor parte de las piezas se cuelan con un metal entre 700 y 800°C [15].

### 3.6.3 CALENTADO DE LAS COQUILLAS

Antes de la puesta en marcha de la colada, las diferentes partes del molde metálico son calentadas, bien fuera de su posición de trabajo (sobre el borde del horno donde reposa el

metal, o incluso en un horno cerrado), o bien en su sitio, preferentemente por medio de quemadores de gas.

Es en el período de precalentamiento cuando se aplican los enlucidos, a una temperatura de 150°C. Algunos moldes tienen necesidad de un calentamiento continuo. Se utilizan quemadores de gas convenientemente orientados y fijados sobre el molde o sobre la mesa que lo soporta.

El gas doméstico es de gran comodidad para el calentamiento de las coquillas, en su defecto se recurre al propano. El calentamiento preferencial de algunas zonas puede ser útil, por ejemplo, en las mazarotas o para equilibrar la temperatura del molde.

Se controlan las temperaturas por medio de un *pirómetro de contacto* [15].

### **3.6.4 PINTURAS Y REVESTIMIENTOS PARA COQUILLAS**

Para proteger la superficie de la coquilla contra la acción del metal líquido y aumentar el período de servicio, regular la velocidad de enfriamiento de la moldura y mejorar el llenado del molde, sobre la superficie útil de la coquilla y los machos metálicos se aplican revestimientos y pinturas refractarias.

En la composición de estos recubrimientos entran sustancias que poseen pequeña conductividad térmica, lo que le da al recubrimiento propiedades de aislamiento térmico. Gracias a los recubrimientos la masa fundida se enfría más lentamente y el molde se calienta menos.

Los revestimientos se aplican a la superficie útil de la coquilla en una capa de 0.3-1 mm de espesor, generalmente una vez por turno de trabajo; y las pinturas prácticamente después de cada colada.

El propósito principal de la aplicación de pinturas es evitar la adherencia del revestimiento a la superficie de la moldura, elevar la resistencia del molde, asegurar la conductividad térmica prefijada del recubrimiento.

Para evitar el temple al aire de las molduras de fundición se emplea el recubrimiento combinado de la coquilla con revestimientos refractarios, pinturas y hollín de acetileno [2].

### **3.6.5 ENLUCIDOS**

Los enlucidos sirven para recubrir las superficies destinadas a estar en contacto con el metal líquido. Cumplen varios fines:

- Proteger la coquilla contra la acción del aluminio (poco sensible sobre las partes de fundición).
- Facilitan el deslizamiento del metal líquido, así como el desmoldeo de la pieza.
- Permiten actuar contra la intensidad de los cambios térmicos de la pieza y el molde.

Esta última misión es muy importante; la intensidad de los cambios térmicos depende de la elección del revestimiento y del espesor de la carga. La aptitud de los revestimientos para transmitir el calor difiere mucho según los productos [15].

#### **3.6.5.1 APLICACIÓN DE LOS ENLUCIDOS**

Antes de aplicar un enlucido sobre un molde nuevo, éste debe estar perfectamente desengrasado. Si el molde ha sido usado y se ha oxidado en el almacén, se elimina el óxido con viruta o con cualquier otro medio que desgaste poco el molde.

El enlucido puede ser aplicado bien por pulverización con inyector o pistola, o bien por medio de un pincel. Estas aplicaciones exigen una temperatura conveniente en la superficies ( $\approx 150^{\circ}\text{C}$ ). Varias capas finas sucesivas (cada pasada después de haberse secado la precedente) se mantienen mejor que una capa espesa. En los retoques locales es preferible usar el pincel para aplicarlo.

Antes de hacer un nuevo enlucido, se debe eliminar con cuidado la antigua capa, mediante medios que desgasten poco el molde [15].

En este trabajo se utilizó una mezcla de 3 gr de grafito + 100 ml de alcohol como recubrimiento y para ayuda para el posterior desmoldeo.

### **3.6.6 PUESTA A PUNTO DE LAS CONDICIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE UNA COQUILLA**

Cuando se utiliza una coquilla, se deben determinar las siguientes condiciones de utilización:

- Temperatura de colada.
- Temperatura de la coquilla (preferentemente con un pirómetro de contacto).
- Orden y ritmo de las operaciones de desmoldeo.
- Velocidad de llenado y de volteo y eventual elección de los orificios de llenado.
- Elección de los enlucidos [15].

### **3.7 PROCEDIMIENTOS DE FUNDICIÓN**

A continuación se describe el procedimiento utilizado para obtener las aleaciones de aluminio, mediante el proceso de fundición en molde metálico y colado por gravedad.

#### **3.7.1 PROCEDIMIENTO DE FUNDICIÓN PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355**

El procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se pesan 117,28 gr de pistones fundidos y 202,72 gr de perfilería de aluminio, dando una carga total de 320 gr.
2. Se introduce la carga total en el crisol y se coloca éste dentro del horno hasta que se alcancen 750°C en un tiempo de 2 horas.
3. Para evitar que la probeta se adhiera a la superficie de la cavidad del molde, se realiza un recubrimiento utilizando una mezcla de 3 gr de grafito y 100 ml de alcohol.
4. Después de 30 minutos de haber introducido la carga en el horno, se coloca dentro de otro horno los moldes metálicos (con el debido recubrimiento) hasta que alcancen los 450°C (en el interior).

5. Una vez que el aluminio alcanza los  $750^{\circ}\text{C}$ , se extrae el crisol del horno para retirar la escoria de la superficie del metal líquido; luego se introduce nuevamente el crisol en el horno y se espera 10 minutos antes de realizar el colado del metal fundido.
6. Se sacan los moldes del horno y se realiza la unión mediante pernos.
7. Finalmente, se saca el crisol del horno, procediendo al colado del metal líquido en el molde metálico, tomando la lectura de la temperatura de colado y a la que se encuentra el molde metálico en ese instante utilizando una termocupla Tipo J.
8. Para retirar la muestra del molde metálico, se debe esperar 30 minutos hasta conseguir un enfriamiento adecuado, obteniendo de esta forma una muestra apropiada para los ensayos.

### **3.7.2 PROCEDIMIENTO DE FUNDICIÓN PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E**

El procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se pesan 19,2 gr de Zn puro y 300,8 gr de perfilería de aluminio para obtener una carga total de 320 gr.
2. Se introduce solamente los 300,8 gr de perfilería en el crisol y se coloca éste dentro del horno hasta que se alcancen  $750^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 2 horas.
3. Para evitar que la probeta se adhiera a la superficie de la cavidad del molde, se realiza un recubrimiento utilizando una mezcla de grafito y alcohol.
4. Después de 30 minutos de haber introducido la carga en el horno, se coloca dentro de otro horno los moldes metálicos (con el debido recubrimiento) hasta que alcancen los  $400^{\circ}\text{C}$  (en el interior).
5. Una vez que se alcanzan los  $750^{\circ}\text{C}$ , se extrae el crisol del horno para retirar la escoria de la superficie del metal líquido; se añaden los 19,2 gr de Zn puro y luego se introduce nuevamente el crisol en el horno y se espera 10 minutos antes de realizar el colado del metal fundido.
6. Se sacan los moldes del horno y se realiza la unión mediante pernos.
7. Finalmente, se saca el crisol del horno y se agita con el propósito de obtener una colada más homogénea y con menor cantidad de dendritas, procediendo luego al colado del metal líquido en el molde metálico, tomando la lectura de la temperatura de

colado y a la que se encuentra el molde metálico en ese instante utilizando una termocupla Tipo J.

8. Para retirar la muestra del molde metálico, se debe esperar 30 minutos hasta conseguir un enfriamiento adecuado, obteniendo de esta forma una muestra apropiada para los ensayos.

A continuación se describen los procesos más comunes mediante los cuales se pueden mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de aluminio: los tratamientos térmicos.

### **3.8 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO**

Un tratamiento térmico, en sentido amplio de la palabra, se refiere al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su microestructura y/o eliminar tensiones residuales.

Cuando se aplica a las aleaciones de aluminio, el término tratamiento térmico se refiere usualmente a las operaciones (de calentamiento y posterior enfriamiento) empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de las aleaciones de forja o de moldeo endurecibles por precipitación.

La solubilización de las segundas fases, capaces de precipitar durante el envejecimiento, no es el único cambio microestructural que tiene lugar en las aleaciones de fundición al ser tratadas térmicamente.

#### **3.8.1 TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO**

El **endurecimiento por envejecimiento** o **por precipitación** se produce por una secuencia de transformaciones de fase que conduce a una dispersión uniforme de precipitados de tamaño fino en la matriz [4].

Este tratamiento térmico se utiliza sobre todo para las aleaciones de aluminio.

En la mayoría de los casos, su efecto parece ser debido a las variaciones de solubilidad en el estado sólido, en el aluminio, de los compuestos binarios definidos  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$  y  $\text{MgZn}_2$  [27].

### **3.8.2 REQUISITOS PARA EL ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO**

No todas las aleaciones pueden ser endurecidas por envejecimiento. Deben satisfacerse cuatro condiciones para que una aleación tenga una respuesta de endurecimiento por envejecimiento durante el tratamiento térmico:

1. El sistema de la aleación debe mostrar una solubilidad sólida decreciente al reducirse la temperatura. En otras palabras, la aleación debe formar una sola fase al ser calentada por arriba del *solvus* y después pasar una región de dos fases durante el enfriamiento.
2. La matriz deberá ser relativamente blanda y dúctil; el precipitado, duro y frágil. En la mayoría de las aleaciones endurecibles por envejecimiento, el precipitado es un compuesto intermetálico duro y frágil.
3. La aleación debe poder templarse. Algunas aleaciones no pueden enfriarse con rapidez suficiente para suprimir la formación del precipitado. El templado puede, sin embargo, introducir esfuerzos residuales que causan distorsión en la pieza.
4. Debe formarse un precipitado uniforme [4].

### **3.8.3 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA REALIZAR EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN**

A continuación se describe el procedimiento que se debe llevarse a cabo para realizar el tratamiento térmico por precipitación en las aleaciones de aluminio.

#### **3.8.3.1 TRATAMIENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZACIÓN**

En el **tratamiento por solubilización**, primero se calienta la aleación por encima del *solvus* y se mantiene así hasta que se produzca una solución sólida homogénea.

Este paso disuelve precipitados de fase, reduciendo cualquier segregación microquímica presente en la aleación original [4].

### 3.8.3.2 TEMPLADO

Después del tratamiento por solubilización, la aleación se enfría rápidamente, es decir, se temple. Los átomos no tienen tiempo para difundirse hacia sitios de nucleación potenciales [4].

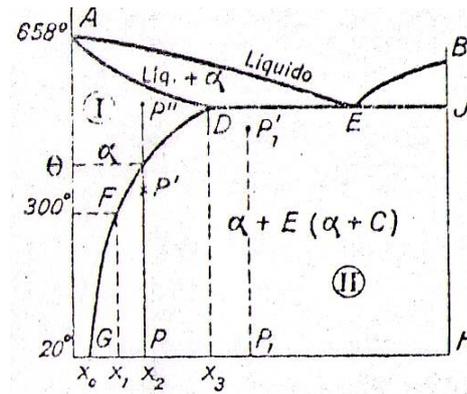
El temple de las aleaciones de aluminio se realiza a una temperatura del orden de 500°C; el gradiente de temperatura es relativamente pequeño a causa de la buena conducción térmica del aluminio, por consiguiente, los peligros de deformaciones y de grietas son menores.

El intervalo de temperatura de temple es generalmente muy restringido, pero se debe evitar la fusión parcial; la temperatura adoptada es lo suficientemente inferior a la del *solidus* (20°C aproximadamente) para evitar este accidente, tanto más de temer cuando el metal es heterogéneo.

La duración del calentamiento oscila de 15 minutos a 4 horas. Depende del espesor de la pieza y la estructura del metal; es máxima para las aleaciones obtenidas por fundición y es mínima para las aleaciones forjadas.

El temple se efectúa en agua, en aceite, petróleo y en aire, este último para piezas delgadas. El endurecimiento observado inmediatamente después del temple es generalmente pequeño y a veces hasta nulo [27].

Para realizar el tratamiento térmico de temple, la composición debe ser superior a  $x_0$  y menor a  $x_3$ , mientras que la temperatura de tratamiento debe sobrepasar la línea *GFD* (línea del *solvus*). Esto se debe a que, para composiciones superiores a  $x_3$ , la disolución de compuestos intermetálicos queda siempre incompleta. De manera general, para realizar este tratamiento térmico, se necesita un diagrama de equilibrio que tenga la forma de la Figura 3.20.



**Figura 3.20:** Diagrama de equilibrio de dos soluciones solidas con punto eutéctico [27].

### 3.8.3.3 ENVEJECIMIENTO

Finalmente, la solución  $\alpha$  supersaturada se calienta a una temperatura por debajo de la de *solvus*. A esta temperatura de envejecimiento, los átomos sólo pueden difundirse cortas distancias. Finalmente, si se mantiene la aleación a la temperatura de envejecimiento durante un tiempo suficiente, se llega a un equilibrio en la microestructura.

Cuando se siguen los tres pasos antes mencionados, se puede producir alguna fase en forma de partículas ultrafinas de precipitados uniformemente dispersas. Esto es lo que se necesita para un endurecimiento eficaz por precipitación [4].

### 3.8.4 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

Un endurecimiento por envejecimiento se produce por un tratamiento térmico, constituido por un temple y luego por el posterior envejecimiento. Este último puede efectuarse de manera natural o artificial.

Por lo descrito en la sección 3.8.3.2, para esta aleación no es posible realizar el tratamiento térmico de temple, debido principalmente, a que la composición es muy superior a la sugerida por la Figura 3.20, ( $x_3$ ).

Por lo tanto, esta aleación únicamente se someterá a un tratamiento térmico de envejecimiento artificial (modificación y precipitación), denominado **T6**.

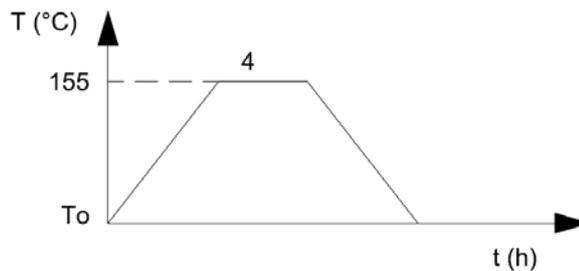
La temperatura y el tiempo de permanencia para este tratamiento térmico son 155°C y 4 horas, respectivamente [17].

### 3.8.4.1 PROCEDIMIENTO

Una vez obtenida esta aleación, el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se introduce la aleación en un horno hasta que alcance 155°C.
2. Cuando se alcanza la temperatura anterior, se la mantiene a durante 4 horas a esta temperatura.
3. Luego de este tiempo se saca del horno y se temple en agua.

En la Figura 3.21 se muestra el procedimiento de manera esquemática.



**Figura 3.21:** Ciclo de tratamiento térmico de envejecimiento artificial.

### 3.8.5 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

Por lo mencionado en la sección 3.8.3.2, para esta aleación sí es posible realizar el tratamiento térmico de temple, debido principalmente, a que la composición es menor a la sugerida por la Figura 3.20, ( $x_3$ ).

Entonces, esta aleación se someterá a un tratamiento térmico de temple y luego a uno de envejecimiento natural (modificación y precipitación), denominado **T4**.

La temperatura y el tiempo de permanencia para el tratamiento térmico de temple son, 410°C y 2 horas, respectivamente [18].

Una vez realizado el temple, se deja las muestras de ésta aleación expuesta al ambiente durante un tiempo de 15 días (60 horas).

La Figura 3.22 muestra el diagrama de equilibrio Al-Zn, en el cual se indican con líneas gruesas, el porcentaje de zinc y la temperatura para realizar el tratamiento térmico de temple.

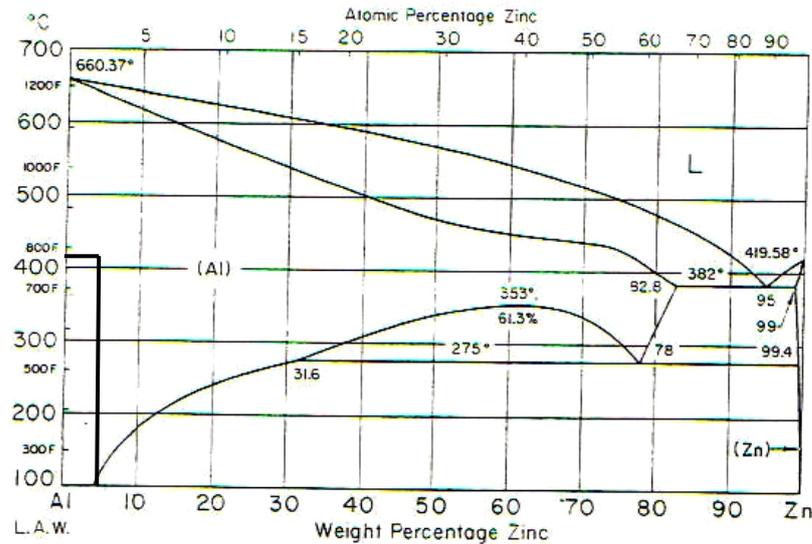


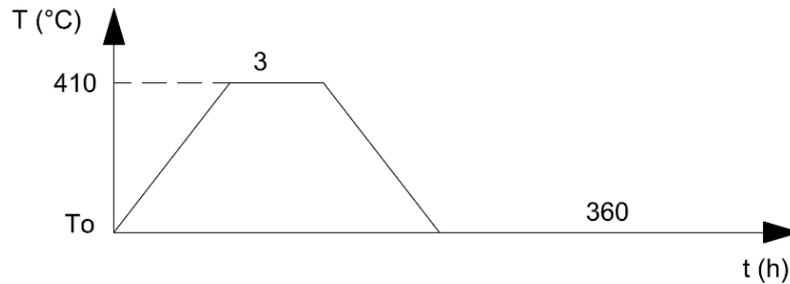
Figura 3.22: Diagrama de equilibrio Al-Zn [18].

### 3.8.5.1 PROCEDIMIENTO

Una vez obtenida esta aleación, el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se introduce la aleación en un horno hasta que se alcancen 410°C.
2. Cuando la aleación alcanza los 410°C, se la mantiene durante 3 horas a esta temperatura.
3. Luego de este tiempo se saca del horno y se temple en agua.
4. Finalmente, se deja la aleación al ambiente por 15 días (320 horas), para luego, transcurrido este tiempo, analizar sus propiedades.

En la Figura 3.23 se muestra el procedimiento de manera esquemática.



**Figura 3.23:** Ciclo de tratamiento térmico de envejecimiento natural.

### 3.9 CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E

Una vez que se ha realizado el proceso de obtención de las aleaciones, ahora se procederá a realizar la caracterización correspondiente de las mismas.

La *caracterización* se limita a la obtención de ciertas propiedades mecánicas y metalúrgicas de las aleaciones obtenidas.

#### 3.9.1 METALOGRAFÍA

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y sus aleaciones.

La forma más sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista. Este examen se denomina *macrográfico* y de ellos se extraen datos sobre los procesos mecánicos sufridos por el material, es decir, se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., además de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas, etc.

El examen *micrográfico*, es una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos no ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso.

### 3.9.1.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La preparación de las muestras para el examen micrográfico se la realiza según lo establece la norma ASTM E 3.

Por conveniencia, se hace un resumen de este procedimiento (válido para cualquier tipo de aleación metálica) [21]:

1. Se realiza un corte (transversal o longitudinal) de la parte del material a examinar.
2. Luego se procede a hacer un desbaste grueso mediante el uso de papel de lija.
3. Después realiza un pulido usando un paño y alúmina.
4. Finalmente se procede al ataque químico usando el o los reactivos adecuados.

Este último, se lo realiza según la norma ASTM E 407. Esta norma sugiere utilizar el reactivo llamado *Kellers* para las aleaciones de aluminio [22].

Una vez que se ha realizado el procedimiento de preparación de muestras para el análisis metalográfico, es posible obtener fotografías de la microestructura de las aleaciones de aluminio. En el capítulo siguiente se presentarán las microestructuras relacionadas con las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E.

### 3.9.2 DUREZA

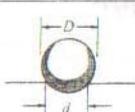
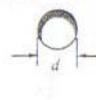
La *dureza* es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica) en su superficie. La dureza de un metal se mide forzando con un penetrador sobre su superficie.

El material del penetrador, que es usualmente una esfera, pirámide o cono, está hecho de un material mucho más duro que el material bajo ensayo. El acero endurecido, el carburo de tungsteno y el diamante son los materiales comúnmente utilizados como penetradores.

Para la mayoría de los ensayos de dureza estándar se aplica lentamente una carga conocida, presionando el penetrador a 90° en la superficie del material bajo ensayo.

Después de realizar la incisión, se retira el penetrador de la superficie. Se calcula el valor de dureza empírica o se lee en una escala analógica (o pantalla digital), que se basa en el área de la sección o en la profundidad de la impresión.

La Figura 3.24 recoge el tipo de penetrador y de impresión asociado con el ensayo de dureza Brinell. El valor de dureza de este ensayo depende de la forma de la incisión y de la carga aplicada.

Forma de penetración					
Ensayo	Penetrador	Vista lateral	Vista en planta	Carga	Fórmula para el índice de dureza
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o carburo de wolframio			$P$	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$

**Figura 3.24:** Ensayos de dureza [1].

La dureza de un metal depende de la facilidad con la que se deforma plásticamente. Por ello, para un metal particular, puede determinarse empíricamente una relación entre la dureza y la resistencia.

El ensayo de dureza es mucho más simple que un ensayo de tensión y puede no llegar a ser destructivo (por ejemplo, la pequeña incisión del penetrador puede que no perjudique al uso del objeto). Por estas razones, el ensayo de dureza se utiliza ampliamente en la industria del control de calidad [1].

Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tensión, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco.

Recuérdese que la dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos térmicos [3].

### 3.9.2.1 ENSAYO DE DUREZA BRINELL

Como se indicó anteriormente, existen muchos sistemas de medición de esta propiedad, aquí sólo se considerará el de mayor uso para aleaciones no ferrosas.

La *dureza Brinell* es un ensayo de utilización muy general y se la realiza en base a la norma ASTM E 10.

En este ensayo la herramienta de penetración con la cual se aplica la fuerza es una esfera y el número de dureza *HB* se determina como aquel que es igual a la carga aplicada, dividida entre el área superficial esférica de la huella. Así, las unidades de *HB* son las mismas que las del esfuerzo, aunque rara vez se emplean.

El ensayo de dureza Brinell tarda en realizarse, puesto que *HB* se debe calcular a partir de los datos del ensayo.

La ventaja principal de ambos métodos reside en que la mayoría de los casos son no destructivos. Ambos son empíricos y están relacionados de manera directa con la resistencia última del material ensayado. Lo anterior significa que las resistencias de las partes se podrían, si así se desea, ensayar parte por parte durante su manufactura [6].

### 3.9.2.2 PROCEDIMIENTO

La prueba de dureza Brinell consiste en marcar sobre la superficie de una pieza en examen una *huella permanente*, mediante una esfera de acero sobre la que se aplica, *sin choque*, una carga prefijada [5].

El procedimiento, de forma resumida, es el siguiente [23]:

1. Se coloca la probeta sobre un soporte cilíndrico.
2. Se aplica una precarga.
3. Luego se retira la precarga.
4. Finalmente se aplica la carga de prueba.

En la Figura 3.25 se muestra un dispositivo típico para la medición de la dureza.



**DATOS DE PRUEBA:**

- Diámetro de la esfera:  $\varphi = 2.5 \text{ mm}$
- Carga aplicada:  $P = 306 \text{ N}$
- Tiempo en carga:  $t = 15 \text{ segundos}$

**Figura 3.25:** Durómetro.

### 3.9.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

Antes de describir este tipo de ensayo, es necesario recordar y mencionar conceptos muy importantes relacionados con el comportamiento de los materiales cuando éstos se encuentran sometidos a cierto tipo de sollicitaciones (cargas), en particular, a cargas de tracción.

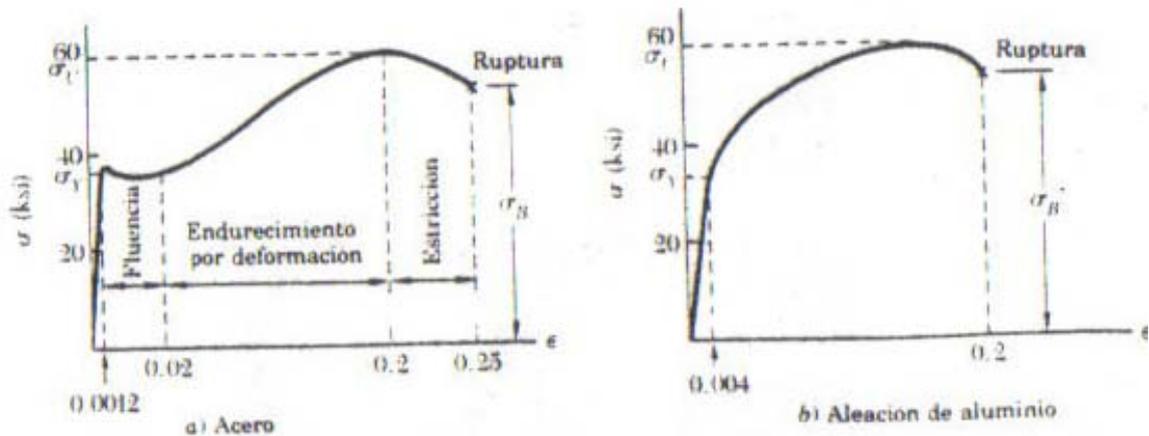
#### 3.9.3.1 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

La resistencia de un material no es el único criterio que debe utilizarse al diseñar estructuras.

Frecuentemente, la rigidez suele tener la misma o mayor importancia. En menor grado, otras propiedades tales como la dureza, la tenacidad y la ductilidad también influyen en la elección de un material. Estas propiedades se determinan mediante pruebas, comparando los resultados obtenidos con patrones establecidos [8].

Para obtener el diagrama esfuerzo-deformación de un material, se realiza usualmente una *prueba de tensión* a una probeta del material. Tal prueba se describirá más adelante.

Cuando se somete la probeta a carga creciente, su longitud aumenta primero linealmente con la carga y a una tasa muy lenta. Así, la porción inicial del diagrama esfuerzo-deformación es una línea recta con una pendiente pronunciada (Figura 3.25).

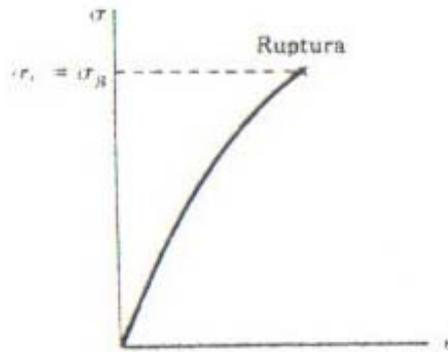


**Figura 3.25:** Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos [7].

Sin embargo, después de que se alcanza un valor crítico del esfuerzo, la probeta sufre grandes deformaciones con un pequeño aumento de la carga aplicada. Esta deformación ocurre por deslizamiento del material en superficies oblicuas y se debe principalmente a esfuerzos cortantes.

Después de alcanzar determinado valor máximo de carga, el diámetro de una porción de la probeta empieza a disminuir debido a la inestabilidad local. Este fenómeno se conoce como *estricción*. Cuando la estricción se ha iniciado, cargas más pequeñas son suficientes para mantener a la muestra alargándose aún más, hasta que finalmente se rompe.

Los materiales frágiles como fundición, cristal y la piedra se caracterizan porque la ruptura ocurre sin que se presente antes un cambio importante en la tasa de alargamiento (Figura 3.26).



**Figura 3.26:** Diagrama esfuerzo-deformación para un material frágil típico [7].

Así, para materiales frágiles no hay diferencia entre resistencia última y resistencia a la ruptura. También, la deformación en el momento de la ruptura es mucho más pequeña para materiales frágiles que para materiales dúctiles.

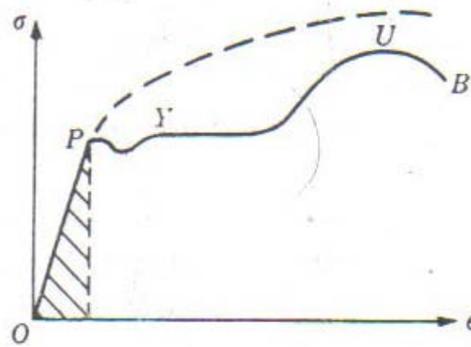
En un material frágil no se presenta la estricción en la probeta y se observa que la ruptura ocurre en una superficie perpendicular a la carga. Se concluye de esta observación que los esfuerzos normales son los principales causantes de la falla de los materiales frágiles [7].

### 3.9.3.2 LÍMITE DE ELASTICIDAD

Si las deformaciones causadas en una probeta, por la aplicación de cierta carga, desaparecen al quitar ésta última, se dice que el material se comporta *elásticamente*.

Si la deformación no vuelve a cero después de retirar la carga, entonces se ha producido una *deformación permanente* o *plástica* del material [7].

El límite de elasticidad (o límite elástico) es el esfuerzo más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada *deformación permanente* [8].



**Figura 3.27:** Diagrama esfuerzo-deformación unitaria [9].

Para muchos materiales son casi idénticos los valores numéricos del límite elástico y del límite de proporcionalidad\*, por lo que a veces se consideran sinónimos. En los casos en que es notoria la diferencia, el límite elástico es casi siempre mayor que el de proporcionalidad [9].

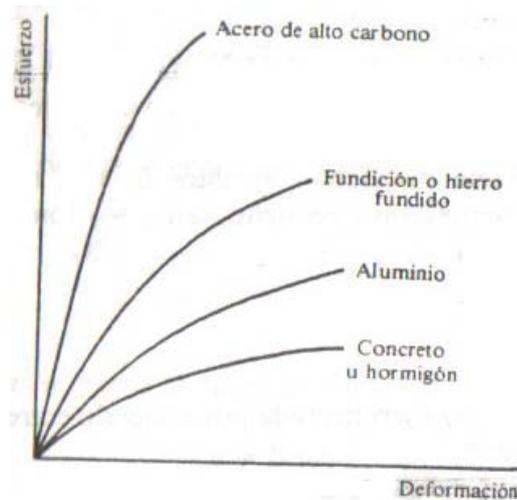
### 3.9.3.3 LÍMITE DE FLUENCIA

El límite de fluencia es aquel en el que aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia.

Si embargo, el fenómeno de la fluencia es característico del acero al carbono, mientras que hay otros tipos de acero, aleaciones y otros metales y materiales diversos, en los que no se manifiesta, como se observa en la Figura 3.28, en donde se representa el diagrama típico de diversos materiales.

Esta forma de los diagramas es también característica de la primera carga de piezas en las que los materiales tienen esfuerzos residuales importantes, como consecuencia de ciertos tratamientos o de sus procesos de fabricación, pero al cabo de sucesivas cargas y descargas, los esfuerzos residuales van desapareciendo y la curva se hace prácticamente recta [8].

\* Es el valor máximo de tensión que se puede producir durante un ensayo de tracción simple de modo que la tensión sea función lineal de la deformación.



**Figura 3.28:** Comparación de diagramas de distintos materiales [8].

Algunos materiales presentan en la curva esfuerzo-deformación dos puntos en los que hay aumento de deformación sin que aumente la tensión. Se les conoce por *límites de fluencia superior e inferior* [9]. Véase la Figura 3.27, punto *Y*.

#### 3.9.3.4 RESISTENCIA ÚLTIMA

El esfuerzo último, o bien el límite de resistencia, es la máxima ordenada de la curva esfuerzo-deformación [8]. Véase la Figura 3.27, punto *U*.

#### 3.9.3.5 RESISTENCIA A LA RUPTURA

El punto de ruptura o esfuerzo en el punto de ruptura, que en el acero al carbono es algo menor que el esfuerzo último, debido a que el esfuerzo en este punto de ruptura se mide dividiendo la carga entre el área inicial de la sección de la barra, lo que, aunque más cómodo, es incorrecto [8]. Véase la Figura. 3.27, punto *B*.

El error es debido al fenómeno de estricción, descrito ya anteriormente.

#### 3.9.4 ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción consiste en someter una o más probetas del material en ensayo a un esfuerzo axial, gradualmente creciente, hasta provocar su rotura.

Bajo el esfuerzo de tracción aplicado en forma gradual y continua, desde cero hasta su valor máximo, la probeta se alarga algún tanto, que se medirá después de la rotura haciendo coincidir exactamente las dos partes de la misma. Al mismo tiempo que se alarga, disminuyen las dimensiones transversales de la probeta, disminución que va acompañada de una generación de calor procedente de las transformaciones de la estructura cristalina, debidas al trabajo de deformación [5].

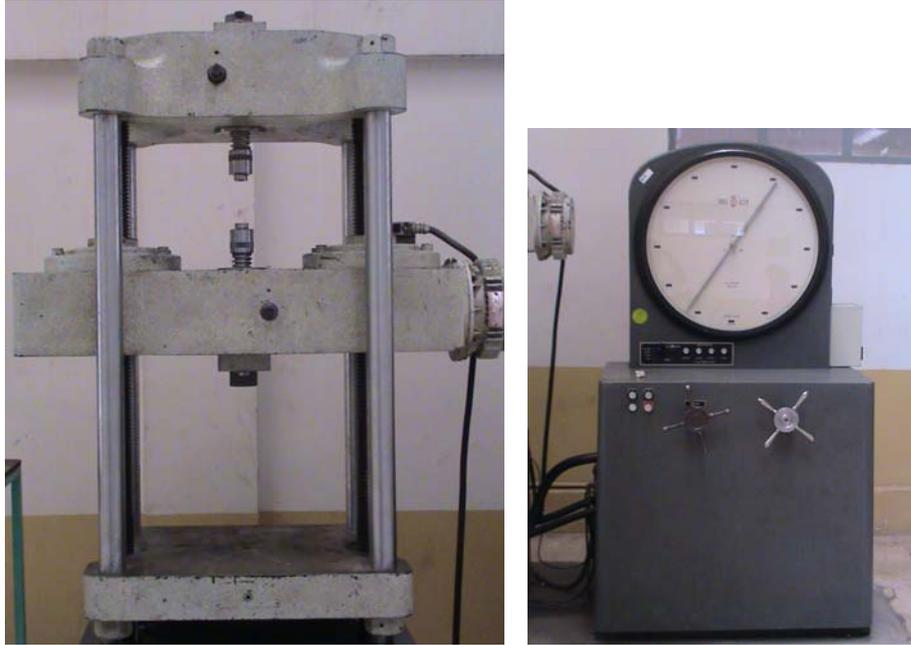
#### **3.9.4.1 PROCEDIMIENTO**

El ensayo de tracción se lo realiza en base a la norma ASTM E 8.

Un resumen de este procedimiento es el siguiente [20]:

1. Se preparan las probetas con las dimensiones establecidas por la norma.
2. Desde el centro de las probetas se miden 25 mm hacia ambos lados, obteniendo la longitud de ensayo (50 mm).
3. Se realizan marcas en estos puntos con un cincel de manera que se formen unos agujeros pequeños.
4. Luego, se coloca la probeta en las mordazas de la maquina universal.
5. Se coloca un deformímetro, haciendo coincidir su dispositivo de sujeción en los agujeros creados por el cincel.
6. Se aplica una precarga, según sea al material a ensayar. Para aleaciones de aluminio, se recomienda una precarga de 4 kg.
7. Finalmente se aplica carga de forma gradual y continua y se lee la deformación cada cierto intervalo de carga. Para aleaciones de aluminio, el intervalo de lectura de deformación es cada 40 kg.

La Figura 3.29 muestra una máquina universal típica para ensayos mecánicos en materiales metálicos.



**Figura 3.29:** Máquina Universal para ensayos mecánicos en materiales metálicos.

### 3.9.5 RESISTENCIA AL IMPACTO

El *impacto* se refiere a la colisión de dos masas con velocidad inicial relativa.

En algunos casos se desea lograr un impacto conocido en el diseño; así sucede, por ejemplo, en el diseño de prensas de acuñado, estampado y formado. En otras ocasiones, el impacto ocurre por deflexiones excesivas o por holguras entre partes, y en esas circunstancias se desean minimizar los efectos.

El *choque* es un término más general que se usa para describir cualquier carga o perturbación aplicada repentinamente. Así, el estudio del choque incluye el impacto como un caso especial. Hay dos métodos generales para el estudio del choque, según sea que se utilice sólo la estática en el análisis o si se usan la estática y la dinámica [6].

El estudio de ambos casos queda fuera del alcance y del propósito de este trabajo, razones por las cuales no se volverá a hacer referencia a los mismos.

Una fuerza aplicada a una estructura o a una parte se llama *carga de impacto*, si el tiempo de aplicación es menor que  $1/3$  del período natural de vibración mínimo de la parte o de la estructura. De otro modo, se llama simplemente *carga estática* [6].

Cuando un material se sujeta a un golpe repentino y violento, en el que la velocidad de deformación es extremadamente rápida, se puede comportar en una forma mucho más frágil que la que se observa en el ensayo de tensión.

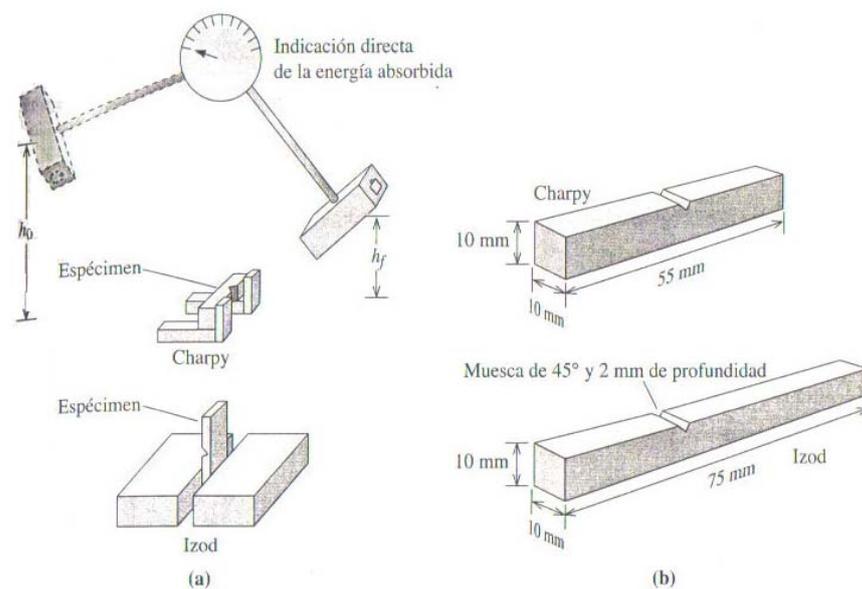
Con frecuencia se usa un ensayo de impacto para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con el ensayo de tensión, en el de impacto las tasas de deformación unitaria son mucho mayores ( $\dot{\varepsilon} \approx 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) [4].

### 3.9.5.1 TENACIDAD Y PRUEBAS DE IMPACTO

La *tenacidad* es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de su fractura. Esta propiedad es de importancia en ingeniería cuando se considera la habilidad del material a soportar un impacto sin fracturarse [1].

Aunque la tenacidad de un material puede obtenerse calculando el área bajo el diagrama esfuerzo-deformación, una prueba de impacto indicará la tenacidad relativa [3].

Se han inventado muchos procedimientos de prueba, incluyendo el ensayo de *Charpy* y el ensayo de *Izod* (véase la Figura 3.30). Los ensayos de impacto se realizan en base a la norma ASTM E 23.



**Figura 3.29:** Ensayo de impacto: (a) ensayos de Charpy e Izod y (b) dimensiones estándar [4].

El ensayo de Izod se usa frecuentemente en materiales plásticos. El espécimen de ensayo puede o no tener muesca; los especímenes con muesca en V son mejores para medir la resistencia del material a la propagación de grietas.

En el ensayo hay un péndulo pesado que comienza a moverse a una altura  $h_o$ , describe su arco, golpea y rompe el espécimen, y llega a una altura final  $h_f$  menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la *energía de impacto* que absorbió el espécimen cuando falló.

Para el ensayo de Charpy, la energía se suele expresar en joules (J) o en libra-pie (lb.ft). Los resultados del ensayo de Izod se expresan en J/m o en lb.ft/in [4].

De la descripción de la prueba, es obvio que la prueba de impacto no da la tenacidad verdadera, sino su comportamiento en función de una muesca en particular; sin embargo, los resultados son útiles para propósitos de comparación [3].

Las pruebas de impacto como la descrita anteriormente generan útiles datos cuantitativos con muestras y equipos relativamente simples. Sin embargo, estas pruebas no proporcionan datos adecuados para el diseño de secciones de materiales que contengan grietas o defectos.

Este tipo de datos se obtienen desde la disciplina de la *Mecánica de la Fractura*, en la cual se realizan análisis teóricos y experimentales de la fractura de materiales estructurales que contienen grietas o defectos preexistentes [1].

### 3.9.5.2 ENSAYO CHARPY

La resiliencia, considerada como *aptitud para resistir solicitaciones por impacto*, puede admitirse que es directamente proporcional a la tenacidad del material, pero hay que tener en cuenta que la resiliencia por sí sola no es suficiente para valorar la tenacidad.

Un material puede llamarse tenaz cuando tiene una buena resistencia a la tracción asociada a un buen alargamiento y a una buena resiliencia.

Puesto que el impacto es una sollicitación dinámica, ya que la carga se aplica instantáneamente con su valor máximo, la resiliencia se mide determinando la energía cinética absorbida por la rotura del material [5].

### 3.9.5.3 PROCEDIMIENTO

La prueba de impacto se la realiza con el *péndulo de Charpy*.

El procedimiento consiste en lo siguiente [24]:

1. Se coloca un mazo a una altura determinada y se la sostiene por medio de un dispositivo de enganche.
2. La probeta, con las dimensiones estándar, se dispone sobre una base y se apoya en ambos extremos de modo que la muesca se encuentre del lado contrario en donde el martillo la golpeará.
3. Finalmente, se desengancha el mazo, éste impacta sobre la probeta y se lee directamente el valor de la energía absorbida por el material en una carátula

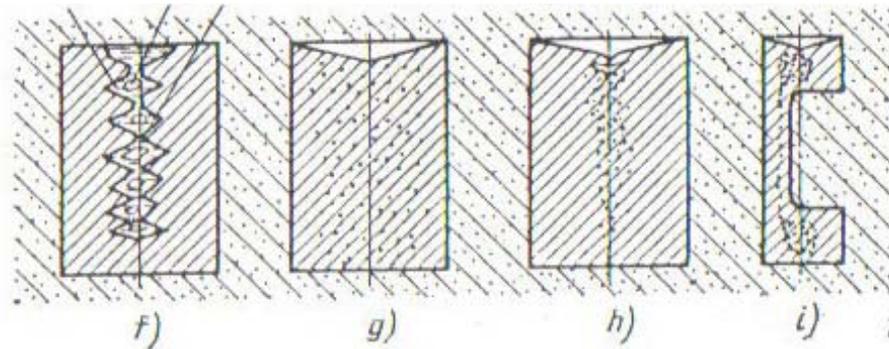
La Figura 3.31 muestra la máquina de péndulo de Charpy.



**Figura 3.31:** Máquina de péndulo Charpy.

### 3.9.6 POROSIDAD

La porosidad de contracción es la acumulación de pequeñas oquedades (poros) de forma irregular, los cuales se forman en la moldura como resultado de la contracción volumétrica\* al no haber afluencia de metal líquido. Véase la Figura 3.32.



**Figura 3.32:** Esquema de la formación de rechupes de contracción en una moldura [2].

Los poros de contracción  $P$  aparecen en los espacios interdendríticos  $IN$  en el momento cuando la contracción volumétrica aún continúa y el suministro de metal líquido  $L$  a los poros se interrumpe. Durante la solidificación las dendritas que crecen se unen, creando grupos aislados unos de otros. Cuando cesa la alimentación de la masa fundida se crean pequeñas oquedades, cuyo conjunto forma la porosidad de contracción.

Se distingue la porosidad difusa, axial y local.

La porosidad difusa (Figura 3.32g) son poros pequeños diseminados uniformemente por una gran parte del volumen de la moldura. Ésta se desarrolla durante la solidificación lenta de molduras gruesas de aleaciones con gran intervalo de temperatura de solidificación.

La porosidad axial (Figura 3.32h) se crea en las partes centrales de las molduras, como también en las secciones largas y delgadas. Esto se explica por el hecho de que la contracción volumétrica de la parte central aún no terminó, disminuyó o se interrumpió el acceso a ésta de la aleación líquida.

\* Es la propiedad de los metales y aleaciones de reducir su volumen durante la solidificación y enfriamiento.

La porosidad de contracción local (Figura 3.32*i*) se crea en las partes de la moldura, separadas de la aleación líquida por la aleación ya solidificada, que cerró el acceso de aleación líquida a ellas. Ésta consta de poros grandes, concentrados en las partes macizas de las molduras y en los lugares de unión de los bebederos [2].

#### **3.9.6.1 DETERMINACIÓN DE POROS**

La determinación de la porosidad se realizará con la ayuda del software *Clemex Vision* en un área de  $49.7 \times 10^6 \mu\text{m}^2$  en muestras de probetas para ensayos de tracción de un diámetro de 12.5 mm. Este software permitirá determinar la esferoidicidad, la cantidad y el tamaño de los poros que se encuentren dentro del área antes mencionada.

## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se describieron los procedimientos necesarios para realizar los ensayos metalúrgicos y mecánicos en las aleaciones obtenidas; en éste se analizarán los datos obtenidos de los ensayos antes mencionados, con el propósito de establecer una relación entre microestructura y propiedades mecánicas.

#### 4.2 ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

Se inicia el análisis del proceso de fundición con lo que respecta a la fusión de la carga.

La gráfica de presiones de vapor indica que para la aleación de aluminio ASTM 40E, primero debe fundirse el aluminio (perfilería) y luego debe añadirse el Zn, con el propósito de evitar que éste permanezca mucho tiempo expuesto a la temperatura de colado (750°C). Con esto se evita que éste elemento se evapore por completo. Véase la Figura 4.1.

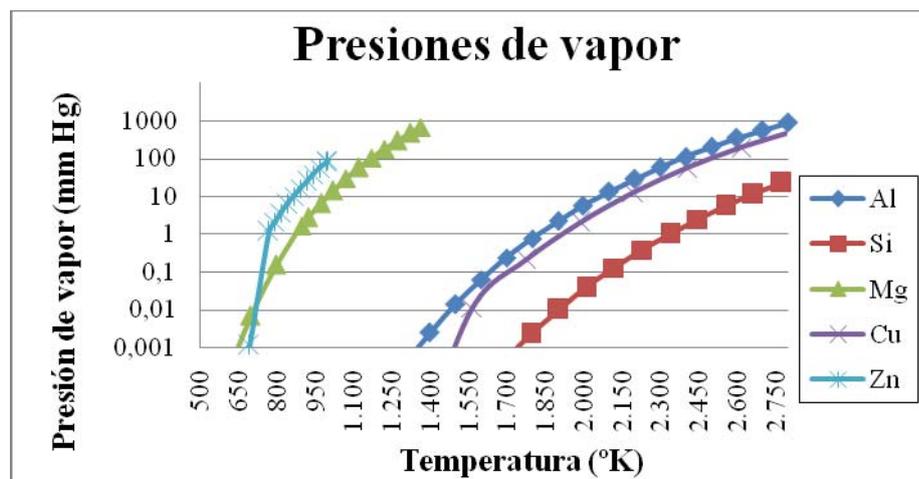


Figura 4.1: Presiones de vapor.

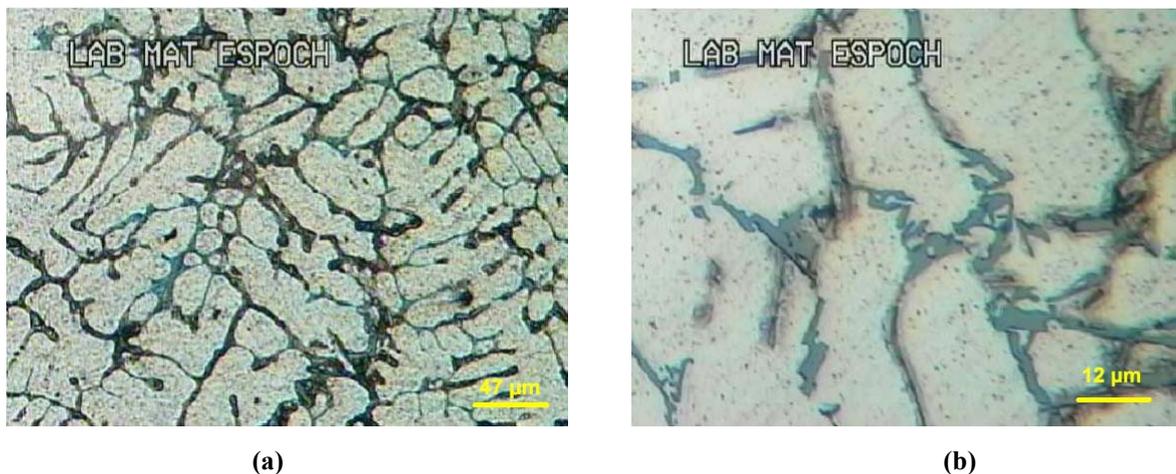
### 4.3 EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

Una vez obtenida esta aleación, se procede al estudio de la microestructura de cada una de las probetas, tanto en condiciones de fundido como en condiciones de tratamiento térmico.

La evaluación de la microestructura se realizó a 5mm de distancia con respecto a la zona de fractura de las probetas.

#### 4.3.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO

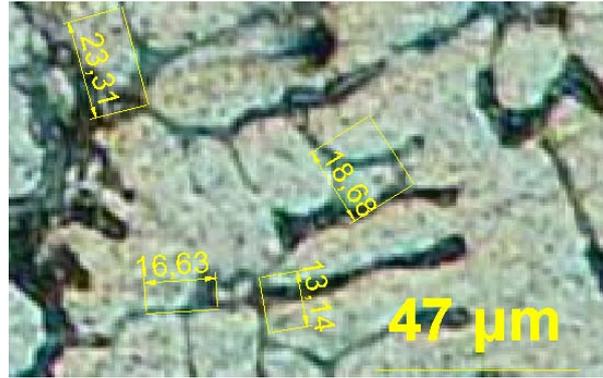
##### a) PROBETA 1



**Figura 4.2:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

En la Figura 4.2(a) se puede apreciar la estructura dendrítica propia de las aleaciones obtenidas por proceso de fundición con una distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios de  $18.69 \mu\text{m}$ , que fue obtenida de la siguiente manera:

Con la ayuda del software AutoCAD 2008 se mide la distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios tal como se muestra en la Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Distancia entre brazos dendríticos secundarios.

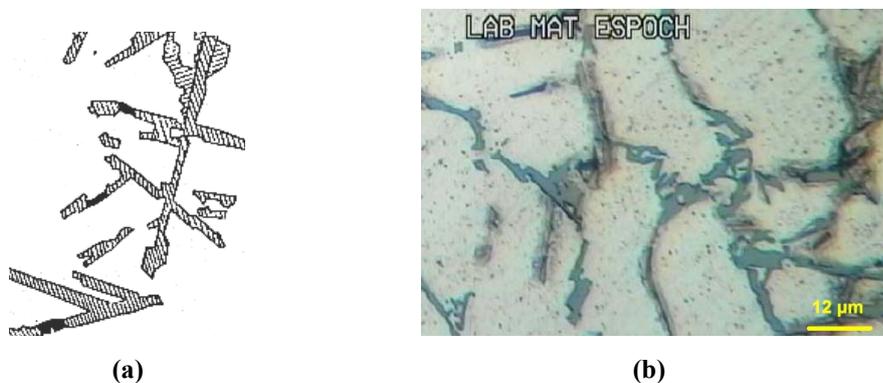
A continuación se muestran todas las medidas de las dendritas para la Figura 4.2(a):

**Tabla 4.1:** DISTANCIA ENTRE BRAZOS DENDRÍTICOS SECUNDARIOS (en  $\mu\text{m}$ ).

31,04	22,97	27,57	8,44	15,05	23,19	15,33	19,26
13,95	13,98	20,68	23,31	18,68	16,63	13,14	15,82
suma							299,04
promedio							<b>18,69</b>

En la Figura 4.2(b) se muestran los compuestos intermetálicos: Al-Si (zonas verdes oscuras), Al-Mg (zonas verdes claras), muy probablemente Fe (zonas negras) y la fase  $\alpha$ -Al (zonas blancas).

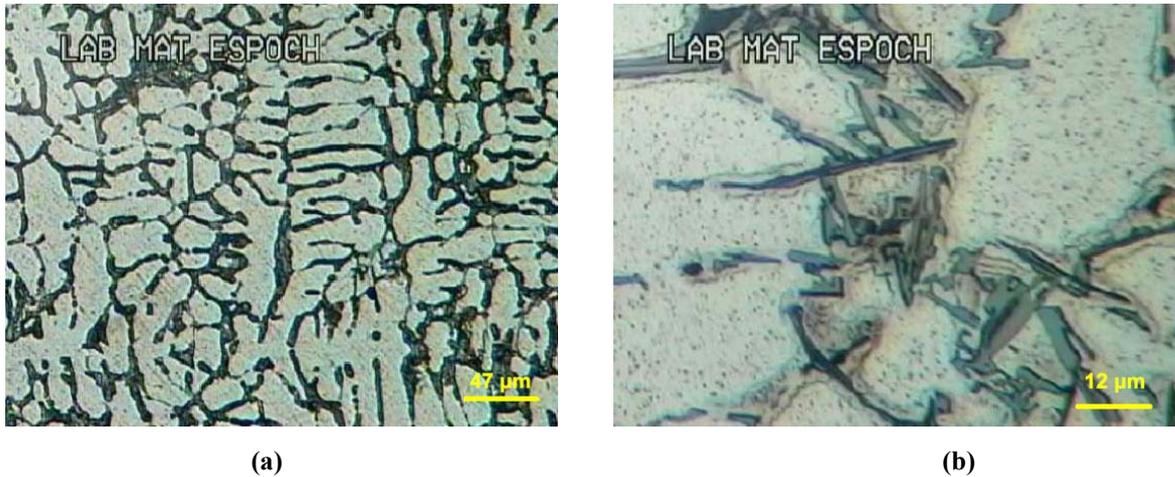
En las aleaciones aluminio-silicio sin tratamiento térmico, los cristales de silicio eutéctico tienen forma acicular y ramificada, con contornos puntiagudos que favorecen la aparición de microgrietas y reducen la ductilidad de la aleación.



**Figura 4.4:** (a) Representación de la estructura original de silicio ramificado.  
(b) Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355.

Utilizando el mismo procedimiento, se determina la distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios para las probetas de ensayo de tracción restantes.

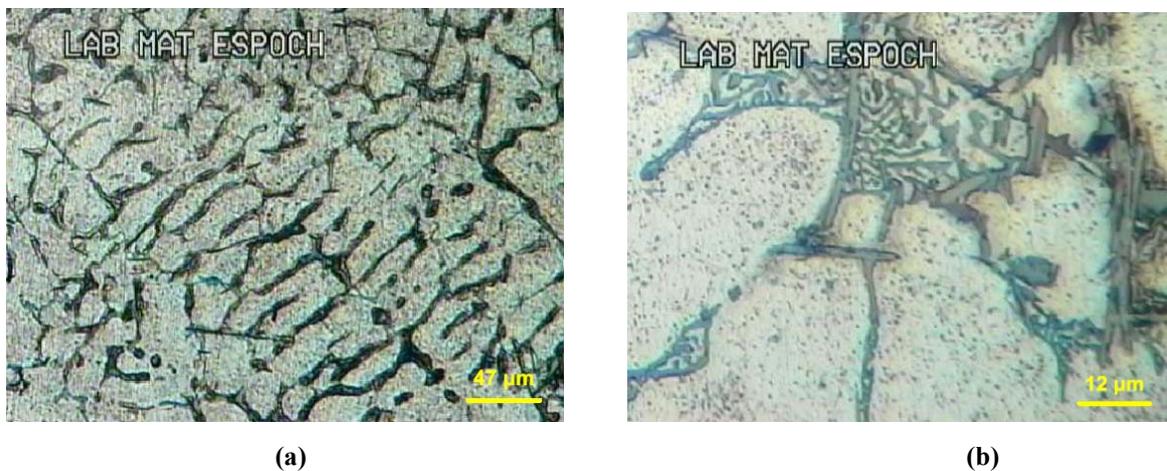
### b) PROBETA 2



**Figura 4.5:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

La distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios es de 15.49  $\mu\text{m}$ . Las fases y compuestos intermetálicos son los mismos que se describieron para la probeta 1, y de hecho, serán las mismas para las probetas restantes.

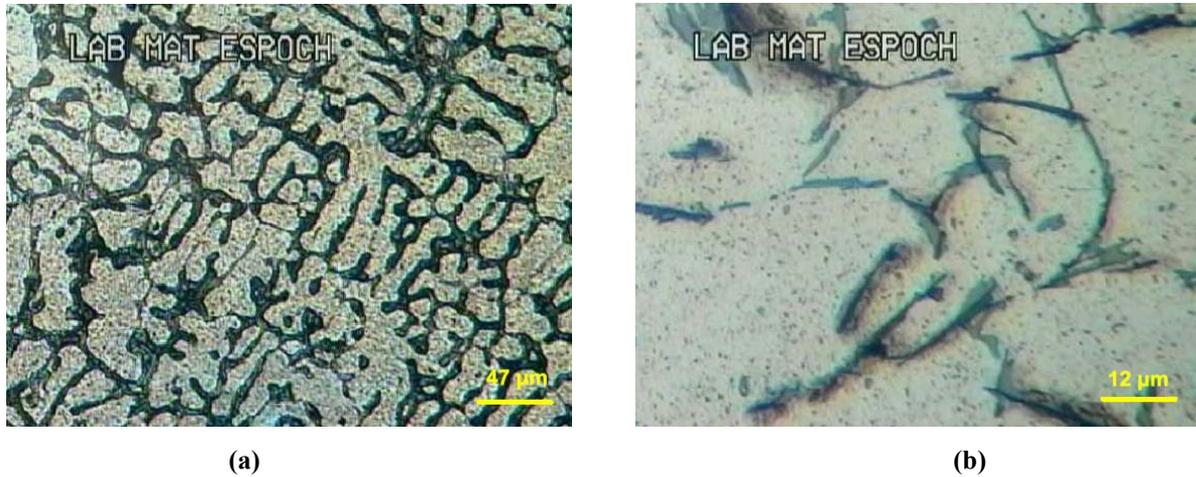
### c) PROBETA 3



**Figura 4.6:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

La distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios es de 20.87  $\mu\text{m}$ .

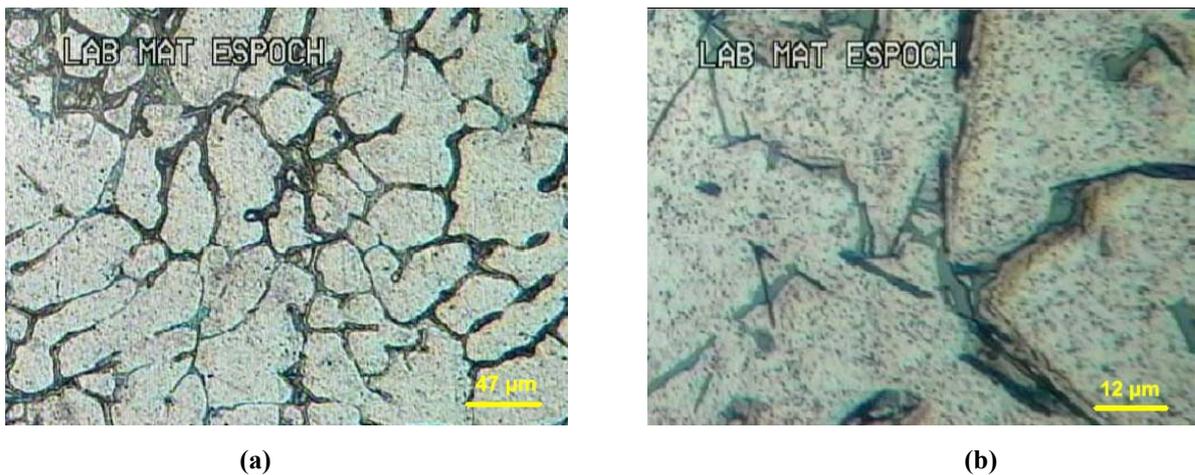
**d) PROBETA 4**



**Figura 4.7:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

La distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios es de 18.22  $\mu\text{m}$ .

**e) PROBETA 5**



**Figura 4.8:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido (F) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

La distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios es de 31.74  $\mu\text{m}$ .

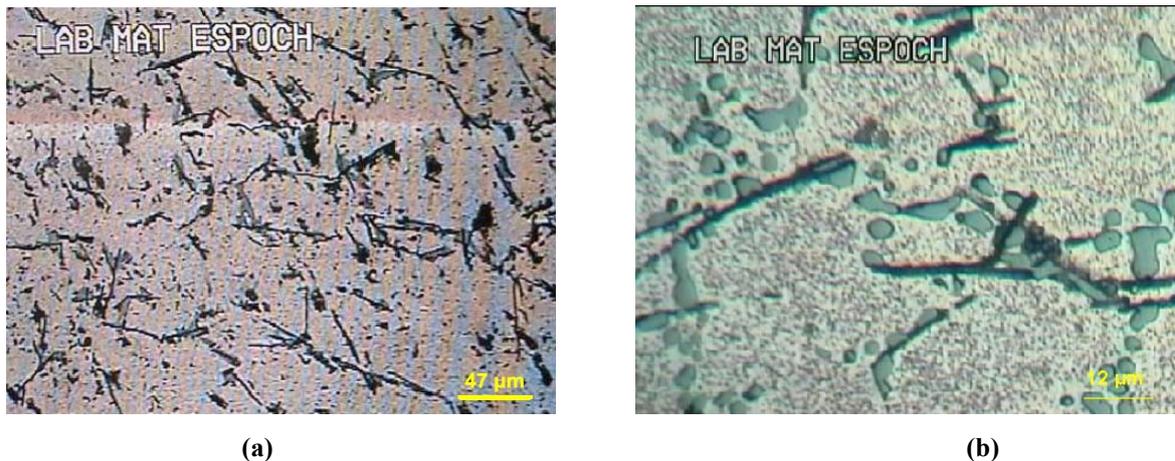
**Tabla 4.2:** DISTANCIA ENTRE BRAZOS DENDRÍTICOS SECUNDARIOS (en  $\mu\text{m}$ ).

Probeta	Distancia ( $\mu\text{m}$ )
1	18.69
2	15.49
3	20.87
4	18.22
5	31.74
<b>Promedio</b>	<b>21.002</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>4.2952</b>

La distancia promedio entre brazos dendríticos secundarios de la aleación de aluminio ASTM 355 en condiciones de fundido es:  $(21.002 \pm 4.2952) \mu\text{m}$ .

#### 4.3.2 PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE (T6)

##### a) PROBETA 1



**Figura 4.9:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

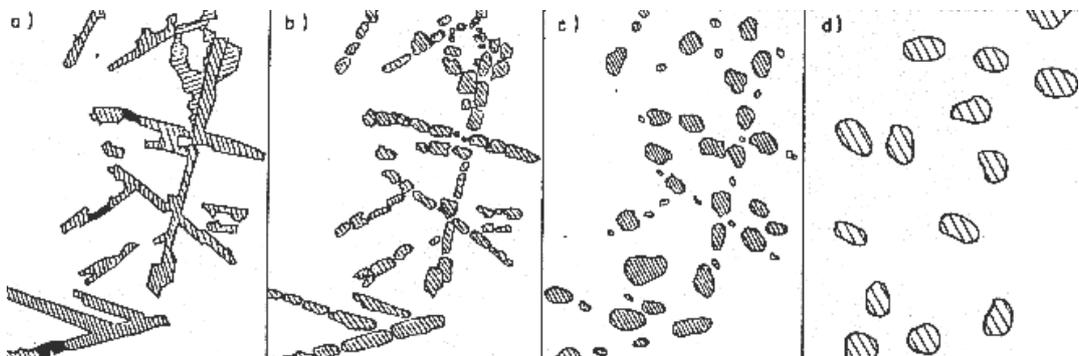
En la Figura 4.9(a) se puede observar que la estructura dendrítica ha desaparecido luego del tratamiento térmico T6.

En la Figura 4.9(b) se muestran los compuestos intermetálicos: Al-Si (zonas verdes oscuras), Al-Mg (zonas verdes claras), muy probablemente Fe (zonas negras) y la fase  $\alpha$ -Al (zonas blancas). Obsérvese cómo ha cambiado la morfología del Si (de forma de lanzas a forma tetragonal).

Cuando una aleación es tratada térmicamente, se pretende crear una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos que se oponen al movimiento de dislocación y, por lo tanto, fortalecen la aleación sometida a tratamiento térmico.

La etapa de puesta en solución de un tratamiento T6 desempeña varias funciones importantes: disolución del  $Mg_2Si$ , homogeneización de la solución sólida y fragmentación, esferoidización y engrosamiento del silicio eutéctico. La fase  $\alpha$ -Al se enriquece en silicio y magnesio.

Los cambios en la morfología del silicio eutéctico son generalmente más lentos, comenzando al cabo de varias horas, y dependen de parámetros tales como la temperatura de puesta en solución y el tamaño/forma de la partícula original que, a su vez, vienen determinados por las condiciones de solidificación, tamaño de grano y de modificación del eutéctico.



**Figura 4.10:** Representación esquemática de la evolución experimental del silicio eutéctico, durante el tratamiento térmico T6 [33].

En la Figura 4.10(a) se muestra la estructura original de silicio ramificado. En la parte (b), se muestra la primera fase del proceso de subdivisión de cristales de silicio. En la parte (c), se indica el engrosamiento y disminución del número de partículas y la parte (d), muestra la estructura final idealizada de partículas esféricas.

Los cambios producidos durante el proceso de esferoidización de las láminas de silicio, mejoran las propiedades mecánicas de esta aleación.

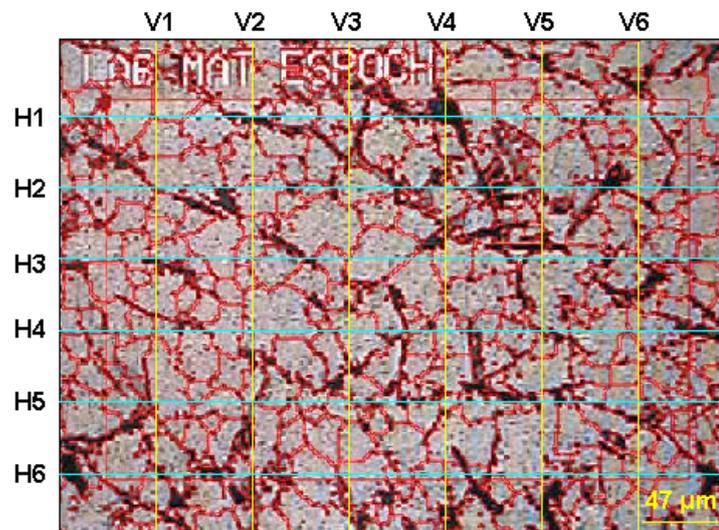
La redistribución de los cristales de silicio en la matriz de aluminio provoca una mejora en el comportamiento plástico y en la maquinabilidad de la aleación.

El silicio modificado, con formas redondeadas o más o menos esféricas, aumenta la plasticidad de la aleación y su resistencia a la propagación de grietas.

La discusión anterior es la misma para las probetas de ensayo de tracción restantes. Por éste motivo, a continuación sólo se incluirán las fotografías de las microestructuras correspondientes a estas probetas.

En la Figura 4.9(a) no es posible realizar la medición de distancia entre brazos dendríticos secundarios, pero, utilizando el software *AphelionLab*, se puede medir el tamaño de grano.

El índice de tamaño de grano se determinará según norma ASTM E 112, utilizando el método de intersección.



**Figura 4.11:** Determinación del índice de tamaño de grano por el método de intersección a 100x.

En la Figura 4.11, V y H representan las líneas verticales y horizontales, necesarias para el método de intersección, respectivamente.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO**

Línea	Verticales						Horizontales					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	H1	H2	H3	H4	H5	H6
#Granos	14	12	12	13	10	15	17	11	18	16	13	16
Promedio	12.67						15.17					

Para determinar el índice tamaño de grano vertical, se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_v = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{L_v}{10\bar{G}_v}\right) \quad (4-1)$$

donde:

$G_v$  = índice de tamaño de grano vertical.

$L_v$  = longitud de una línea vertical, (281.25  $\mu\text{m}$ ).

$\bar{G}_v$  = promedio de granos verticales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.3 en la ecuación (4-1), se determina el índice de tamaño de grano vertical:

$$G_v = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{281.25}{10 * 12.67}\right) = 7.70 \quad (4-2)$$

Para determinar el índice de tamaño de grano horizontal, se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_h = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{L_h}{10\bar{G}_h}\right) \quad (4-3)$$

donde:

$G_h$  = índice de tamaño de grano horizontal.

$L_h$  = longitud de una línea horizontal, (375  $\mu\text{m}$ ).

$\bar{G}_h$  = promedio de granos horizontales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.3 en la ecuación (4-3), se determina el índice de tamaño de grano horizontal:

$$G_h = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{375}{10 * 15.17}\right) = 7.39 \quad (4-4)$$

Es posible determinar el grado de esferoidicidad utilizando la siguiente ecuación:

$$e = \frac{Gv}{Gh} \quad (4-5)$$

donde:

$e$  = grado de esferoidicidad, (adimensional).

$Gv$  = índice de tamaño de grano vertical, (adimensional).

$Gh$  = índice de tamaño de grano horizontal, (adimensional).

Reemplazando los valores de las ecuaciones (4-2) y (4-4) en (4-5), se determina el grado de esferoidicidad:

$$e = \frac{7.70}{7.39} = 1.04$$

El valor encontrado de  $e$ , sugiere que esta probeta posee un grano equiaxial, ya que el valor de esta relación es muy cercano a uno, indicando que el índice de tamaño de grano tanto vertical como horizontal es aproximadamente el mismo.

El índice tamaño de grano para esta probeta se determina mediante la ecuación:

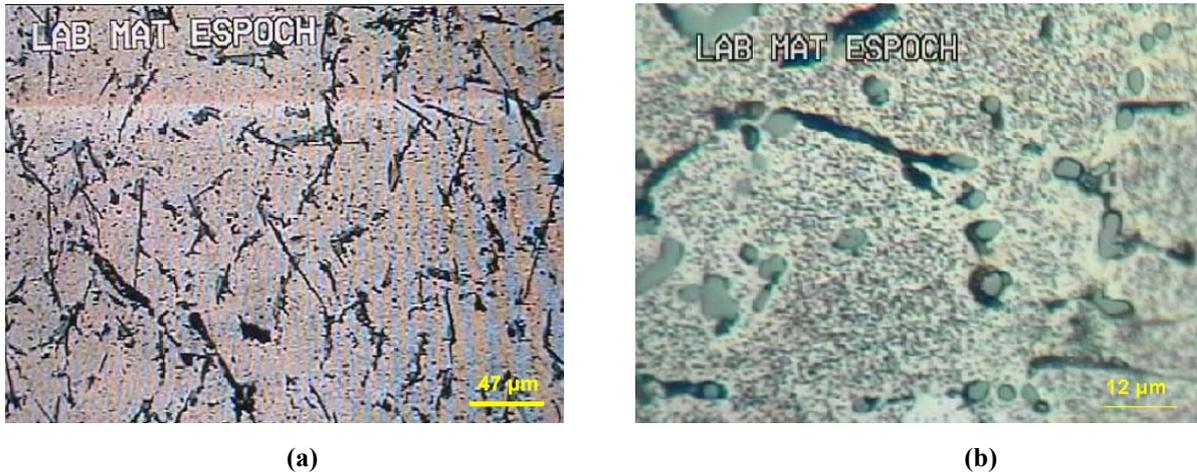
$$G = \frac{(Gv + Gh)}{2} \quad (4-6)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (4-6), se determina el índice de tamaño de grano:

$$G = \frac{(7.70 + 7.39)}{2} = 7.55$$

El procedimiento anterior se realiza en todas las muestras para determinar el índice de tamaño de grano. Para las figuras siguientes únicamente se indica el índice de tamaño de grano determinado y el grado de esferoidicidad.

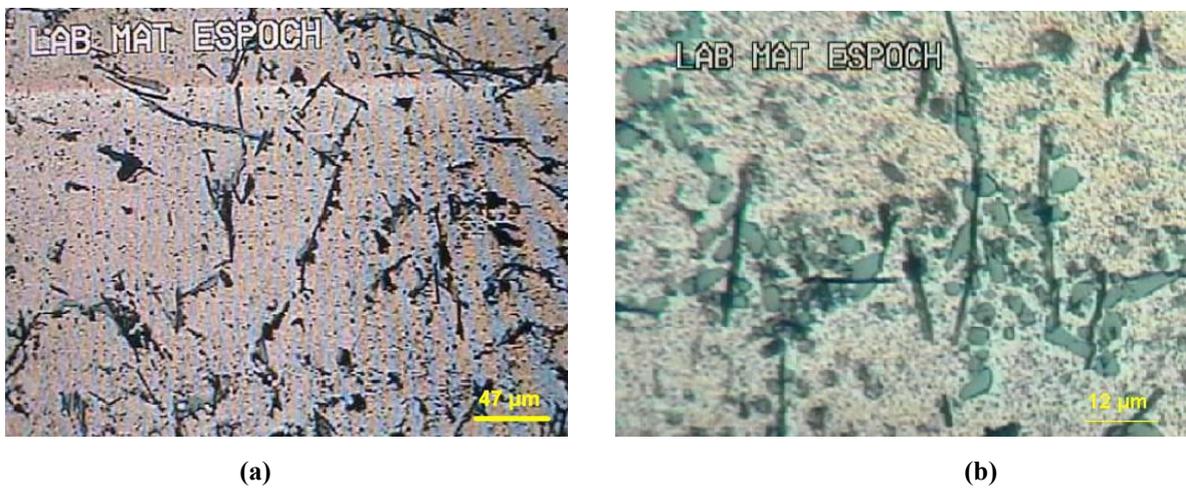
## b) PROBETA 2



**Figura 4.12:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 7.46 y 1.05, respectivamente.

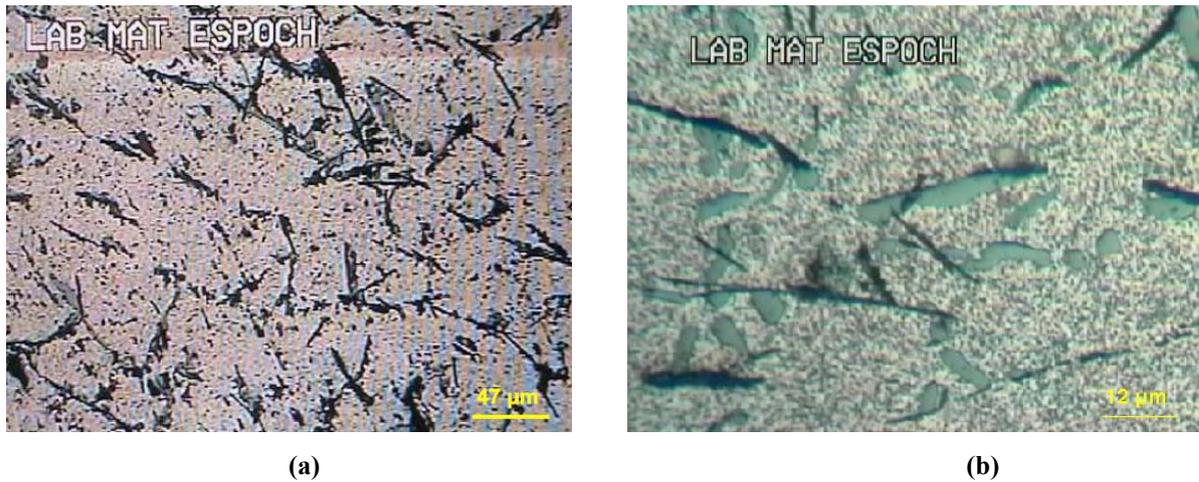
### c) PROBETA 3



**Figura 4.13:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 7.35 y 1.04, respectivamente.

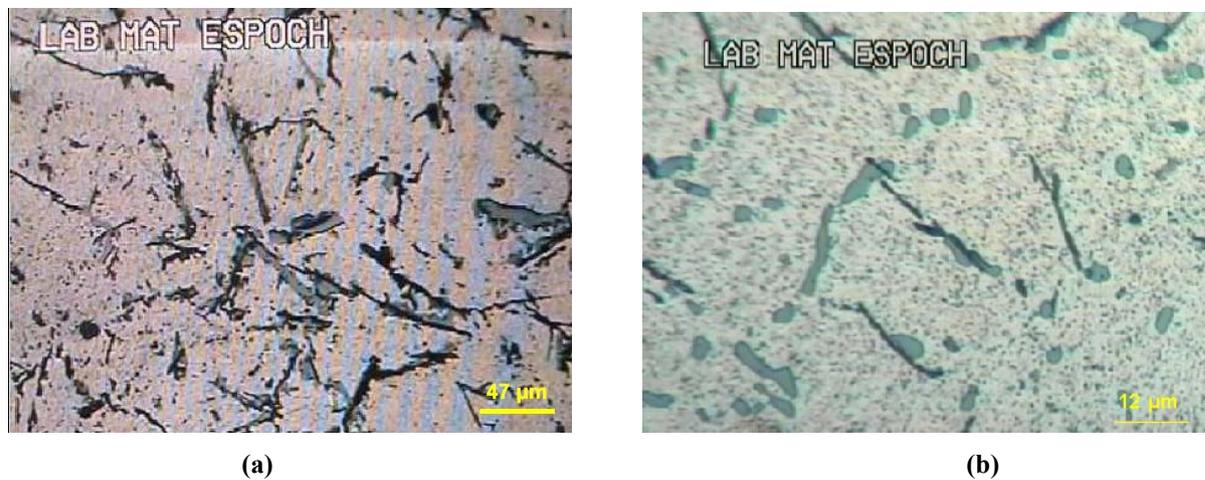
### d) PROBETA 4



**Figura 4.14:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.95 y 1.03, respectivamente.

#### e) PROBETA 5



**Figura 4.15:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial (T6) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.31 y 1.06, respectivamente.

**Tabla 4.4:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD

<b>Probeta</b>	<b>Índice de tamaño de grano (G)</b>	<b>Grado de esferoidicidad</b>
1	7.54	1.04
2	7.46	1.05
3	7.35	1.04
4	6.95	1.03
5	6.31	1.06
<b>Promedio</b>	<b>7.12</b>	<b>1.04</b>

Los valores que se muestran en la Tabla 4.4, indican que el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para la aleación de aluminio ASTM 355, tratada térmicamente, son 7.12 y 1.04, respectivamente.

Esto último indica que se tiene un grano fino y equiaxial.

#### **4.4 EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E**

De igual manera, una vez obtenida esta aleación, se realiza el estudio de la microestructura de cada una de las probetas, tanto en condiciones de fundido como en condiciones de tratamiento térmico.

De forma similar, la evaluación de la microestructura se realizó a 5mm de distancia con respecto a la zona de fractura de las probetas.

A continuación, se realizará una discusión similar a la anterior para la aleación de aluminio ASTM 40, en condiciones de fundido y tratadas térmicamente.

##### **4.4.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO**

### a) PROBETA 1



**Figura 4.16:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

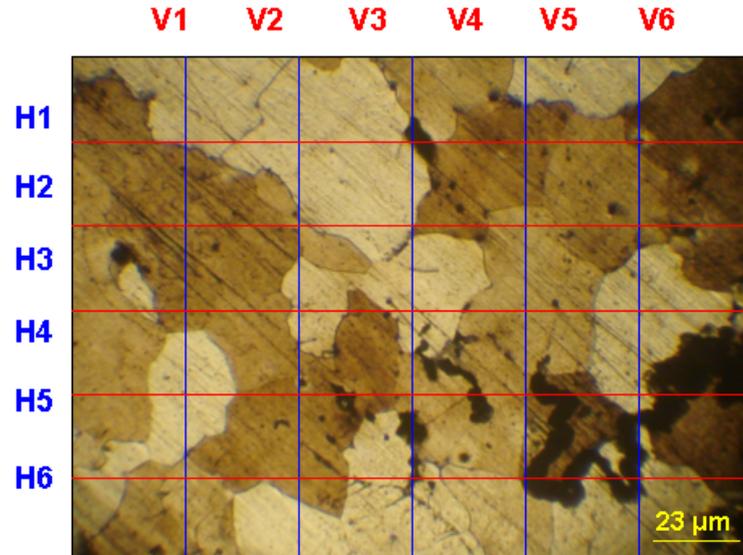
En la Figura 4.16(a) se muestra la estructura dendrítica (ubicada luego de un cuidadoso barrido de la superficie). Obsérvese la presencia de microporos.

En la Figura 4.16(b) se muestran los compuestos intermetálicos: Al-Si (zonas verdes oscuras), Al-Mg (zonas verdes claras), muy probablemente Fe (zonas negras) y la fase  $\alpha$ -Al (zonas blancas). Las partículas finas dispersas en la matriz son del compuesto intermetálico  $MgZn_2$ .

Puesto que las partículas de silicio presentan una forma redondeada, se espera que las propiedades mecánicas sean elevadas, por lo mencionado en la sección 4.3.2.

La discusión anterior es la misma para las probetas de ensayo de tracción restantes. Por éste motivo, a continuación sólo se incluirán las fotografías de las microestructuras correspondientes a estas probetas.

De la misma forma que se hizo en la sección anterior, en ésta también se determina el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad para la aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido.



**Figura 4.17:** Determinación del índice de tamaño de grano por el método de intersección a 130x.

En la Figura 4.17, V y H representan las líneas verticales y horizontales, necesarias para el método de intersección, respectivamente.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO

Línea	Verticales						Horizontales					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	H1	H2	H3	H4	H5	H6
#Granos	3.5	4.5	4	3.5	4	4	5	7	7.5	7.5	6	8
Promedio	3.92						6.67					

Para determinar el índice de tamaño de grano vertical, se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_v = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{L_v}{10\overline{G}_v}\right) \quad (4-7)$$

donde:

$G_v$  = índice de tamaño de grano vertical.

$L_v$  = longitud de una línea vertical, (138.75 μm).

$\overline{G}_v$  = promedio de granos verticales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.5 en la ecuación (4-7), se determina el índice de tamaño de grano vertical:

$$Gv = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{138.75}{10 * 3.92}\right) = 6.35 \quad (4-8)$$

Para determinar el índice de tamaño de grano horizontal, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Gh = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{Lv}{10\overline{Gh}}\right) \quad (4-9)$$

donde:

$Gh$  = índice de tamaño de grano horizontal.

$Lh$  = longitud de una línea horizontal, (185  $\mu\text{m}$ ).

$\overline{Gh}$  = promedio de granos horizontales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.5 en la ecuación (4-9), se determina el índice de tamaño de grano horizontal:

$$Gh = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{185}{10 * 6.67}\right) = 7.06 \quad (4-10)$$

Es posible determinar el grado de esferoidicidad utilizando la siguiente ecuación:

$$e = \frac{Gv}{Gh} \quad (4-11)$$

donde:

$e$  = grado de esferoidicidad, (adimensional).

$Gv$  = índice de tamaño de grano vertical, (adimensional).

$Gh$  = índice de tamaño de grano horizontal, (adimensional).

Reemplazando los valores de las ecuaciones (4-8) y (4-10) en (4-11), se determina el grado de esferoidicidad:

$$e = \frac{6.35}{7.06} = 0.90$$

El valor encontrado de  $e$ , también sugiere que esta probeta posee un grano equiaxial, ya que el valor de esta relación es muy cercano a uno, indicando que el índice de tamaño de grano tanto vertical como horizontal es aproximadamente el mismo.

El índice de tamaño de grano para esta probeta se determina mediante la ecuación:

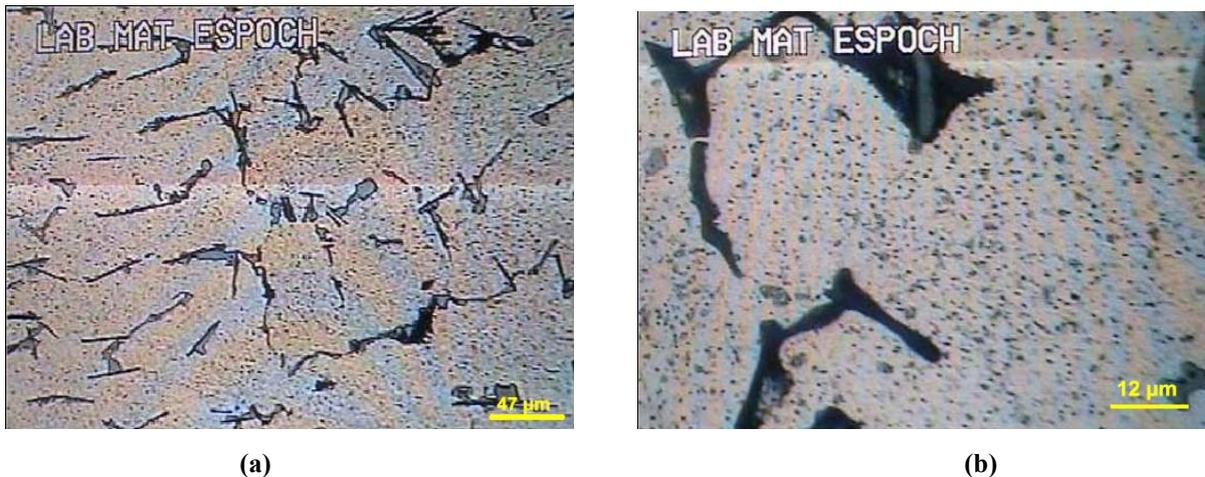
$$G = \frac{(Gv + Gh)}{2} \quad (4-12)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (4-12), se determina el índice de tamaño de grano:

$$G = \frac{(6.35 + 7.06)}{2} = 6.71$$

El procedimiento anterior se realiza en todas las muestras para determinar el índice de tamaño de grano. Para las figuras siguientes únicamente se indica el índice de tamaño de grano determinado y el grado de esferoidicidad.

#### b) PROBETA 2



**Figura 4.18:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.54 y 0.92, respectivamente.

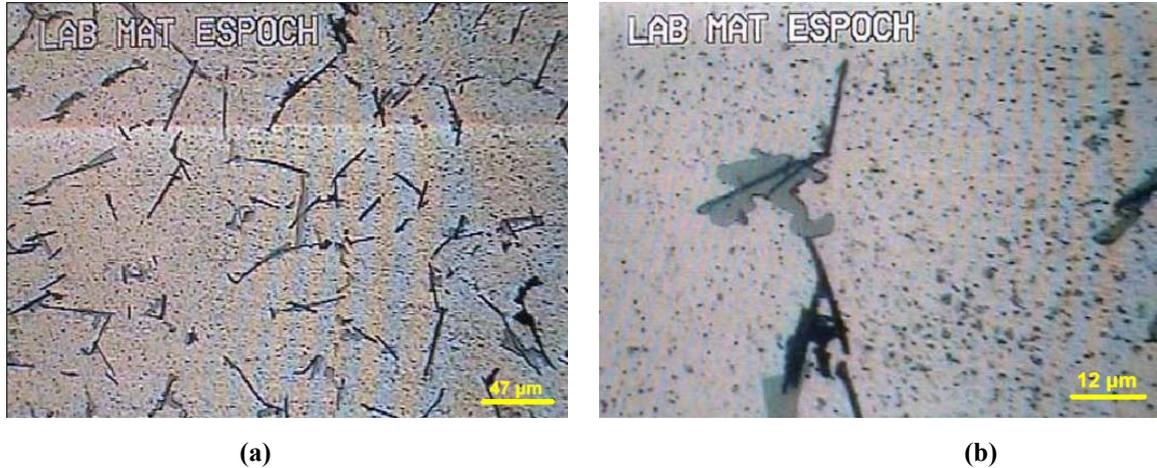
#### c) PROBETA 3



**Figura 4.19:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.76 y 1.11, respectivamente.

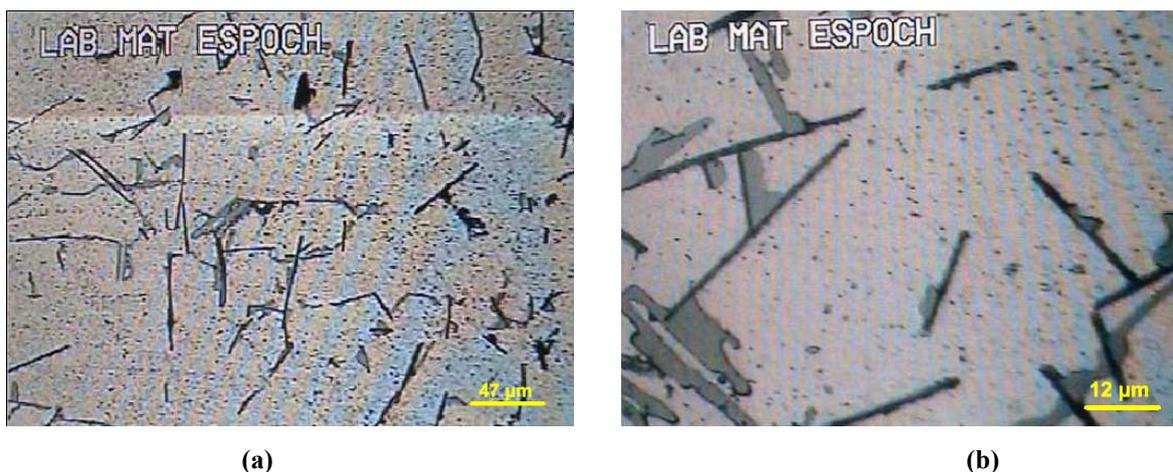
#### d) PROBETA 4



**Figura 4.20:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.78 y 1.01, respectivamente.

#### e) PROBETA 5



**Figura 4.21:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E en condiciones de fundido (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.81 y 1.11, respectivamente.

En la Tabla 4.6 se resumen los valores de índice de tamaño de grano así como del grado de esferoidización.

**Tabla 4.6:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD

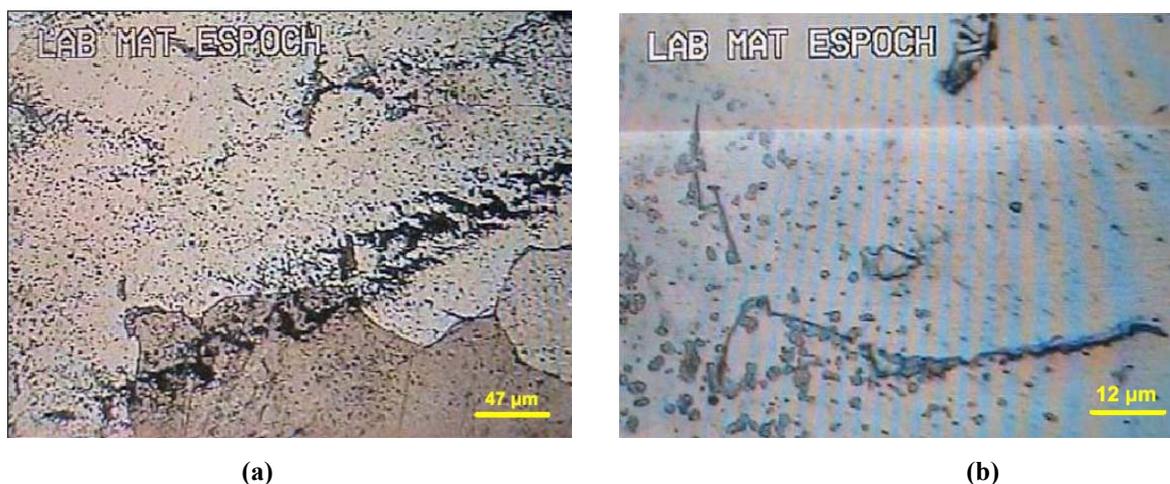
Probeta	Índice de tamaño de grano (G)	Grado de esferoidicidad
1	6.69	0.90
2	6.54	0.92
3	6.76	1.11
4	6.78	1.01
5	6.81	1.11
<b>Promedio</b>	<b>6.72</b>	<b>1.01</b>

Los valores que se muestran en la Tabla 4.6, indican que el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para la aleación de aluminio ASTM 40E, en condiciones de fundido, son 7 y 1.01, respectivamente.

Esto último indica que se tiene un grano fino y equiaxial.

#### 4.4.2 PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE (T4)

## a) PROBETA 1



**Figura 4.22:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

La Figura 4.22(a) muestra como la estructura dendrítica ha desaparecido, mientras el grano ha aumentado de tamaño.

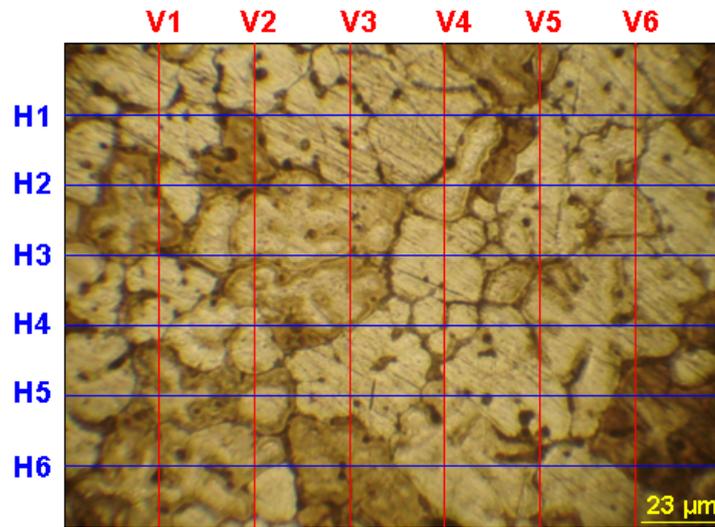
La Figura 4.22(b) muestra los compuestos intermetálicos: la fase  $\alpha$ -Al (zonas blancas). Las partículas finas en la matriz son  $MgZn_2$  y la fase  $\pi$  ( $Al_8Mg_3FeSi_6$ ), que aparece bajo la morfología de "escritura china".

Puesto que el nivel de magnesio retenido en la matriz después del temple controla el endurecimiento por precipitación de la aleación, resulta crucial una correcta comprensión de la transformación de la fase  $\pi$  en el caso que se requiera la máxima resistencia a tracción.

La transformación puede describirse como un proceso mediante el cual algunas partículas de la fase  $\pi$  que contienen magnesio se rompen de manera gradual, total o parcialmente, en forma de agujas finas de otra fase intermetálica de hierro que no contiene magnesio (probablemente fase  $\beta$ -AlFeSi, o una fase de composición similar).

La discusión anterior es la misma para las probetas de ensayo de tracción restantes. Por éste motivo, a continuación sólo se incluirán las fotografías de las microestructuras correspondientes a estas probetas.

A continuación se muestra el procedimiento para determinar el índice de tamaño de grano.



**Figura 4.23:** Determinación del índice de tamaño de grano mediante el método de intersección.

En la Figura 4.3, V y H representan las líneas verticales y horizontales, necesarias para el método de intersección, respectivamente.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO

Línea	Verticales						Horizontales					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	H1	H2	H3	H4	H5	H6
#Granos	6	6.5	6	5	5	5	7	6.5	7.5	8	6.5	7
Promedio	5.58						7.08					

Para determinar el índice de tamaño de grano vertical, se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_v = 10 - 6.6439 \log \left( \frac{L_v}{10 \bar{G}_v} \right) \quad (4-13)$$

donde:

$G_v$  = índice de tamaño de grano vertical.

$L_v$  = longitud de una línea vertical, (138.75 μm).

$\bar{G}_v$  = promedio de granos verticales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.7 en la ecuación (4-13), se determina el índice de tamaño de grano vertical:

$$Gv = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{138.75}{10 * 5.58}\right) = 7.37 \quad (4-14)$$

Para determinar el índice de tamaño de grano horizontal, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Gh = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{Lv}{10Gh}\right) \quad (4-15)$$

donde:

$Gh$  = índice de tamaño de grano horizontal.

$Lh$  = longitud de una línea horizontal, (185  $\mu\text{m}$ ).

$\bar{Gh}$  = promedio de granos horizontales, (adimensional).

Reemplazando los valores que se indican en la Tabla 4.7 en la ecuación (4-15), se determina el índice de tamaño de grano horizontal:

$$Gh = 10 - 6.6439 \log\left(\frac{185}{10 * 7.08}\right) = 7.23 \quad (4-16)$$

Es posible determinar el grado de esferoidicidad utilizando la siguiente ecuación:

$$e = \frac{Gv}{Gh} \quad (4-17)$$

donde:

$e$  = grado de esferoidicidad, (adimensional).

$Gv$  = índice de tamaño de grano vertical, (adimensional).

$Gh$  = índice de tamaño de grano horizontal, (adimensional).

Reemplazando los valores de las ecuaciones (4-14) y (4-16) en (4-17), se determina el grado de esferoidicidad:

$$e = \frac{7.37}{7.23} = 1.02$$

El valor encontrado de  $e$ , también sugiere que esta probeta posee un grano equiaxial, ya que el valor de esta relación es muy cercano a uno, indicando que el índice de tamaño de grano tanto vertical como horizontal es aproximadamente el mismo.

El índice de tamaño de grano para esta probeta se determina mediante la ecuación:

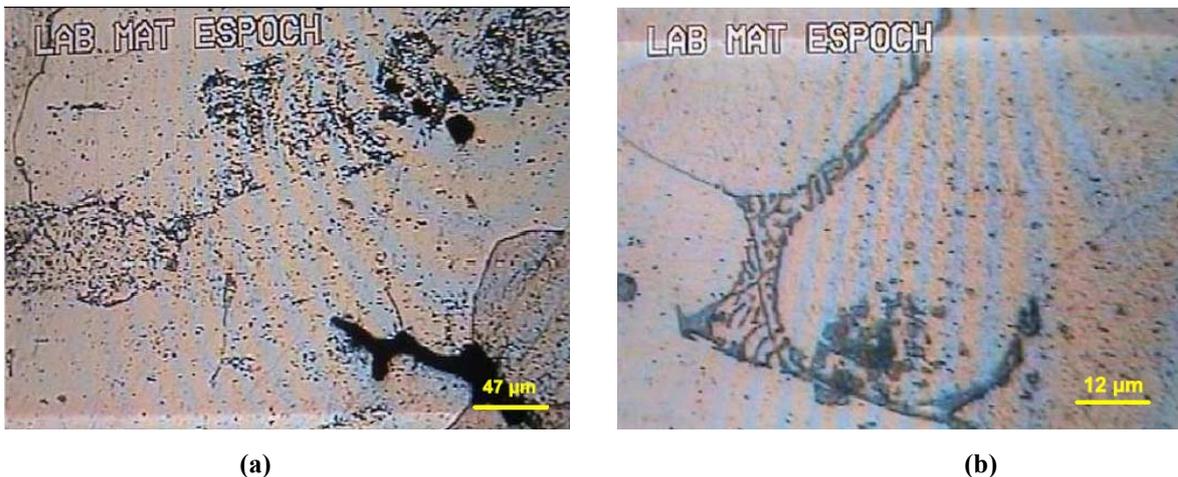
$$G = \frac{(G_v + G_h)}{2} \quad (4-18)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (4-18), se determina el índice de tamaño de grano:

$$G = \frac{(7.37 + 7.23)}{2} = 7.3$$

El procedimiento anterior se realiza en todas las muestras para determinar el índice de tamaño de grano. Para las figuras siguientes únicamente se indica el índice de tamaño de grano determinado y el grado de esferoidicidad.

## b) PROBETA 2



**Figura 4.24:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.72 y 1.03, respectivamente.

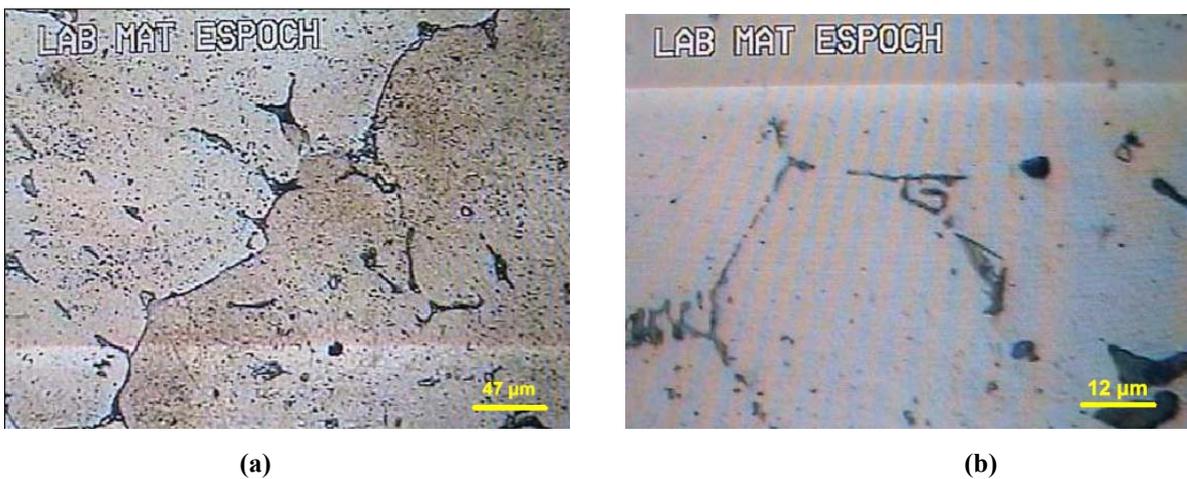
## c) PROBETA 3



**Figura 4.25:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 5.63 y 1.02, respectivamente.

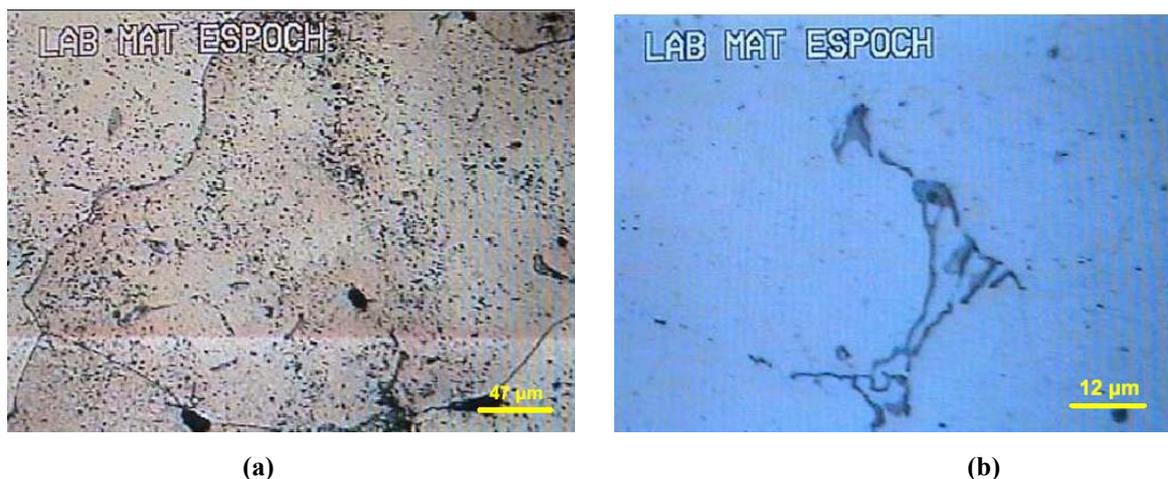
#### d) PROBETA 4



**Figura 4.26:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 100x y **(b)** 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.28 y 0.95, respectivamente.

#### e) PROBETA 5



**Figura 4.27:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 40E sometida a tratamiento térmico de envejecimiento natural (T4) atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 100x y (b) 400x.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 5.63 y 1.02, respectivamente.

En la Tabla 4.8 se indican los valores correspondientes de índice de tamaño de grano (G) y del grado de esferoidicidad.

**Tabla 4.8:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD

Probeta	Índice de tamaño de grano (G)	Grado de esferoidicidad
1	7.30	1.03
2	6.72	1.03
3	6.28	0.95
4	6.27	0.98
5	5.63	1.02
<b>Promedio</b>	<b>6.44</b>	<b>1.00</b>

Los valores que se muestran en la Tabla 4.8, indican que el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para la aleación de aluminio ASTM 40E, en condiciones de fundido, son 6 y 1.00, respectivamente.

Esto último indica que se tiene un grano fino y equiaxial.

#### 4.5 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Los parámetros más importantes que se indican a continuación son los siguientes: resistencia última a la tensión ( $S_{ut}$ ), límite de fluencia ( $S_y$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ), dureza ( $HB$ ), resistencia al impacto ( $I$ ), % de elongación y % de reducción de área (estricción).

#### 4.5.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

##### 4.5.1.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO

En la Tabla 4.9 se indican las propiedades mecánicas más importantes de ésta aleación (bajo la condición antes indicada) obtenidas del ensayo de tracción y de impacto.

**Tabla 4.9: PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.**

	P1	P2	P3	P4	P5	Promedio	Desviación	Medida
<b>Sut</b> (kpsi)	16.12	16.67	16	16.44	15.98	16.24	0.25	16.24 ± 0.25
<b>Sy</b> (kpsi)	15.52	15.72	15.68	15.40	15	15.46	0.21	15.46 ± 0.21
<b>E</b> (Mpsi)	6.97	8.35	7.38	6.30	7.38	7.27	0.51	7.27 ± 0.51
<b>Elongación</b> (%)	1.96	2.94	1.96	3.92	1.6	2.47	0.76	2.47 ± 0.76
<b>Dureza</b> (HB)	62.25	61.84	64.34	61.94	64.85	63.04	1.24	63.04 ± 1.24
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2	2.3	1.8	2.1	1.7	1.98	0.18	1.98 ± 0.18
<b>Estricción</b> (%)	3.25	3.65	2.43	4.06	1.6	3	0.79	3 ± 0.79

A continuación se describe la manera cómo se obtuvieron las propiedades mecánicas a partir de los datos del ensayo de tracción para la probeta número 2 (P2).

El procedimiento aquí descrito es el mismo para todas las probetas sometidas al ensayo de tracción de ambos tipos de aleaciones (tanto en condiciones de fundido como bajo condiciones de tratamiento térmico), así que ésta será la única vez que se mostrarán tales procedimientos.

**Tabla 4.10: DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA LA PROBETA NÚMERO 2 (P2).**

P (lb)	A (in <sup>2</sup> )	σ (kpsi)	δ (mm)	δ (in)	E	E (Mpsi)
0	0	0	0	0	0	0
88	0,19	0,46	0,001	3,93701E-05	1,9685E-05	23,53
176	0,19	0,93	0,005	0,00019685	9,8425E-05	9,41
264	0,19	1,39	0,01	0,000393701	0,00019685	7,06

352	0,19	1,85	0,011	0,000433071	0,00021654	8,56
440	0,19	2,32	0,015	0,000590551	0,00029528	7,84
528	0,19	2,78	0,018	0,000708661	0,00035433	7,84
616	0,19	3,24	0,02	0,000787402	0,0003937	8,23
704	0,19	3,71	0,021	0,000826772	0,00041339	8,96
792	0,19	4,17	0,025	0,000984252	0,00049213	8,47
880	0,19	4,63	0,03	0,001181102	0,00059055	7,84
968	0,19	5,09	0,031	0,001220472	0,00061024	8,35
1056	0,19	5,56	0,039	0,001535433	0,00076772	7,24
1144	0,19	6,02	0,041	0,001614173	0,00080709	7,46
1232	0,19	6,48	0,045	0,001771654	0,00088583	7,32
1320	0,19	6,95	0,05	0,001968504	0,00098425	7,06
1408	0,19	7,41	0,051	0,002007874	0,00100394	7,38
1496	0,19	7,87	0,055	0,002165354	0,00108268	7,27
1584	0,19	8,34	0,062	0,002440945	0,00122047	6,83
1672	0,19	8,80	0,067	0,002637795	0,0013189	6,67
1760	0,19	9,26	0,071	0,002795276	0,00139764	6,63
1848	0,19	9,73	0,075	0,002952756	0,00147638	6,59
1936	0,19	10,19	0,08	0,003149606	0,0015748	6,47
2024	0,19	10,65	0,081	0,003188976	0,00159449	6,68
2112	0,19	11,12	0,087	0,003425197	0,0017126	6,49
2200	0,19	11,58	0,092	0,003622047	0,00181102	6,39
2288	0,19	12,04	0,097	0,003818898	0,00190945	6,31
2376	0,19	12,51	0,102	0,004015748	0,00200787	6,23
2464	0,19	12,97	0,115	0,004527559	0,00226378	5,73
2552	0,19	13,43	0,125	0,00492126	0,00246063	5,46
2640	0,19	13,89	0,135	0,005314961	0,00265748	5,23
2728	0,19	14,36	0,15	0,005905512	0,00295276	4,86
2816	0,19	14,82	0,172	0,006771654	0,00338583	4,38
2904	0,19	15,28	0,19	0,007480315	0,00374016	4,09
2992	0,19	15,75	0,21	0,008267717	0,00413386	3,81
3080	0,19	16,21	0,24	0,009448819	0,00472441	3,43
<b>3168</b>	<b>0,19</b>	<b>16,67</b>	<b>0,26</b>	<b>0,01023622</b>	<b>0,00511811</b>	<b>3,26</b>

La Figura 4.28 muestra el diagrama esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a los datos del ensayo de tracción de la Tabla 4.10.

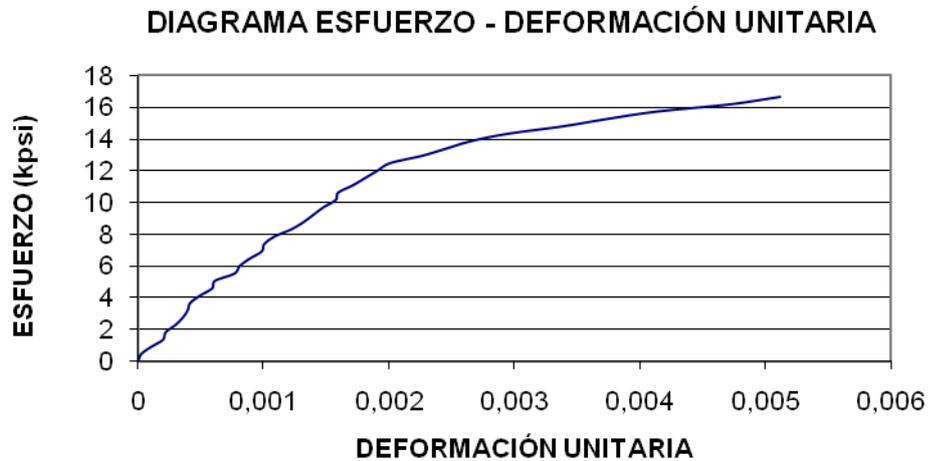


Figura 4.28: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria.

El valor de la resistencia última a la tensión (**S<sub>ut</sub>**) se obtiene directamente de los datos de la columna correspondiente al esfuerzo. Éste es el valor de esfuerzo con el cual se fractura la probeta sometida al ensayo de tracción.

Para determinar el valor de la resistencia a la fluencia (**S<sub>y</sub>**), se traza una recta paralela a la parte de la curva del diagrama que es lineal, desde una deformación unitaria igual al 0.2%, es decir, desde el valor correspondiente a 0.002.

Esto último se lo realiza con la ayuda del software AutoCAD 2008. Véase la Figura 4.29.

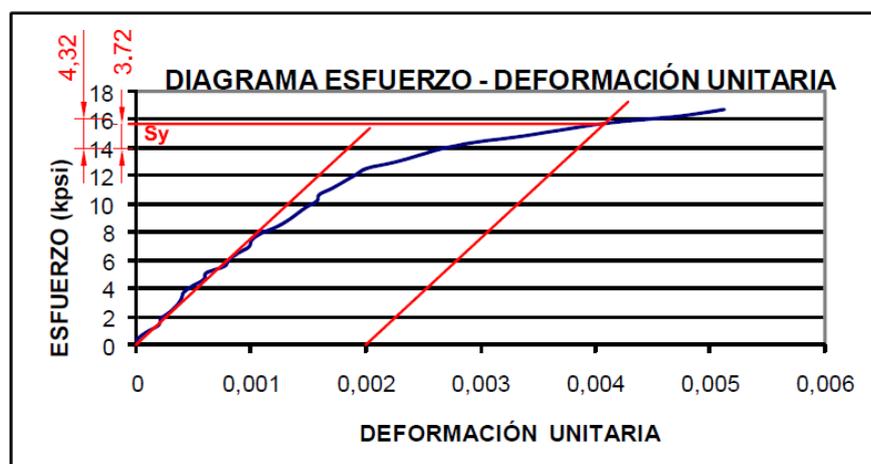


Figura 4.29: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria: determinación de **S<sub>y</sub>**.

Sabiendo que 4.32 equivale a 2 kpsi y realizando una regla de tres, se halla que 3,72 equivale a 1.72 kpsi. Luego,  $S_y = (14 + 1,72)$  kpsi.

El módulo de elasticidad (**E**) es el valor hasta donde se tiene una línea recta en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria.

El porcentaje de elongación se obtiene mediante la ecuación:

$$\% \text{ elongación} = \left( \frac{L - L_0}{L_0} \right) \times 100\% \quad (4-19)$$

donde:

$L$  = longitud final de la probeta, (mm)

$L_0$  = longitud inicial de la probeta, (mm)

En (4-19):  $\% \text{ elongación} = \left( \frac{51,5 - 51}{51} \right) \times 100\% = 2,94$

El porcentaje de estricción se obtiene mediante la ecuación:

$$\% \text{ estricción} = \left( \frac{A_0 - A}{A_0} \right) \times 100\% \quad (4-20)$$

donde:

$A$  = sección final de la probeta, (mm<sup>2</sup>)

$A_0$  = sección inicial de la probeta, (mm<sup>2</sup>)

En (4-20):  $\% \text{ estricción} = \left( \frac{122 - 118,5}{122} \right) \times 100\% = 3,65$

Los valores de dureza y de impacto se obtuvieron de tablas y por lectura directa en la máquina de ensayo, respectivamente.

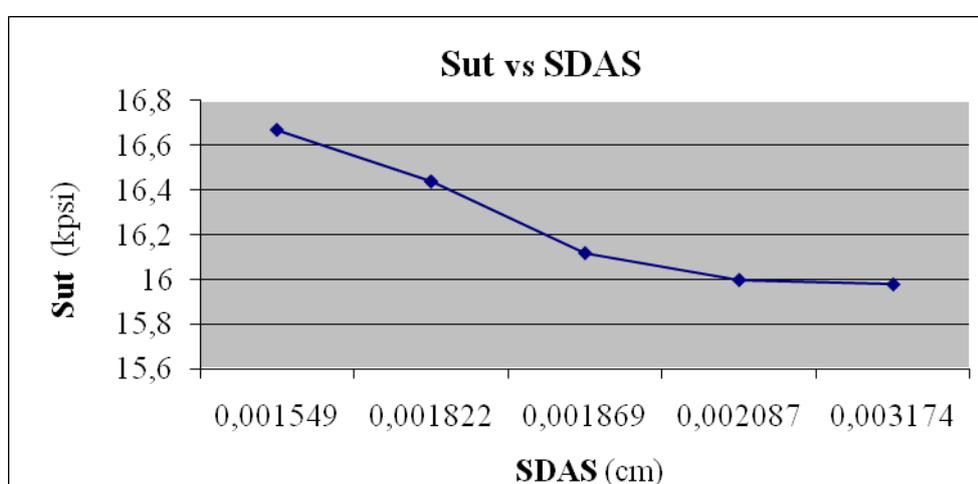
Ahora es posible establecer una relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas.

La Tabla 4.11 muestra los valores de la resistencia última a la tensión (**Sut**) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (**SDAS**).

**Tabla 4.11:** VALORES DE **Sut** Y DE LA **SDAS** PARA CONDICIONES DE FUNDIDO.

Probeta	Sut (Kpsi)	SDAS (cm)
P2	16,67	0,001549
P4	16,44	0,001822
P1	16,12	0,001869
P3	16	0,002087
P5	15,98	0,003174

La Figura 4.30 muestra la relación entre la resistencia última a la tensión (**Sut**) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (**SDAS**).

**Figura 4.30:** Relación entre la resistencia última a la tensión (**Sut**) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (**SDAS**).

Es evidente, según lo muestra la Figura 4.30, que mientras la distancia entre brazos dendríticos secundarios aumenta, la resistencia última a la tensión disminuye considerablemente.

La Figura 4.30 también muestra que la distancia entre brazos dendríticos secundarios se encuentra dentro de los límites establecidos para estas distancias, a saber, 0 y 0.015 cm [4].

#### 4.5.1.2 PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE

En la Tabla 4.12 se indican las propiedades mecánicas más importantes de ésta aleación (bajo la condición antes indicada) obtenidas del ensayo de tracción y de impacto.

**Tabla 4.12** PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación</b>	<b>Medida</b>
<b>Sut</b> (kpsi)	18.41	18.29	17.14	17.60	18.06	17.90	0.42	17.90 ± 0.42
<b>Sy</b> (kpsi)	18.02	17.58	16.27	17.20	17	17.21	0.47	17.21 ± 0.47
<b>E</b> (Mpsi)	7.49	9.41	5.88	6.83	9.66	7.85	1.34	7.85 ± 1.34
<b>Elongación</b> (%)	3.92	2.94	1.96	2.54	2.54	2.78	0.52	2.78 ± 0.52
<b>Dureza</b> (HB)	67.52	67.84	68.48	67.22	66.95	67.60	0.45	67.60 ± 0.45
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2.5	2.2	1.8	2	2.1	2.12	0.3	2.12 ± 0.3
<b>Estricción</b> (%)	4.87	3.25	2.43	2.56	2.43	3.11	0.76	3.11 ± 0.76

Aquí no es posible establecer una relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas, puesto que no fue posible la medición de las distancias entre brazos dendríticos secundarios como se hizo en la sección anterior, sin embargo, es posible establecer una relación entre el índice de tamaño de grano y la resistencia mecánica.

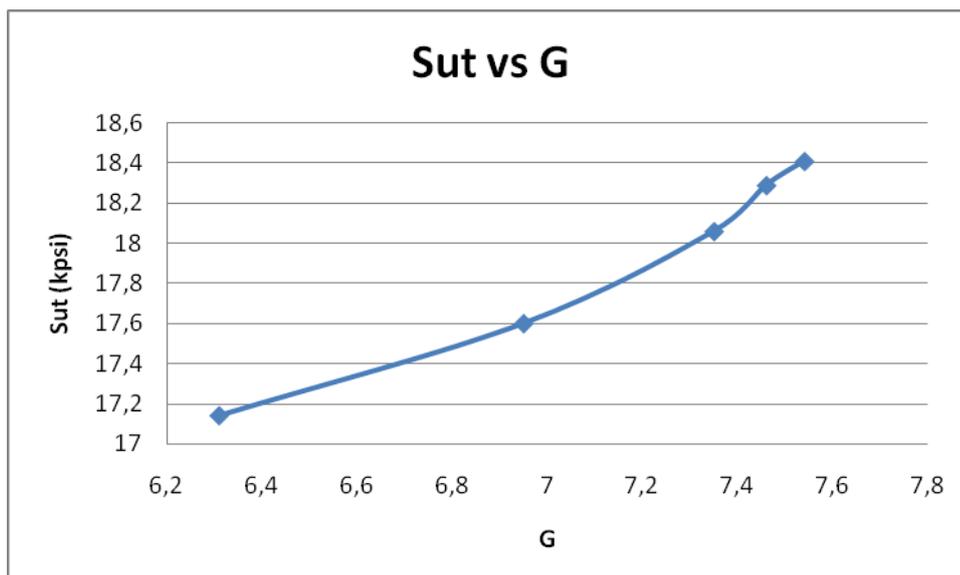
En la Tabla 4.13 se indican los valores del índice de tamaño de grano (G) y la resistencia última a la tensión (Sut).

**Tabla 4.13** VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.

<b>Probeta</b>	<b>Gpromedio</b>	<b>Sut (kpsi)</b>
5	6,31	17,14
4	6,95	17,6
3	7,35	18,06
2	7,46	18,29
1	7,54	18,41

En la Figura 4.31, que se muestra a continuación, se observa la relación entre la resistencia mecánica (Sut) en función del índice de tamaño de grano (G).

Se puede observar en la Figura 4.31, que cuando el índice de tamaño de grano aumenta, la resistencia última a la tensión (Sut) también aumenta.



**Figura 4.31:** Relación entre la resistencia última a la tensión (**Sut**) y el índice de tamaño de grano (**G**).

Ahora bien, si se comparan las propiedades mecánicas que se muestran en la Tabla 4.9 (condiciones de fundido) con las de la que se indican en la Tabla 4.12 (tratadas térmicamente), se puede observar un incremento en éstas últimas, por la modificación microestructural del silicio eutéctico.

Esto último se fundamenta en el hecho de que las partículas de silicio en condiciones de fundido se encuentran en forma acicular y después del tratamiento térmico, se encuentran redondeadas. Véanse las microestructuras de la sección 4.3.2.

## **4.5.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E**

### **4.5.2.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO**

En la Tabla 4.14 se indican las propiedades mecánicas más importantes de ésta aleación (bajo la condición antes indicada) obtenidas del ensayo de tracción y de impacto.

**Tabla 4.14:** PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.

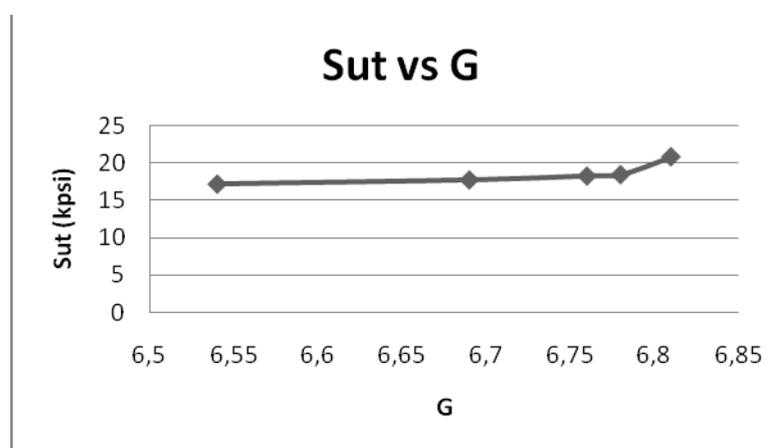
	P1	P2	P3	P4	P5	Promedio	Desviación	Medida
<b>Sut</b> (kpsi)	17.72	17.16	18.25	18.44	20.84	18.48	0.93	18.48 ± 0.93
<b>Sy</b> (kpsi)	17.20	16.83	17.92	18	19.5	17.89	0.70	17.89 ± 0.70
<b>E</b> (Mpsi)	10	8.35	9.41	8.88	10.13	9.35	0.59	9.35 ± 0.59
<b>Elongación</b> (%)	3	2.1	2.8	4	5.2	3.42	0.94	3.3 ± 0.94
<b>Dureza</b> (HB)	59.62	64.12	61.82	65.94	56.2	61.54	2.90	61.54 ± 2.90
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2	1.3	2.2	1.12	2.5	1.82	0.49	1.82 ± 0.49
<b>Estricción</b> (%)	3.25	2.62	2.68	4.18	5.69	3.68	1	3.68 ± 1

Aquí también es posible establecer una relación entre el índice de tamaño de grano (G) y la resistencia última a la tensión (Sut).

En la Tabla 4.15 se indican los valores correspondientes del tamaño de grano (G) y de la resistencia última a la tensión (Sut) y en la Figura 4.32 se muestra la relación entre estas dos variables.

**Tabla 4.15:** VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.

Probeta	Sut (kpsi)	G
2	17,16	6,54
1	17,72	6,69
3	18,25	6,76
4	18,44	6,78
5	20,84	6,81



**Figura 4.32:** Relación entre la resistencia última a la tensión (Sut) y el índice de tamaño de grano (G).

#### 4.5.2.2 PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE

En la Tabla 4.16 se indican las propiedades mecánicas más importantes de ésta aleación (bajo la condición antes indicada) obtenidas del ensayo de tracción y de impacto.

**Tabla 4.16: PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.**

	P1	P2	P3	P4	P5	Promedio	Desviación	Medida
<b>Sut</b> (kpsi)	18.99	18.32	17.13	17.63	18.13	18.04	0.53	18.04 ± 0.53
<b>Sy</b> (kpsi)	17.30	16.11	15.44	15.96	16.42	16.25	0.49	16.25 ± 0.49
<b>E</b> (Mpsi)	9.41	9.41	8.04	8.46	8.64	8.79	0.49	8.79 ± 0.49
<b>Elongación</b> (%)	3.60	2.8	1.40	2.2	2.40	2.48	0.58	2.48 ± 0.58
<b>Dureza</b> (HB)	59.34	58.88	67.26	63.24	65.26	62.79	2.95	62.79 ± 2.95
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2.2	2	1.8	1.3	2.1	1.88	0.26	1.88 ± 0.26
<b>Estricción</b> (%)	4.06	3.25	1.62	2.9	2.43	2.85	0.66	2.85 ± 0.66

Si se comparan las propiedades mecánicas de la Tabla 4.14 (condiciones de fundido) con las de la Tabla 4.16 (tratadas térmicamente), se puede observar que las propiedades mostradas en la Tabla 4.14 son superiores a las que se indican en la Tabla 4.16.

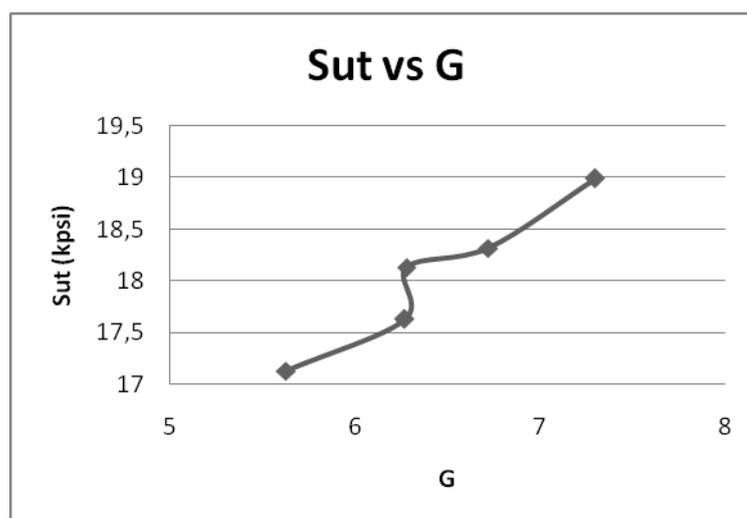
Esto último se debe principalmente a que en las probetas sometidas al tratamiento térmico T4 aparece la fase  $\pi$ , la cual contiene un elemento químico considerado como impureza y causa principal de la disminución de las propiedades mecánicas en las aleaciones de aluminio; el hierro (Fe). Además, la fase  $\pi$  tiene zonas aciculares, las cuales forman microgrietas y disminuyen la resistencia mecánica. Véanse las microestructuras de la sección 4.4.2.

Aquí también es posible establecer una relación entre el tamaño de grano (G) y la resistencia última a la tensión (Sut).

En la Tabla 4.17 se indican los valores correspondientes del tamaño de grano (G) y de la resistencia última a la tensión (Sut) y en la Figura 4.33, se muestra la relación entre estas dos variables.

**Tabla 4.17:** VALORES CORRESPONDIENTES AL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y RESISTENCIA.

Probeta	Sut (kpsi)	G
3	17,13	5,63
4	17,63	6,27
5	18,13	6,28
2	18,32	6,72
1	18,99	7,3



**Figura 4.33:** Relación entre la resistencia última a la tensión (**Sut**) y el índice de tamaño de grano (**G**).

Es evidente, por las razones antes mencionadas, que la aleación de aluminio ASTM 40E, presenta mejores propiedades mecánicas en condiciones de fundido.

#### 4.6 TIEMPO ÓPTIMO DE PERMANENCIA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ASTM 355 Y ASTM 40E DENTRO DEL MOLDE METÁLICO

Durante el ensayo de tracción, las probetas se fracturaban muy rápido, debido muy probablemente a esfuerzos residuales internos, generados durante el proceso de solidificación. La presencia de ciertas fisuras daba muestra que este fenómeno se estaba presentando, debido en gran medida a ciertas partes del molde en donde se encuentran cambios de sección. Estos últimos, ciertamente estaban actuando como *mordazas*, por lo cual se estaba impidiendo que la contracción de las aleaciones sea uniforme. Ésta es la razón para que ocurra lo antes mencionado.

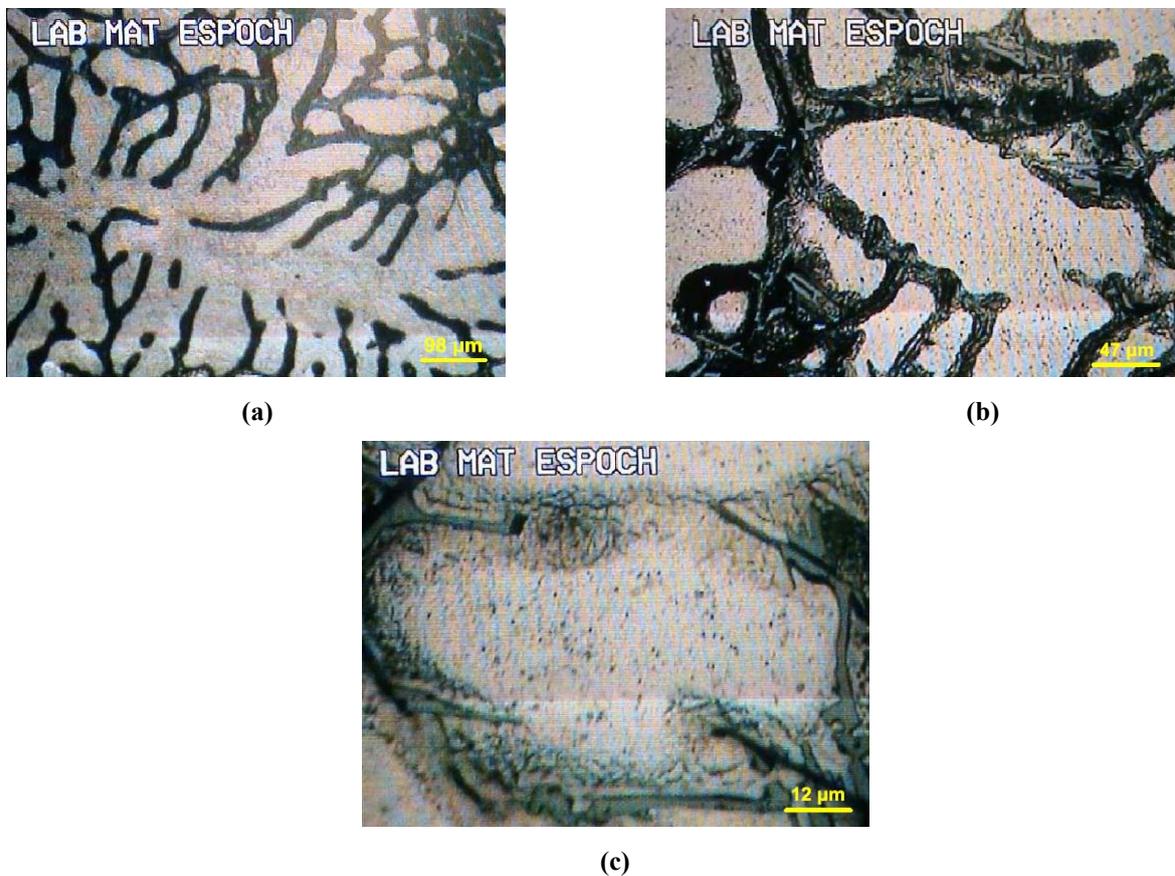
Con el propósito de evitar los defectos antes mencionados, se realizó una nueva fundición para diferentes tiempos de permanencia de las aleaciones dentro del molde metálico una vez alcanzada la solidificación completa. Además se realizó una prueba de fundición en un molde en forma de barra circular, utilizando un tubo de 2 pulgadas de diámetro con el mismo propósito. Los resultados obtenidos de estas pruebas se indican a continuación.

#### 4.6.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

##### 4.6.1.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO

###### a) COLADO DENTRO DE UN TUBO

Una vez que se cumple con los procedimientos para obtener esta aleación, se realiza el colado en el tubo y se deja que solidifique durante 10 minutos y luego se saca la aleación en forma de barra cilíndrica.

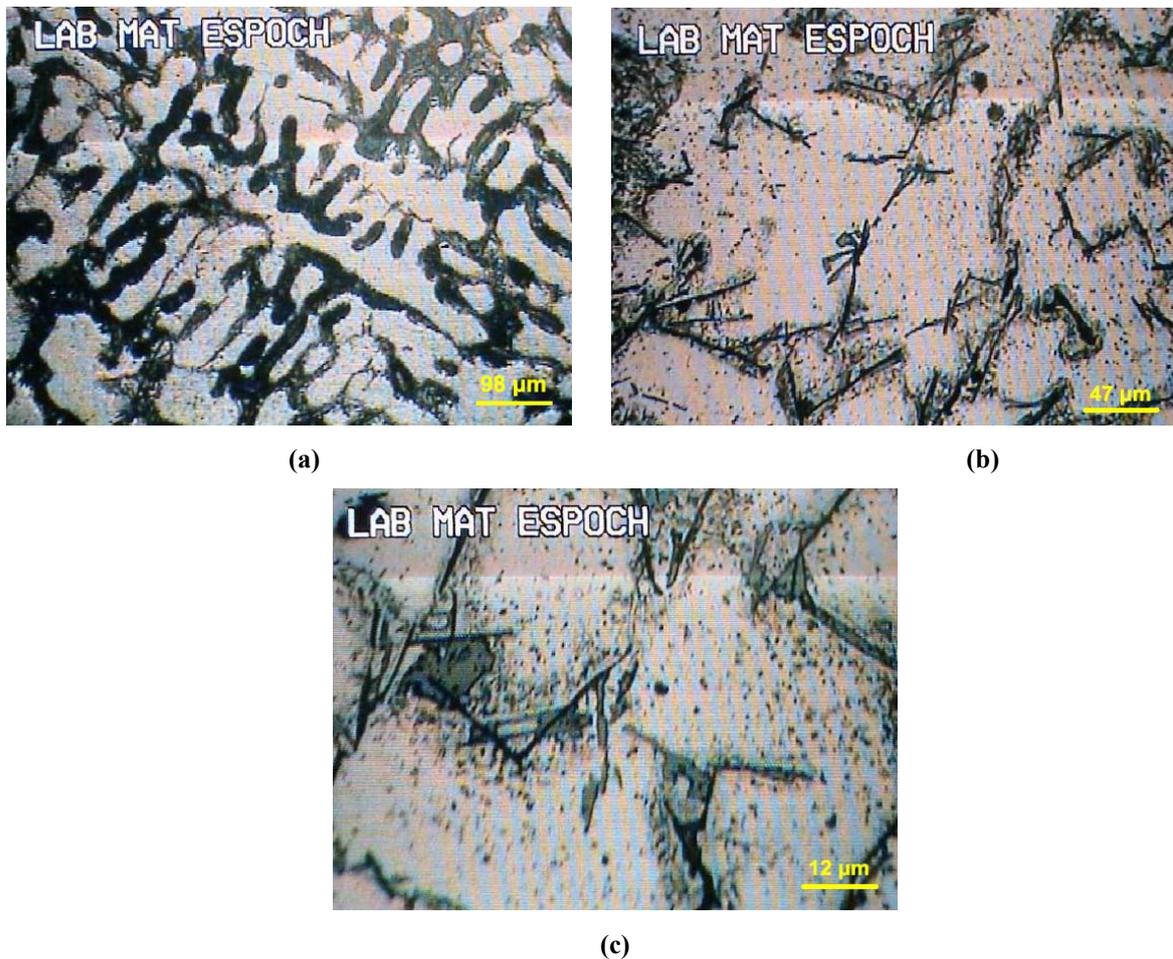


**Figura 4.34:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x y (c) 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.3.1. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección antes mencionada, la distancia entre brazos dendríticos secundarios es de  $56.50\ \mu\text{m}$ .

### b) DOS MINUTOS DENTRO DEL MOLDE

De igual manera, una vez que se cumple con los procedimientos para obtener esta aleación, se realiza el colado en los moldes metálicos; se deja que solidifique durante 4 minutos y se dejan que transcurran 2 minutos desde el instante de la solidificación, tiempo que se lo divide en la forma siguiente: 1 minuto más de solidificación y 1 minuto más mientras se realiza el desmoldeo.

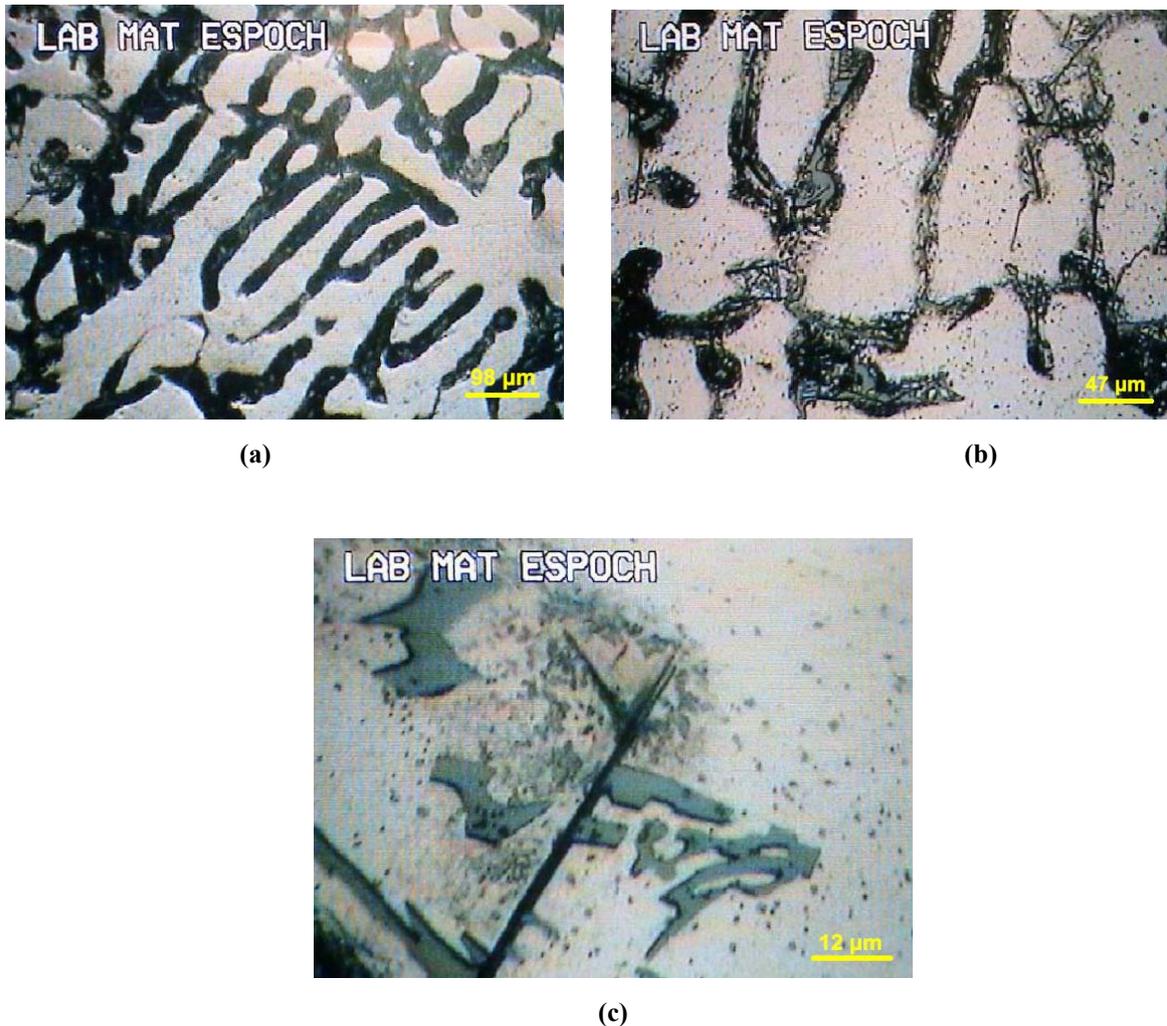


**Figura 4.35:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x y (c) 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.3.1. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección antes mencionada, la distancia entre brazos dendríticos secundarios es de  $65.76 \mu\text{m}$ .

### c) TRES MINUTOS DENTRO DEL MOLDE

De igual manera, una vez que se cumple con los procedimientos para obtener esta aleación, se realiza el colado en los moldes metálicos; se deja que solidifique durante 4 minutos y se dejan que transcurran 3 minutos desde el instante de la solidificación, tiempo que se lo divide en la forma siguiente: 2 minutos más de solidificación y 1 minuto más mientras se realiza el desmoldeo.



**Figura 4.36:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x y (c) 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.3.1. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección antes mencionada, la distancia entre brazos dendríticos secundarios es de  $55.99 \mu\text{m}$ .

En la Tabla 4.18 se indican los valores de la distancia entre brazos dendríticos secundarios para el tiempo correspondiente de solidificación dentro del molde metálico.

**Tabla 4.18:** VALORES DE LA SDAS PARA CONDICIONES DE FUNDIDO.

	SDAS (cm)
<b>Barra</b>	0,00565
<b>2 min</b>	0,006576
<b>3 min</b>	0,005599

## 4.6.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

### 4.6.2.1 PROBETAS EN CONDICIONES DE FUNDIDO

#### a) COLADO DENTRO DE UN TUBO

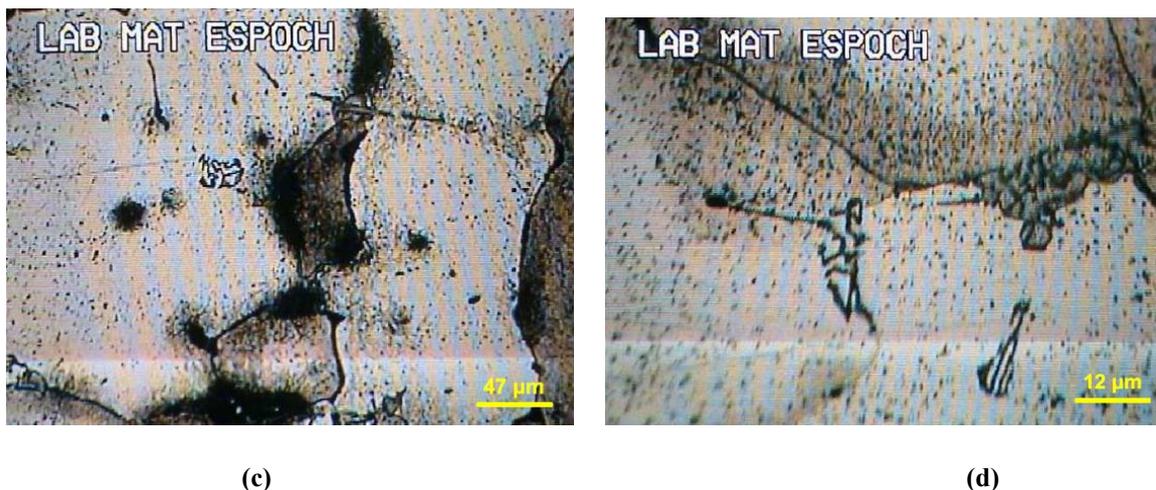
Una vez que se cumple con los procedimientos para obtener esta aleación, se realiza el colado en el tubo y se deja que solidifique durante 10 minutos y luego se saca la aleación en forma de barra cilíndrica.



(a)



(b)



**Figura 4.37:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** y **(b)** 50x, **(c)** 100x, y **(d)** 400x.

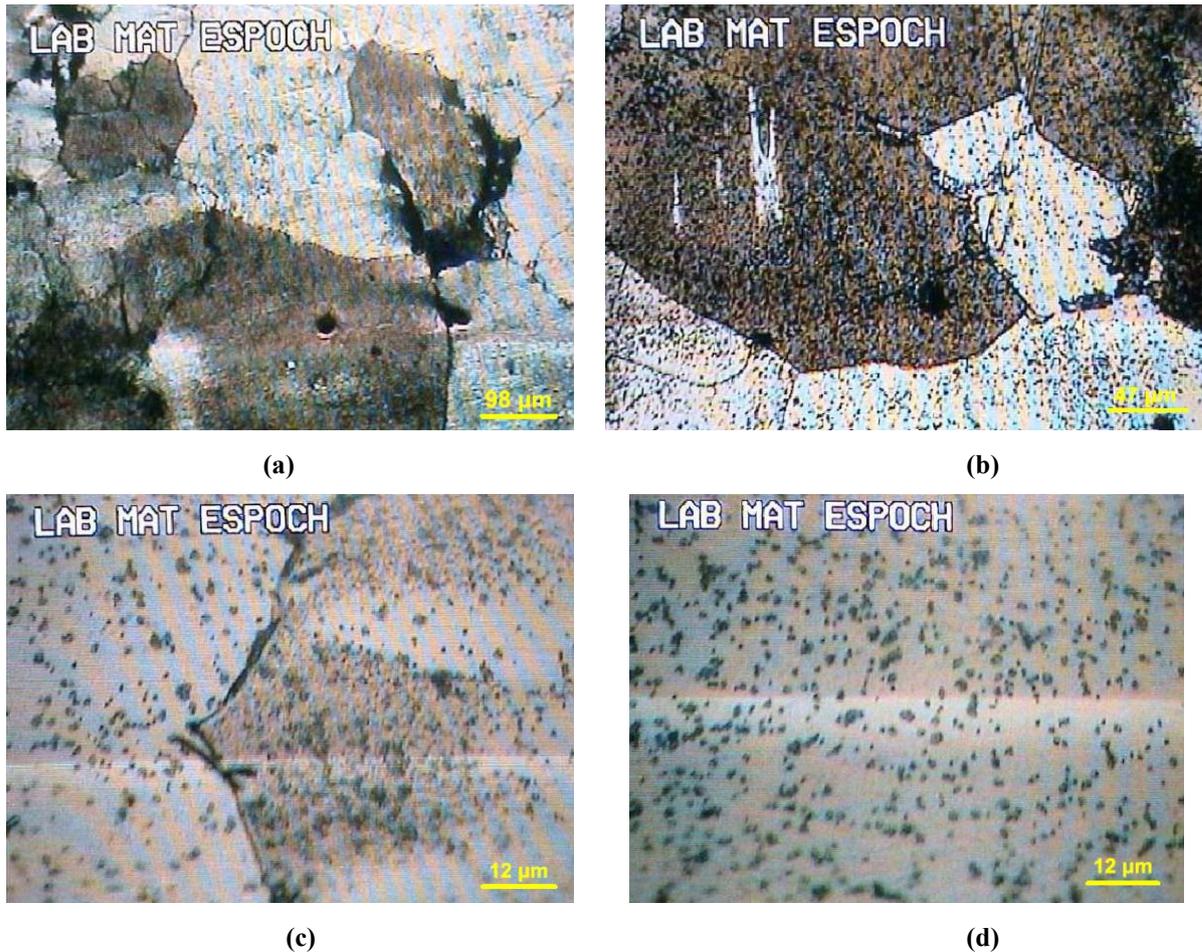
Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.4.1. La medición de la distancia entre brazos dendríticos secundarios no es posible realizarla, puesto que existe una cantidad considerable para realizar tal medición.

Siguiendo los procedimientos para determinar el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad, descritos en las secciones anteriores, para las siguientes figuras únicamente se indicarán estos valores.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 7.18 y 1.02, respectivamente.

#### **b) TRES MINUTOS DENTRO DEL MOLDE**

Una vez que se cumple con el procedimiento descrito en la sección 4.3, se cola en los moldes metálicos; se deja que solidifique durante 2 minutos y se dejan que transcurran 3 minutos desde el instante de la solidificación, tiempo que se lo divide en la forma siguiente: 2 minutos más de solidificación y 1 minuto más mientras se realiza el desmoldeo.



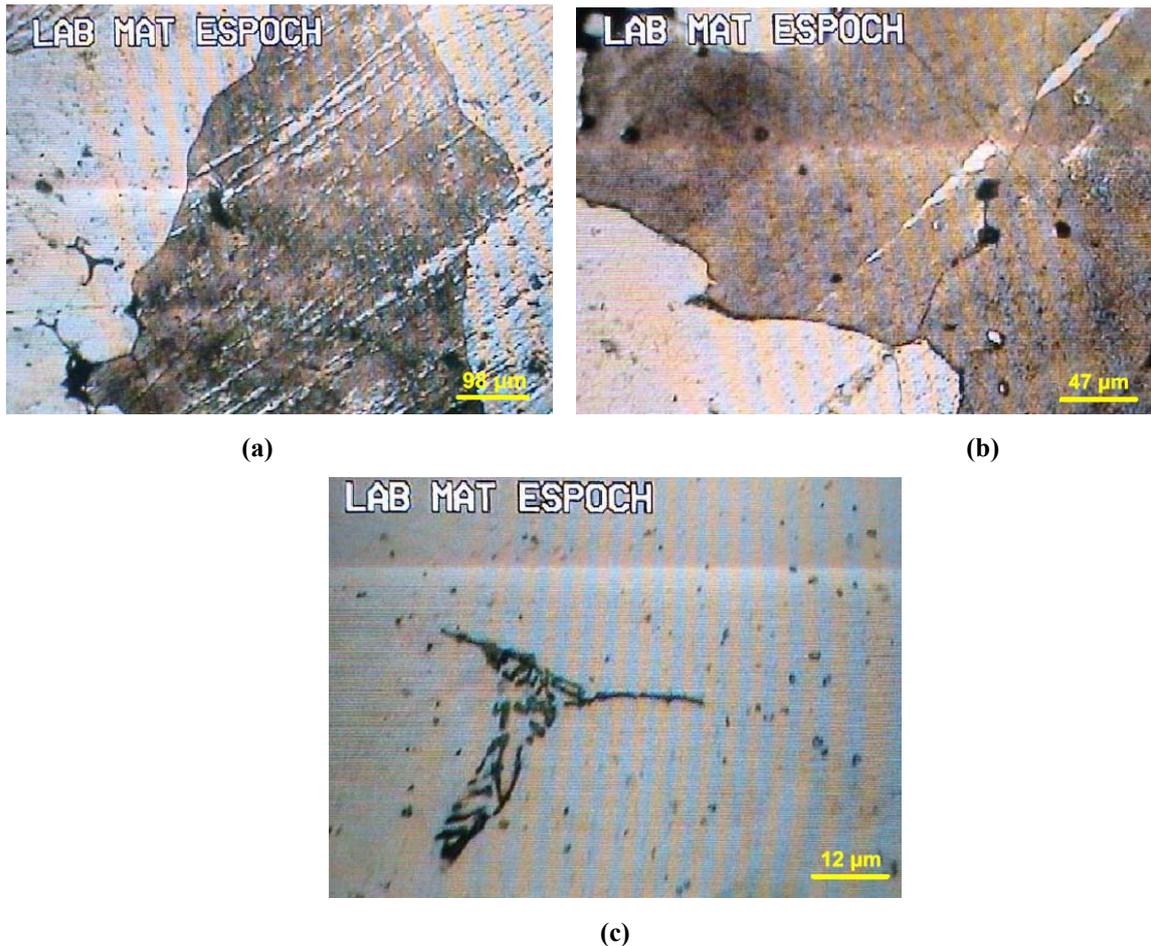
**Figura 4.38:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) 50x, (b) 100x, (c) y (d) 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.4.1. La medición de la distancia entre brazos dendríticos secundarios no es posible realizarla, puesto que existe una cantidad considerable para realizar tal medición.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 6.63 y 1.05, respectivamente.

### c) SIETE MINUTOS DENTRO DEL MOLDE

También, una vez que se cumple con el procedimiento descrito en la sección 4.3, se cola en los moldes metálicos; se deja que solidifique durante 2 minutos y se dejan que transcurran 7 minutos desde el instante de la solidificación, tiempo que se lo divide en la forma siguiente: 6 minutos más de solidificación y 1 minuto más mientras se realiza el desmoldeo.



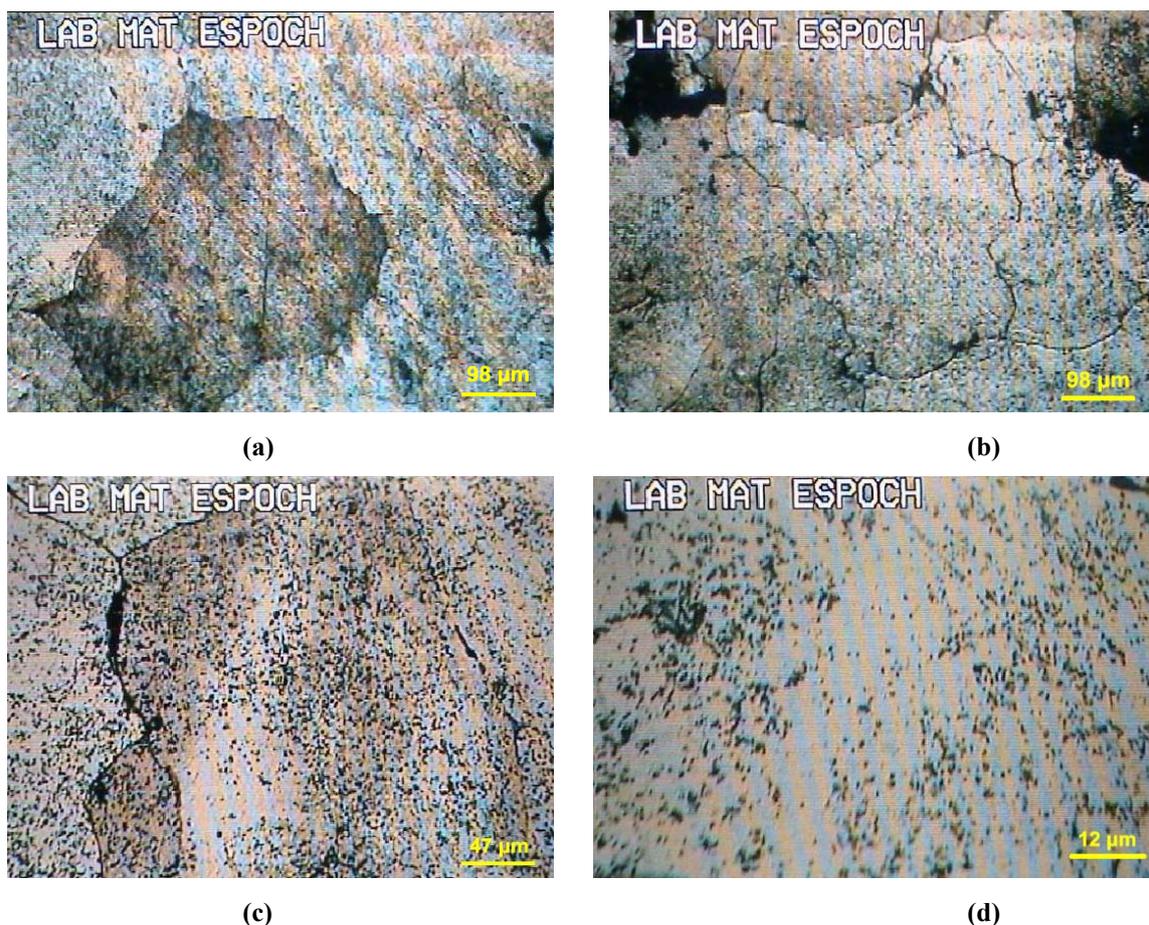
**Figura 4.39:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: **(a)** 50x, **(b)** 100x, y **(c)** 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.4.1. La medición de la distancia entre brazos dendríticos secundarios no es posible realizarla, puesto que existe una cantidad considerable para realizar tal medición.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 5.41 y 0.99, respectivamente.

#### **d) CINCO MINUTOS DENTRO DEL MOLDE**

Una vez más, luego de que se cumple con el procedimiento descrito en la sección 4.3, se cola en los moldes metálicos; se deja que solidifique durante 2 minutos y se dejan que transcurran 5 minutos desde el instante de la solidificación, tiempo que se lo divide en la forma siguiente: 4 minutos más de solidificación y 1 minuto más mientras se realiza el desmoldeo.



**Figura 4.40:** Microestructura de una aleación de aluminio ASTM 355 (F), atacada con Kellers durante 20 segundos: (a) y (b) 50x, (c) 100x, y (d) 400x.

Las fases presentes son las mismas que se describieron en la sección 4.4.1. La medición de la distancia entre brazos dendríticos secundarios no es posible realizarla, puesto que existe una cantidad considerable para realizar tal medición.

El índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para esta probeta son 4.58 y 0.93, respectivamente.

En la Tabla 4.19 se indican los valores del índice de tamaño de grano así como el grado de esferoidicidad para la aleación de aluminio ASTM40E, en condiciones de fundido.

**Tabla 4.19:** ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO Y GRADO DE ESFEROIDICIDAD

Probeta	Índice de tamaño de grano (G)	Grado de esferoidicidad
Barra	7.18	1.02
3 min.	6.63	1.05
7 min.	5.41	0.99
5 min.	4.58	0.93

La Tabla 4.19 indica que el índice de tamaño de grano y el grado de esferoidicidad encontrados para la aleación de aluminio ASTM 40E, en condiciones de fundido, a diferentes tiempos de enfriamiento, siendo el más óptimo el de 3 minutos dentro del molde metálico.

### 4.6.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

#### 4.6.3.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355 (F)

La Tabla 4.20 presenta las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción y de impacto para las probetas descritas en la sección 4.6.1.

**Tabla 4.20:** PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.

	<b>Barra</b>	<b>2 min</b>	<b>3 min</b>
<b>Sut</b> (kpsi)	18,27	16,21	19,20
<b>Sy</b> (kpsi)	17	15,2	18
<b>E</b> (Mpsi)	11,13	9,41	9,41
<b>Elongación</b> (%)	3,2	1,40	4
<b>Dureza</b> (HB)	69,18	78,54	67,92
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2,2	1,8	2,3
<b>Estricción</b> (%)	3,57	1,62	3,65

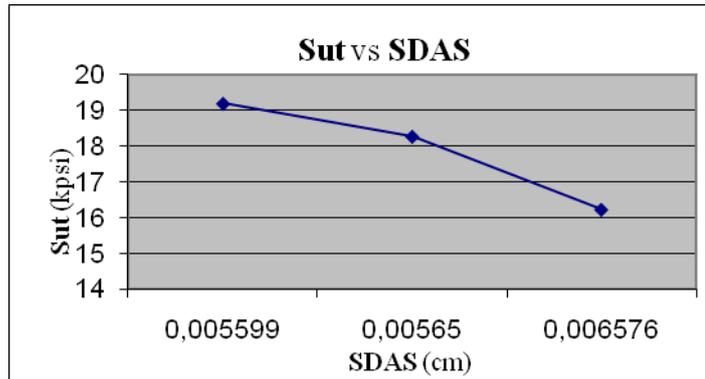
La Tabla 4.21 muestra los valores del límite de ruptura (Sut) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (SDAS) para las probetas descritas en la sección 4.6.1.

**Tabla 4.21:** VALORES DE Sut Y DE LA SDAS PARA CONDICIONES DE FUNDIDO

	<b>Sut (Kpsi)</b>	<b>SDAS (cm)</b>
<b>Barra</b>	18,27	0,00565
<b>2 min</b>	16,21	0,006576
<b>3 min</b>	19,20	0,005599

Es evidente que la mayor resistencia que se alcanza es en un tiempo de permanencia dentro del molde de 3 min (para las barras de ensayo de tracción).

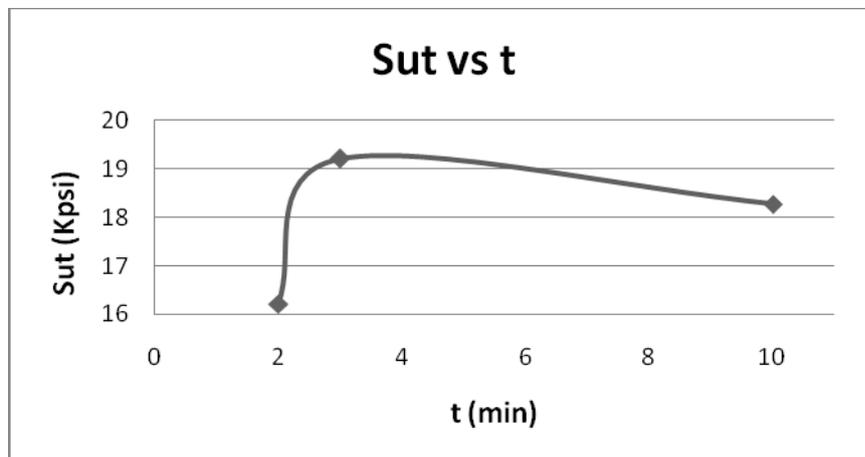
La Figura 4.41 muestra la relación entre el límite de ruptura (Sut) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (SDAS) para los valores mostrados en la Tabla 4.21.



**Figura 4.41:** Relación entre el límite de ruptura (Sut) y la distancia entre brazos dendríticos secundarios (SDAS).

**Tabla 4.22:** VALORES DE Sut Y t TIEMPO DE PERMANENCIA DENTRO DEL MOLDE METÁLICO

tiempo de permanencia (t min)	Sut (Kpsi)
10 min	18,27
2 min	16,21
3 min	19,20



**Figura 4.42:** Relación entre el límite de ruptura (Sut) y el tiempo de Permanencia dentro del molde metálico (t min)

La Figura 4.42 muestra la relación entre el límite de ruptura (Sut) y el tiempo de permanencia de la aleación dentro del molde metálico, se observa que a los tres minutos la aleación alcanza la máxima resistencia.

#### 4.6.3.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E (F)

La Tabla 4.23 presenta las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción y de impacto para las probetas descritas en la sección 4.6.2.

**Tabla 4.23: PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE IMPACTO.**

	<b>Barra</b>	<b>3 min</b>	<b>7 min</b>	<b>5 min</b>
<b>Sut</b> (kpsi)	24,52	22,74	15,05	14,80
<b>Sy</b> (kpsi)	16	16,50	13,45	12,64
<b>E</b> (Mpsi)	9,17	9,41	7,84	8,23
<b>Elongación</b> (%)	4,6	3,6	1,2	1
<b>Dureza</b> (HB)	59,14	71,66	73,32	75,22
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2,5	2,35	1,6	1,4
<b>Estricción</b> (%)	4,06	3,41	1,13	0,97

Es evidente que la mayor resistencia que se alcanza es en un tiempo de permanencia dentro del molde de 3 min (para las barras de ensayo de tracción).

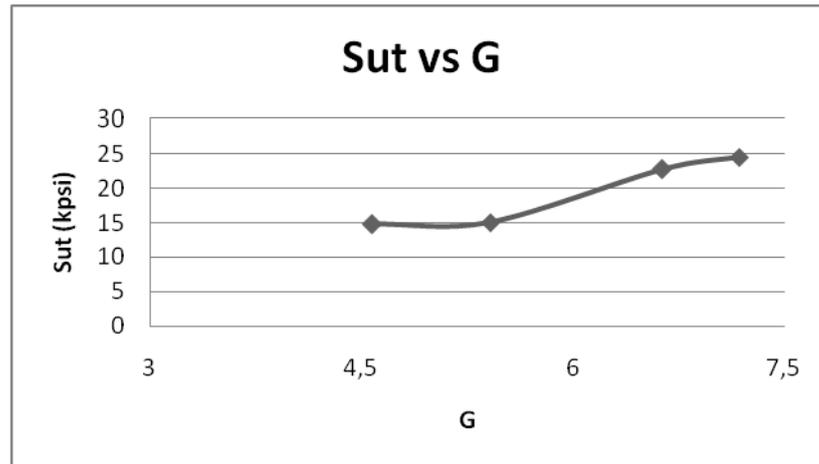
No es posible encontrar una relación entre el límite de ruptura y la distancia entre brazos dendríticos secundarios, ya que no existe cantidad suficiente de dendritas para realizar la medición correspondiente, pero sí es posible determinar una relación entre el índice de tamaño de grano (G) y la resistencia última a la tensión (Sut).

En la Tabla 4.24 se indican los valores correspondientes de índice de tamaño de grano (G) y de la resistencia última a la tensión (Sut).

**Tabla 4.24: VALORES DEL ÍNDICE DE TAMAÑO DE GRANO (G) Y DE LA RESISTENCIA (Sut).**

<b>Probeta</b>	<b>Sut (kpsi)</b>	<b>G</b>
5 min.	14,8	4,58
7 min.	15,05	5,41
3 min.	22,74	6,63
barra	24,52	7,18

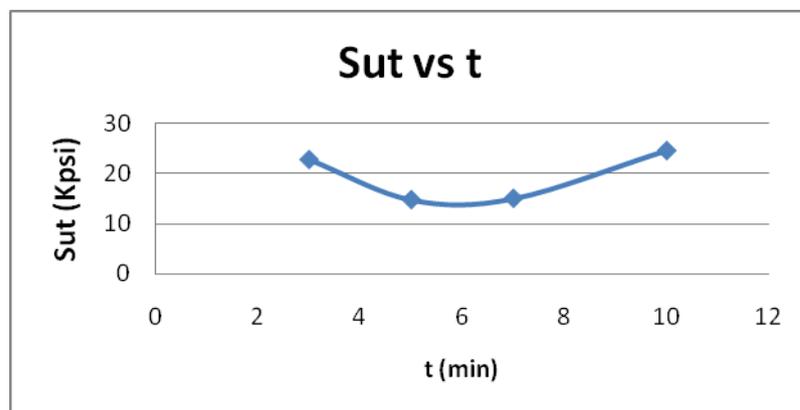
La Figura 4.43 indica la relación entre los valores del índice de tamaño de grano (G) y de la resistencia última a la tensión (Sut) dados en la Tabla 4.24.



**Figura 4.43:** Relación entre la resistencia última a la tensión (Sut) y el índice de tamaño de grano (G).

**Tabla 4.25:** VALORES DE Sut Y TIEMPO DE PERMANENCIA DENTRO DEL MOLDE METÁLICO

tiempo de permanencia (t min)	Sut (kpsi)
5 min.	14,8
7 min.	15,05
3 min.	22,74
barra	24,52



**Figura 4.44:** Relación entre el límite de ruptura (Sut) y el tiempo (t) de permanencia dentro del molde metálico

La Figura 4.44 muestra la relación entre el límite de ruptura (Sut) y el tiempo de permanencia de la aleación dentro del molde metálico, se observa que a los tres minutos la aleación alcanza la máxima resistencia.

#### 4.6.4 EVALUACIÓN DE LA POROSIDAD

En principio, las porosidades no se ven a simple vista en una pieza colada, sino hasta después de ser mecanizadas. Las porosidades son debidas al desprendimiento parcial de los gases durante la solidificación del metal líquido.

Algunas aleaciones tienen más tendencia a las porosidades que otras; la absorción de hidrógeno es favorecido por la presencia de sodio y magnesio [16].

Muchos metales disuelven una gran cantidad de gas cuando están fundidos. Por ejemplo, el aluminio disuelve al hidrógeno. Sin embargo, al solidificarse el aluminio, el metal sólido sólo tiene una fracción pequeña del hidrógeno en su estructura cristalina, porque la solubilidad es apreciablemente menor. El exceso de hidrógeno que no puede incorporarse a la estructura cristalina del metal o a la aleación sólida forma burbujas que pueden quedar atrapadas en el metal sólido provocando porosidades [4].

En las aleaciones eutécticas o próximas a la eutéctica, las porosidades toman habitualmente una forma esférica, no juntándose, generalmente, entre sí. En las aleaciones con gran intervalo de solidificación, las porosidades producen cavidades de forma irregular [16].

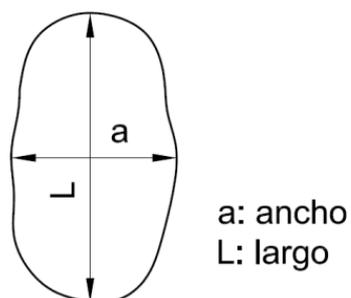
Para determinar la forma de los poros, se establece una relación entre el ancho y la longitud (largo) del defecto, de manera que se pueda establecer rangos para los poros de forma esférica y para los de forma irregular (alargada). La Figura 4.45, muestra un esquema simplificado de la forma de un poro.

La relación está dada por la ecuación:

$$esferoidicidad = \frac{a}{L} \quad (4-20)$$

La ecuación (4-20), muestra que el poro será de forma esférica cuando  $a = L$  y alargado cuando  $a = L/2$  (al menos).

Tomando en consideración los valores antes mencionados, se puede establecer que el rango para poros de forma esférica es,  $0.5 \leq esferoidicidad \leq 1$  y para los de forma alargada,  $0.01 \leq esferoidicidad \leq 0.5$ .

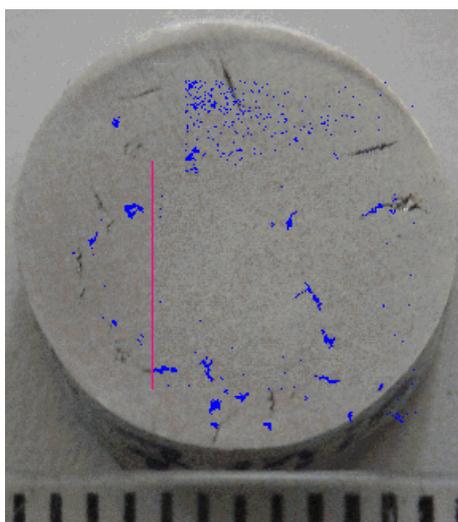


**Figura 4.45:** Representación simplificada de la forma de un poro.

A continuación se realizará la determinación de la porosidad (mediante el software *Clemex Vision*) de las probetas estudiadas en las secciones 4.6.1 y 4.6.2.

#### 4.6.4.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

##### a) COLADO DENTRO DE UN TUBO



**Figura 4.46:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dentro de un tubo metálico. Porosidad: 1.1 %.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.46.

**Tabla 4.26:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.02
Máximo	1
Media	0.572
Desviación estándar	0.362

Cantidad	178
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

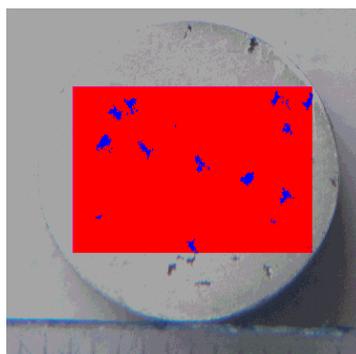
**Tabla 4.27: CANTIDAD DE POROS.**

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-50	52	29.21	29.21
50-100	51	28.65	57.87
100-150	36	20.22	78.09
150-200	19	10.67	88.76
200-250	4	2.25	91.01
250-300	4	2.25	93.26
300-350	1	0.56	93.82
350-400	2	1.12	94.94
400-450	5	2.81	97.75
450-500	1	0.56	98.31
600-650	1	0.56	98.88
700-750	1	0.56	99.44
800-850	1	0.56	100

**Tabla 4.28: TAMAÑO DE POROS.**

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	808.6
Media ( $\mu\text{m}$ )	116.5
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	122.4
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	20737.3
Cantidad	178
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**b) DOS MINUTOS DENTRO DEL MOLDE METÁLICO**



**Figura 4.47:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dos minutos dentro del molde metálico. Porosidad: 2.5 %.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.47.

**Tabla 4.29:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.03
Máximo	0.24
Media	0.098
Desviación estándar	0.064
Cantidad	21
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**Tabla 4.30:** CANTIDAD DE POROS.

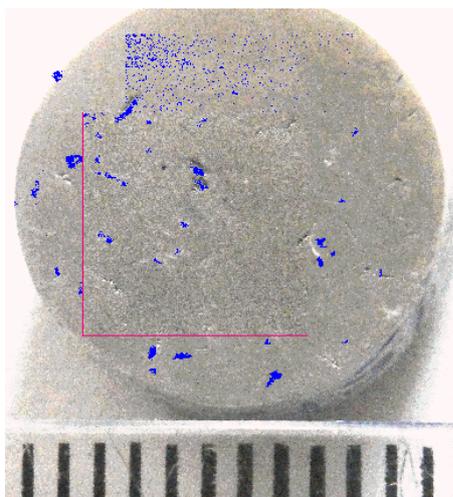
Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
300 – 400	2	9.52	9.52
400 – 500	4	19.05	28.57
500 – 600	2	9.52	38.10
600 – 700	1	4.76	42.86
700 – 800	1	4.76	47.62
900 – 1000	1	4.76	52.38
1300 – 1400	2	9.52	61.90
1400 – 1500	4	19.05	80.95
1500 – 1600	2	9.52	90.48
1600 – 1700	1	4.76	95.24
1700 – 1800	1	4.76	100

**Tabla 4.31:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	346.2
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	1798.1

Media ( $\mu\text{m}$ )	998.2
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	516.1
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	20961.5
Cantidad	21
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	

### c) TRES MINUTOS DENTRO DEL MOLDE METÁLICO



**Figura 4.48:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada tres minutos dentro del molde metálico. Porosidad: 0.9%.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.48.

**Tabla 4.32:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.17
Máximo	1
Media	0.934
Desviación estándar	0.179
Cantidad	313
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**Tabla 4.33:** CANTIDAD DE POROS.

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-25	38	12.14	12.14
25-50	193	61.66	73.80

50-75	43	13.74	87.54
75-100	16	5.11	92.65
100-125	9	2.88	95.53
125-150	5	1.60	97.12
150-175	1	0.32	97.44
200-225	1	0.32	97.76
225-250	2	0.64	98.40
250-275	2	0.64	99.04
325-350	1	0.32	99.36
375-400	1	0.32	99.68
450-475	1	0.32	100

**Tabla 4.34:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	474.8
Media ( $\mu\text{m}$ )	51.4
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	49.3
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	16099.8
Cantidad	313
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

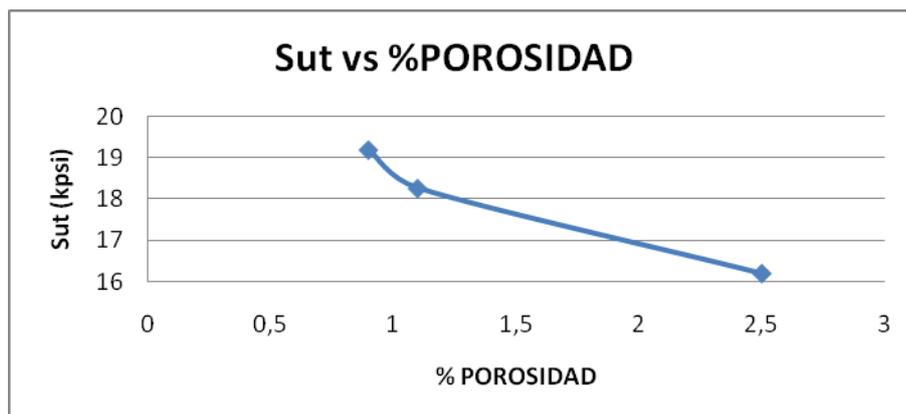
Los valores de porosidad calculados para las probetas anteriores, demuestran que no se presenta una cantidad considerable de poros, por lo cual, la obtención de la aleación de aluminio ASTM 355, es satisfactoria. Los valores de esferoidicidad, dados por la media aritmética, demuestran que los poros tienen forma esférica.

En la Tabla 4.35 se indican los valores correspondientes al porcentaje de porosidad y de la resistencia última a la tensión (Sut).

**Tabla 4.35:** VALORES DE % DE POROSIDAD Y DE LA RESISTENCIA (Sut).

<b>Probeta</b>	<b>% Porosidad</b>	<b>Sut (kpsi)</b>
3 min.	0,9	19,2
barra	1,1	18,27
2 min.	2.5	16,21

En la Figura 4.49 se indica la relación entre el % de porosidad y la resistencia última a la tensión (Sut), considerando los valores de la Tabla 4.35.

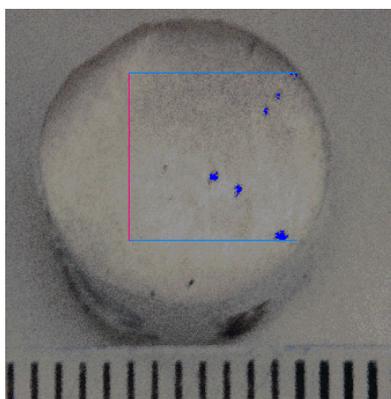


**Figura 4.49:** Relación entre el % de porosidad y la resistencia última a la tensión (Sut).

La Figura 4.49 indica que mientras mayor sea el % de porosidad, menor será la resistencia última a la tensión de las probetas.

#### 4.6.4.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

##### a) COLADO DENTRO DE UN TUBO



**Figura 4.50:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada dentro de un tubo metálico. Porosidad: 1 %.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.50.

**Tabla 4.36:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínima	0.16
Máxima	1
Media	0.926
Desviación estándar	0.205

Cantidad de poros	75
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

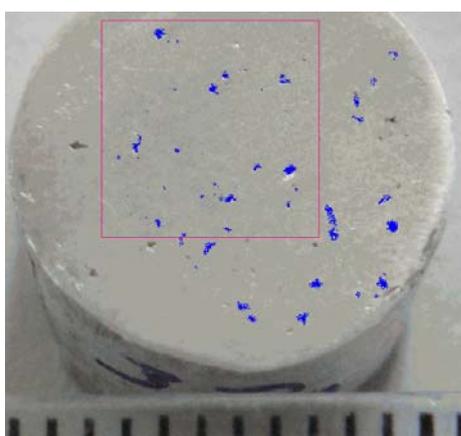
**Tabla 4.37:** CANTIDAD DE POROS.

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-50	57	76.00	76.00
50-100	13	17.33	93.33
350-400	1	1.33	94.67
400-450	1	1.33	96.00
550-600	1	1.33	97.33
600-650	2	2.67	100

**Tabla 4.38:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	628.0
Media ( $\mu\text{m}$ )	66.1
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	125.8
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	4954.5
Cantidad de poros	75
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

## b) TRES MINUTOS DENTRO DEL MOLDE METÁLICO



**Figura 4.51:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada tres minutos dentro del molde metálico. Porosidad: 1%.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.51.

**Tabla 4.39:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.09
Máximo	1
Media	0.805
Desviación estándar	0.302
Cantidad	110
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

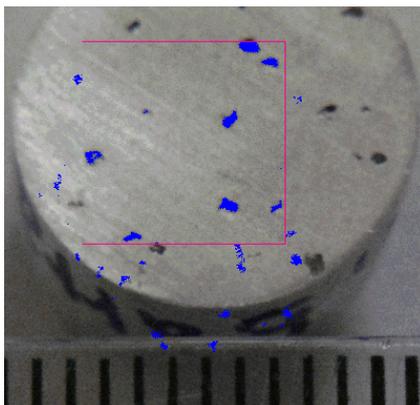
**Tabla 4.40:** CANTIDAD DE POROS.

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-50	56	50.91	50.91
50-100	33	30.00	80.91
100-150	6	5.45	86.36
150-200	5	4.55	90.91
200-250	2	1.82	92.73
250-300	2	1.82	94.55
300-350	1	0.91	95.45
350-400	3	2.73	98.18
400-450	1	0.91	99.09
600-650	1	0.91	100

**Tabla 4.41:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	631.1
Media ( $\mu\text{m}$ )	81.7
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	99.7
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	8983.6
Cantidad	110
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**c) SIETE MINUTOS DENTRO DEL MOLDE METÁLICO**



**Figura 4.52:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada siete minutos dentro del molde metálico. Porosidad: 2.1%.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.52.

**Tabla 4.42:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.23
Máximo	1
Media	0.865
Desviación estándar	0.270
Cantidad	50
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**Tabla 4.43:** CANTIDAD DE POROS.

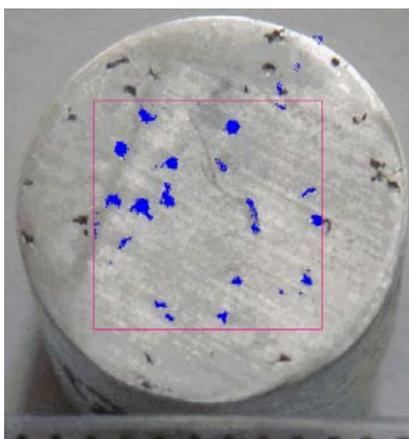
Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-40	37	74.00	74.00
40-80	4	8.00	82.00
80-120	1	2.00	84.00
200-240	1	2.00	86.00
440-480	1	2.00	88.00
600-640	2	4.00	92.00
640-680	1	2.00	94.00
680-720	2	4.00	98.00
760-800	1	2.00	100

**Tabla 4.44:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
--------------------------	------

Máximo ( $\mu\text{m}$ )	766.1
Media ( $\mu\text{m}$ )	116.0
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	218.6
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	5801.0
Cantidad	50
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

#### d) CINCO MINUTOS DENTRO DEL MOLDE METÁLICO



**Figura 4.53:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada cinco minutos dentro del molde metálico. Porosidad: 3.5 %.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.53.

**Tabla 4.45:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.06
Máximo	1
Media	0.779
Cantidad	142
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**Tabla 4.46:** CANTIDAD DE POROS.

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-40	63	64.29	64.29

40-80	11	11.22	75.51
80-120	4	4.08	79.59
160-200	1	1.02	80.61
200-240	1	1.02	81.63
240-280	2	2.04	83.67
280-320	3	3.06	86.73
400-440	2	2.04	88.78
440-480	6	6.12	94.90
480-520	1	1.02	95.92
520-560	1	1.02	96.94
720-760	2	2.04	98.98
760-800	1	1.02	100

**Tabla 4.47: TAMAÑO DE POROS.**

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	763.0
Media ( $\mu\text{m}$ )	112.0
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	182.5
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	10976.9
Cantidad	98
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

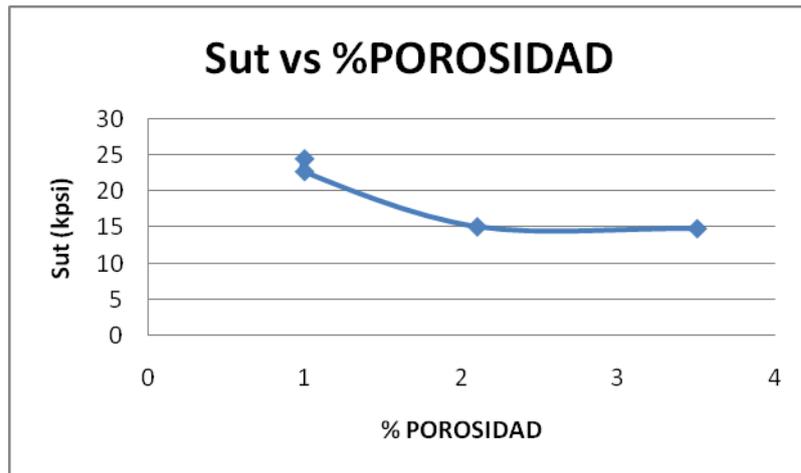
De manera similar, los valores de porosidad calculados para las probetas anteriores, demuestran que no se presenta una cantidad considerable de poros, por lo cual, la obtención de la aleación de aluminio ASTM 40E, también es satisfactoria. Los valores de esferoidicidad, dados por la media aritmética, demuestran que los poros tienen forma esférica.

En la Tabla 4.48 se indican los valores correspondientes al porcentaje de porosidad y de la resistencia última a la tensión (Sut).

**Tabla 4.48: VALORES DE % DE POROSIDAD Y DE LA RESISTENCIA (Sut).**

<b>Probeta</b>	<b>% POROSIDAD</b>	<b>Sut (kpsi)</b>
barra	1	24,52
3 min.	1	22,74
7 min.	2,1	15,05
5 mi.	3,5	14,8

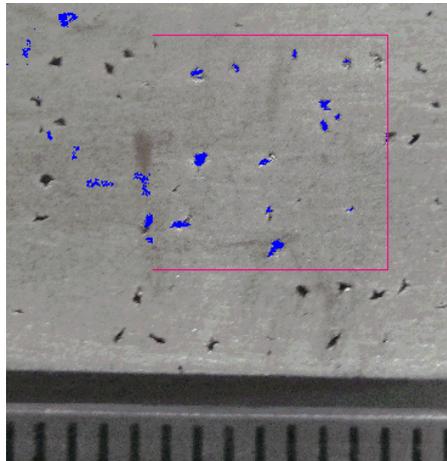
En la Figura 4.54 se indica la relación entre el % de porosidad y la resistencia última a la tensión (Sut), considerando los valores de la Tabla 4.48.



**Figura 4.54:** Relación entre el % de porosidad y la resistencia última a la tensión (Sut).

La Figura 4.54 también indica que mientras mayor sea el % de porosidad, menor será la resistencia última a la tensión de las probetas.

#### e) FUNDICIÓN EN ARENA



**Figura 4.55:** Distribución de poros en una probeta para ensayos de tracción, solidificada en molde de arena. Porosidad: 1.1%.

En las tablas que a continuación se muestran, se indican datos y valores relacionados con la esferoidicidad, cantidad y tamaño de poros para la probeta de la Figura 4.55.

**Tabla 4.49:** DATOS DE ESFEROIDICIDAD.

Mínimo	0.13
Máximo	1
Media	0.790

Desviación estándar	0.312
Cantidad	80
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

**Tabla 4.50:** CANTIDAD DE POROS.

Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Cantidad	(%)	(%) Acumulado
0-50	46	57.50	57.50
50-100	8	10.00	67.50
100-150	6	7.50	75
150-200	5	6.25	81.25
200-250	6	7.50	88.75
250-300	1	1.25	90.00
300-350	2	2.50	92.50
350-400	2	2.50	95.00
400-450	1	1.25	96.25
450-500	1	1.25	97.50
600-650	2	2.50	100

**Tabla 4.51:** TAMAÑO DE POROS.

Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	12.1
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	629.6
Media ( $\mu\text{m}$ )	104.3
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	137.3
Sumatoria ( $\mu\text{m}$ )	8348.0
Cantidad	80
Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	49.7e+06

De las tablas anteriores puede observarse que los poros tienen mayor tamaño cuando las aleaciones se funden en moldes de arena que cuando se funden en molde metálico.

## 4.7 EVALUACIÓN DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

Para la evaluación de la composición química de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E, se realizó un ensayo de espectrometría en **CEDAL** (Corporación Ecuatoriana De Aluminio S.A.), ubicada en la ciudad de Latacunga.

### 4.7.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355

Los resultados del ensayo de espectrometría que se indican en la Tabla 4.52, muestran la composición química de la aleación de aluminio ASTM 355.

**Tabla 4.52:** COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355.

	COMPOSICIÓN (%)		
REFERENCIA	Si (%)	Cu (%)	Mg (%)
METALS HANDBOOK	5	1.3	0.5
ALEACIÓN ESPOCH	6.34	1.35	0.39

Comparando los valores de composición química obtenidos por CEDAL con los valores estándar, se observa que la composición química obtenida en este trabajo se encuentra dentro de los límites permisibles para esta aleación. Véase la sección 3.4.2.

#### 4.7.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

Los resultados del ensayo de espectrometría que se indican en la Tabla 4.53, muestran la composición química de la aleación de aluminio ASTM 40E.

**Tabla 4.53:** COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E.

	COMPOSICION (%)			
REFERENCIA	Zn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ti (%)
METALS HANDBOOK	5.5	0.6	0.5	0.2
ALEACIÓN ESPOCH	5.08	0.362	0.017	0.025

De igual manera, comparando los valores de composición química obtenidos por CEDAL con los valores estándar, se observa que la composición química obtenida en este trabajo se encuentra dentro de los límites permisibles para esta aleación. Véase la sección 3.4.3.

## 4.8 EVALUACIÓN DE DEFECTOS Y SUS SOLUCIONES

### 4.8.1 GOTAS FRÍAS

Es este un efecto común en todos los moldeos; debe indicarse que se presenta bajo la forma de inclusión de partes metálicas presolidificadas y que son arrastradas al momento de colar.

En la Tabla 4.54 se indican las causas y las soluciones para evitar la formación de gotas frías en la fundición.

**Tabla 4.54:** GOTAS FRÍAS: CAUSAS Y SOLUCIONES.

CAUSAS	SOLUCIONES
Disposición y sección de las diferentes partes del canal de colada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar una caída exagerada de metal</li> <li>- Verificar las secciones del bebedero, del canal de colada con escorias y de las entradas de colada</li> </ul>
Colada defectuosa (parada).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponer de un embudo de colada de dimensiones apropiadas y de forma especial para evitar el torbellino</li> </ul>

#### 4.8.2 GRIETAS

Las grietas se producen durante la solidificación y después de ésta; el desigual enfriamiento de las diferentes partes de la pieza fabricada, hace que una zona se solidifique después que las zonas que la circundan, estas variaciones de volumen con fuertes tensiones llegan a producir la rotura. Las grietas son más frecuentes en el moldeo en coquilla que en el moldeo en arena.

La Tabla 4.55 indica las causas y las soluciones para evitar la aparición de grietas en la fundición.

**Tabla 4.55:** GRIETAS: CAUSAS Y SOLUCIONES.

CAUSAS	SOLUCIONES
Trazado de la pieza, enfriamiento desigual.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modificar la concepción del molde.</li> <li>- Verificar la posición de las entradas de colada y de las mazarotas, con el fin de que las partes que tienen tendencia a la grieta no se solidifique al final.</li> <li>- Utilizar refrigeradores para equilibrar la solidificación.</li> </ul>
Coquilla demasiado fría.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calentar la coquilla.</li> <li>- Emplear revestimientos aislantes.</li> </ul>
Tratamientos térmicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los mismos fenómenos pueden producirse en el temple si las tensiones son muy fuertes; las grietas se producen en el momento del enfriamiento.</li> </ul>

Con el objetivo de excluir la creación de grietas calientes en las molduras, en la práctica se debe observar lo siguiente:

- 1) Fundir la aleación con una composición química estrictamente determinada,
- 2) Eliminar las causas que obstaculizan la contracción en el proceso de enfriamiento de la moldura en el molde.
- 3) Al diseñar las molduras evitar transiciones bruscas de las secciones macizas a las delgadas y hacer conjugaciones suaves,
- 4) Asegurar un enfriamiento uniforme de las secciones de espesores gruesos y delgados en las molduras con ayuda de enfriadores,
- 5) Utilizar estructuras de sistemas de bebederos-alimentadores que excluya recalentamientos locales del molde y la moldura,
- 6) Emplear nervios falsos (de contracción) para elevar la resistencia de la sección maciza de la moldura, donde se crean con frecuencia grietas calientes.

#### **4.9 MEDIDAS DE PREVENCIÓN CONTRA LA FORMACIÓN DE SOPLADURAS DE GAS Y POROSIDADES EN LAS MOLDURAS**

Las sopladuras de gas y la porosidad en las piezas fundidas se pueden reducir sólo observando estrictamente el proceso tecnológico en las etapas de elaboración de la moldura desde la preparación del metal líquido hasta el llenado del molde y la solidificación de la pieza. Las medidas de prevención contra la aparición de defectos en las molduras a consecuencia del gas se dividen en tres grupos.

Al primer grupo pertenecen las medidas de prevención contra la saturación de la aleación con gases en el proceso de fusión. Los materiales de la carga antes de la fusión deben ser limpiados minuciosamente de la corrosión, aceite y humedad.

Para evitar la saturación de las aleaciones con gases durante la fusión en el horno, en la superficie especular de la masa fundida se aplica una capa de fundente, como también se utiliza la fundición en medio de un gas de protección, inerte con respecto al metal líquido. En el caso de fusión de aleaciones para molduras muy importantes, la carga es expuesta a secado o calcinación y, en ocasiones, a la rarefacción.

La fusión y vaciado de las aleaciones utilizadas para molduras, en las cuales el contenido de gas debe ser mínimo, generalmente se realiza en unidades de fusión y colada al vacío. A estos metales pertenecen el titanio y sus aleaciones, el molibdeno y otros.

Al segundo grupo pertenecen las medidas que prevén la desgasificación de la aleación líquida fuera de la unidad de fusión antes de vaciarse en el molde o en el proceso de colado: la rarefacción de la aleación en la cuchara, el colado en unidades al vacío, el tratamiento de la aleación con ultrasonido, como también el soplado de las aleaciones con gases inertes, por ejemplo, cloro, nitrógeno, argón. Este último método se emplea al preparar aleaciones de aluminio.

El cloro, al interaccionar con el aluminio, crea el cloruro de aluminio gaseoso  $AlCl_3$ . En las burbujas que penetran en el metal líquido se difunde el hidrógeno disuelto en la aleación.

Las burbujas que contienen hidrógeno emergen a la superficie especular del metal fundido, evacuando el hidrógeno del baño.

En la práctica se emplea ampliamente el mantenimiento de las aleaciones de aluminio antes de la colada, en este caso la aleación se enfría lentamente y los gases disueltos se desprenden de ésta.

Al tercer grupo pertenecen las medidas que mejoran la calidad del molde. Se presta una gran atención al flujo de gas orientado desde la moldura al molde. Tiene mucha importancia la evacuación de los gases a través de las paredes del molde y las portadas de los machos.

Para evitar la formación de sopladuras de gas en las molduras es necesario tomar las medidas siguientes: aumentar la penetrabilidad al gas del molde y el macho; reducir la humedad de la mezcla de moldeo; elevar la penetrabilidad al gas de las mezclas de moldeo y para machos; secar los moldes; cubrir la superficie de los moldes, en particular con desmoldeantes de grafito.

#### 4.10 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES OBTENIDAS CON DATOS ESTÁNDAR

Una vez que se han realizado los respectivos ensayos mecánicos, ahora se procederá a realizar una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo, y las propiedades mecánicas estándar de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E.

Los datos estándares se tomarán según se especifican en la referencia [17].

**Tabla 4.56:** COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS ENTRE DATOS ESTÁNDAR Y LOS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 355.

DATOS	ESTÁNDAR	OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO				
		355 (F)	355 (T6)	355 (F) (barra)	355 (F) (2 min)	355 (F) (3 min)
Sut (kpsi)	42	16.24	17.9	18.27	16.21	19.20
Sy (kpsi)	27	15.46	17.16	17	15.20	18
E (Mpsi)	10.2	7.27	7.85	11.13	9.41	9.41
Elongación (%)	4	2.47	2.78	3.2	1.4	4
Dureza (HB)	90	63.04	67.60	69.18	78.54	67.92
Impacto (ft-lb)	-----	1.98	2.12	2.2	1.8	2.3

**Tabla 4.57:** COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS ENTRE DATOS ESTÁNDAR Y LOS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E.

DATOS	ESTÁNDAR	OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO					
		40E (F)	40E (T4)	40E (F) (barra)	40E (F) (3 min)	40E (F) (7 min)	40E (F) (5 min)
<b>Sut</b> (kpsi)	35	18.48	18.14	24.52	22.74	15.05	14.80
<b>Sy</b> (kpsi)	25	17.89	16.70	16	16.5	13.45	12.64
<b>E</b> (Mpsi)	10.3	9.35	8.87	9.17	9.41	7.84	8.23
<b>Elongación</b> (%)	5	3.42	2.55	4.6	3.6	1.2	1
<b>Dureza</b> (HB)	75	61.54	62.79	59.14	71.66	73.32	75.22
<b>Impacto</b> (ft-lb)	2-3	3.68	1.88	2.5	2.35	1.6	1.4

Considerando los valores de las propiedades mecánicas que se muestran en las Tablas 4.56 y 4.57, se puede establecer que dichas propiedades son bajas en comparación a las propiedades estándar, debido a la presencia de porosidad y a la presencia de hierro en una cantidad considerable (según el análisis espectrométrico) que es un elemento que disminuye la resistencia mecánica.

# CAPÍTULO V

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado satisfactoriamente el procedimiento de fabricación y obtención de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E mediante el proceso de fundición en molde metálico (fundición en troquel).
- Se han determinado los parámetros más importantes en el proceso de fundición en moldes metálicos, tales como: velocidad de colado, sistema de alimentación, lo que permitió obtener probetas para ensayos de tracción de buena calidad.
- Con la ayuda de procesos de mecanizado, en este caso el control numérico (CNC), la construcción del molde metálico para la obtención de barras para ensayos de tracción fue la más adecuada, puesto que la obtención de la forma de la cavidad del molde sería difícil mediante procesos de mecanizado manuales tradicionales (torno y fresa).
- El cálculo de carga para cada una de las aleaciones fue muy satisfactorio, ya que el análisis de espectrometría, reveló que con las cantidades de materia prima establecidas (perfilería de aluminio y pistones) en el cálculo, la composición química se encontraba dentro de límites aceptables.
- Se ha determinado que el tiempo de enfriamiento óptimo de las probetas para ensayo de tracción de las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E dentro del molde metálico, fue de 3 minutos.
- La evaluación de las propiedades mecánicas y metalúrgicas, obtenidas mediante los respectivos ensayos, demostró que cuando la distancia entre brazos dendríticos secundarios disminuye, la resistencia mecánica aumenta.

- El procedimiento de colado por gravedad, a una altura de 10 mm sobre el embudo, para las aleaciones de aluminio ASTM 355 y ASTM 40E, para obtener probetas para ensayo de tracción, con las condiciones,  $T_{\text{metal líquido}} = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{molde metálico}} = 450^{\circ}\text{C}$  y  $d_{\text{alimentador}} = 8\text{mm}$ , asegura un flujo laminar.
- Los ensayos de tensión demostraron que el tratamiento térmico (T6) realizado a la aleación ASTM 355 mejoró de manera considerable sus propiedades mecánicas. Para la aleación ASTM 40E no es necesario realizar el tratamiento térmico (T4) puesto que no se encontraron mejoras en sus propiedades mecánicas.
- Cuando el porcentaje de porosidad disminuye, la resistencia mecánica de las aleaciones aumenta.
- Mientras más bajo es el valor de resistencia al impacto, mayor es el valor de dureza.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Tener precaución en lo referente al estado en que se encuentre la materia prima (en este caso los pistones y la perfilería), pues si ésta se encuentra contaminada (con grasa, pintura, hollín, etc.) puede provocar alteraciones graves en la homogeneidad de las aleaciones, causando porosidades.
- Evitar una deficiente limpieza de los crisoles después de cada colada, pues los residuos de material fundido pueden convertirse en impurezas, mismas que podrían ser causa de alteración de las aleaciones.
- Evitar la irregularidad en el recubrimiento de los moldes metálicos, pues esto perjudica la precisión y el aspecto de las piezas, además puede producir oquedades locales en las partes en las que el exceso de recubrimiento retarda la solidificación.
- Las aleaciones de aluminio de este trabajo no deben someterse a temperaturas superiores a  $510^{\circ}\text{C}$  durante el tratamiento térmico, puesto que sufren el fenómeno de fusión parcial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **SMITH**, William. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3ra. ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998. pp. 216, 217, 242, 243, 456-460.
- [2] **N. D. TITOV**. Tecnología del Proceso de Fundición. Moscú: Mir, 1981. pp. 11-17, 148-165, 220-243, 392-395, 404-415, 418-428.
- [3] **AVNER**, Sidney. Introducción a la Metalurgia Física. 2da. ed. México: McGraw-Hill, 1988. pp. 38, 56, 477, 567.
- [4] **ASKELAND**, Donald. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta. ed. México: Thomson, 2004. pp. 260, 261, 505-508, 511, 592-595, 970-972.
- [5] **LUCCHESI**, Doménico. Ensayos Mecánicos de los Materiales Metálicos. Florencia: LABOR, 1973. pp. 10-21, 64-74.
- [6] **SHIGLEY**, Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. 4ta. ed. México: McGraw-Hill, 1985. pp. 231, 270-272.
- [7] **BEER**, Ferdinand. Mecánica de Materiales. 2da. ed. Colombia: McGraw-Hill, 1993. pp. 42-44, 48.
- [8] **PYTEL**, Andrew. Resistencia de Materiales. 4ta. ed. México: Oxford University Press, 2003. pp. 27-30.
- [9] **NASH**, William. Teoría y Problemas de Resistencia de Materiales. 2da. ed. México: McGraw-Hill, 1970. pp. 1-6.
- [10] **FRESNO** David. Optimización de los Tratamientos Térmicos T5 y T6 para una Aleación A356 Conformada por SLC. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2007. pp. 7

- [11] **BAILE** María. Estudio de la Conformación de Componentes Aluminio-Silicio en Estado Semisólido. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2007. pp. 11.
- [12] **PÁSTOR**, Mario. Procesos de Fundición. Riobamba, 1995. pp. 141 (doc.).
- [13] **AYALA** Raúl. Construcción y Pruebas de Moldes Permanentes para Aluminio. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 1999. pp. 26, 27.
- [14] **FIERRO** Juan. Influencia del Contenido de Silicio Sobre la Fluidez y el Dimensionamiento de Sistemas de Alimentación para Piezas Fundidas en Aleaciones de Aluminio 6xxx. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2002. pp. 48,49.
- [15] **BARRAND** Pierre. Procesos de Conformado del Aluminio y sus Aleaciones- Enciclopedia del Aluminio-Vol. 4. Bilbao: URMO, 1974. pp. 13-20, 34,35, 60, 68-72, 77, 78, 82-87, 94-97.
- [16] **BARRAND** Pierre. Propiedades del Aluminio-Enciclopedia del Aluminio-Vol. 2. Bilbao: URMO, 1974. pp. 119-121.
- [17] **ASM HANDBOOK**. ASM International. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material-Vol. 2. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995. pp. 956, 957, 968.
- [18] **ASM HANDBOOK**. ASM International. Alloys Phases Diagrams-Vol. 3. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995. pp. 263, 265.
- [19] **SMITHELLS METALS REFERENCE BOOK**. Section 8-7. Vapour Pressure. 7ma. ed. Oxford: Red Educational, 1992. pp. 8, 54.
- [20] **ASTM E 8**. ASTM Committee. Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials. 2da. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1977. pp. 14.

- [21] **ASTM E 3**. ASTM Committee. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-8.
- [22] **ASTM E 407**. ASTM Committee. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-21.
- [23] **ASTM E 10**. ASTM Committee. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-9
- [24] **ASTM E 23**. ASTM Committee. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-25.
- [25] **J. GERIN** Sylvia. Cast Metals Technology. Des Plaines, Illinois. American Foundrymens Society/Cast Metal Institute, 1990. pp. 41, 42.
- [26] **R.W. RUDDLE**. The Running and Gating of Sand Casting. Grosvenor Garden, London: Institute of Metals. Monograph and Report Series, 1956. pp. 22, 97.
- [27] **CHAUSSIN** C. Metalurgia: Aleaciones Metálicas-Tomo 1. 1ra. ed. Bilbao: URMO, 1975. pp. 236, 238, 240, 242.
- [28] **ASTM E 112**. ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995. pp. 1-24.
- [29] **ASM HANDBOOK** . ASM International. Casting-Vol. 15. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995. pp. 585, 586.

# BIBLIOGRAFÍA

**ASKELAND**, Donald. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta. ed. México: Thomson, 2004.

**ASM HANDBOOK**. ASM International. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material-Vol. 2. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995.

**ASM HANDBOOK**. ASM International. Alloys Phases Diagrams-Vol. 3. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995.

**ASM HANDBOOK**. ASM International. Casting-Vol. 15. 10ma. ed. USA: The Materials Information Company, 1995.

**ASTM E 3**. ASTM Committee. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

**ASTM E 8**. ASTM Committee. Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials. 2da. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1977.

**ASTM E 10**. ASTM Committee. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

**ASTM E 23**. ASTM Committee. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

**ASTM E 112**. ASTM Committee. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

**ASTM E 407**. ASTM Committee. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 3ra. ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 1995.

**AVNER**, Sidney. Introducción a la Metalurgia Física. 2da. ed. México: McGraw-Hill, 1988.

**AYALA** Raúl. Construcción y Pruebas de Moldes Permanentes para Aluminio. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 1999.

**BAILE** María. Estudio de la Conformación de Componentes Aluminio-Silicio en Estado Semisólido. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.

**BEER**, Ferdinand. Mecánica de Materiales. 2da. ed. Colombia: McGraw-Hill, 1993.

**CHAUSSIN** C. Metalurgia: Aleaciones Metálicas-Tomo 1. Bilbao: URMO, 1975.

**BARRAND** Pierre. Propiedades del Aluminio-Enciclopedia del Aluminio-Vol. 2. Bilbao: URMO, 1974.

**BARRAND** Pierre. Procesos de Conformado del Aluminio y sus Aleaciones-Enciclopedia del Aluminio-Vol. 4. Bilbao: URMO, 1974.

**FIERRO** Juan. Influencia del contenido de Silicio Sobre la Fluidéz y el Dimensionamiento de Sistemas de Alimentación para Piezas Fundidas en Aleaciones de Aluminio 6xxx. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2002.

**FRESNO** David. Optimización de los Tratamientos Térmicos T5 y T6 para una Aleación A356 Conformada por SLC. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.

**J. GERIN** Sylvia. Cast Metals Technology. Des Plaines, Illinois. American Foundrymens Society/Cast Metal Institute, 1990.

**LUCCHESI**, Doménico. Ensayos Mecánicos de los Materiales Metálicos. Florencia: LABOR, 1973.

**NASH, William.** Teoría y Problemas de Resistencia de Materiales. 2da. ed. México: McGraw-Hill, 1970.

**N. D. TITOV.** Tecnología del Proceso de Fundición. Moscú: Mir, 1981.

**PÁSTOR, Mario.** Procesos de Fundición. Riobamba, 1995 (doc.).

**PYTEL, Andrew.** Resistencia de Materiales. 4ta. ed. México: Oxford University Press, 2003.

**R.W. RUDDLE.** The Running and Gating of Sand Casting. Grosvenor Garden, London: Institute of Metals. Monograph and Report Series, 1956.

**SHIGLEY, Edward.** Diseño en Ingeniería Mecánica. 4ta. ed. México: McGraw-Hill, 1985.

**SMITH, William.** Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3ra. ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998.

**SMITHELLS METALS REFERENCE BOOK.** Section 8-7. Vapour Pressure. 7ma. ed. Oxford: Red Educational, 1992.

# LINKOGRAFÍA

## **Procesos de Fundición**

<http://www.Wikipedia.com>. “*La Enciclopedia Libre*”.

2009-1-4

## **Aluminio**

<http://www.Monografias.com>.

2009-1-6

## **Material Data Sheet**

<http://www.MatWeb.com>. //Online.htm.

2009-1-8

## **Aluminum Alloys**

<http://www.efunda.com>.

2009-2-12

## **Efecto de los Tratamientos Térmicos en las Aleaciones de Aluminio-Silicio**

<http://www.Google.com>

2009-2-15

## **Tratamientos del Aluminio**

<http://www.Google.com>// Alu-stock.es Artículo técnico

2009-3-10

## **Composición de las Aleaciones de Aluminio**

<http://www.Google.com> // Alu-stock.es. Tabla de la composición química de las aleaciones comerciales de aluminio de forja

2009-3-18

### **Proceso de Extrusión del Aluminio**

[http://www. Google.com // Hydro aluminio La Roca](http://www.Google.com//Hydro%20aluminio%20La%20Roca) Artículo técnico

2009-4-10

### **Proceso de Extrusión y Temple del Aluminio**

[http://www. Google.com // San-ba.com](http://www.Google.com//San-ba.com). Artículo técnico

2009-4-14

### **Fundición de Piezas de Aluminio**

[http://www. Google.com // Junta de Andalucía Averroes Rocío García García](http://www.Google.com//Junta%20de%20Andaluc%C3%ADa%20Averroes%20Roc%C3%ADo%20Garc%C3%ADa%20Garc%C3%ADa) Artículo técnico

2009-4-20

### **Fabricación de Piezas de Aluminio**

[http://www. Google.com // Álvaro Almeida Sánchez](http://www.Google.com//Alvaro%20Almeida%20S%C3%A1nchez) Universidad Libre de Colombia.

Bogotá 2004

2009-5-2

### **Mecanizado del Aluminio**

[http://www. Google.com// Universidad Politécnica de Catalunya](http://www.Google.com//Universidad%20Polit%C3%A9cnica%20de%20Catalunya). Artículo técnico.

2009-5-10

### **Mecanizado de las Aleaciones de Aluminio**

[http://www. Google.com// Artículo Técnico](http://www.Google.com//Art%C3%ADculo%20T%C3%A9cnico). Autor desconocido, Universidad Politécnica de Catalunya

2009-6-20

## **Mecanizado por Electroerosión**

[http://www. Google.com](http://www.Google.com) // Revista Metal-univers 6-4-2002 María del Mar Espinosa.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales UNED Madrid.

2009-7-14

**ANEXOS**

## ANEXO 1

### CÁLCULO DE CARGA PARA LA ALEACION DE ALUMINIO ASTM 355

La composición química estándar:

**5% Si, 1,3% Cu, %0,5 Mg**

Los rangos de composición química dados para esta aleación en molde permanente son:

**(4,5-5,5)% Si, (1-1,5)% Cu, (0,4-0,6)% Mg**

### COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA

	<b>%Si</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Mg</b>
PISTONES (4032)	13.1	1.21	0.332
PERFILERÍA (6063)	0.4	0.1	0.7

### CÁLCULO PARA 100 kg

	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fracción</b>	<b>% Si</b>	<b>% Mg</b>	<b>% Cu</b>
PISTONES	36,65	0,3665	4,80115	0,121678	0,45446
PERFILERÍA	63,35	0,6335	0,2534	0,44345	0,06335
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>5,05455</b>	<b>0,565128</b>	<b>0,51781</b>
% EVAPORACIÓN			<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

	<b>% Si</b>	<b>% Mg</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Al</b>
<b>TOTAL disminuyendo % de evaporación</b>	<b>5,0040045</b>	<b>0,54817416</b>	<b>0,5126319</b>	<b>93,935189</b>

### CÁLCULO DE CARGA PARA LA CAPACIDAD DEL CRISOL (320 gr)

	<b>Peso (gr)</b>	<b>Fracción</b>	<b>% Si</b>	<b>% Mg</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Al</b>
PISTONES	117,28	0,3665	4,80115	0,121678	0,45446	
PERFILERÍA	202,72	0,6335	0,2534	0,44345	0,06335	
<b>TOTAL</b>	<b>320</b>	<b>1</b>	<b>5,05455</b>	<b>0,565128</b>	<b>0,51781</b>	
<b>TOTAL disminuyendo % de evaporación</b>			<b>5,0040045</b>	<b>0,54817416</b>	<b>0,5126319</b>	<b>93,935189</b>

## ANEXO 2

### CÁLCULO DE CARGA PARA LA ALEACIÓN DE ALUMINIO ASTM 40E

La aleación estándar tiene la siguiente composición química:

**5,5% Zn, %0,6 Mg, %0,5 Cr, %0,2 Ti**

Los rangos de composición química dados para esta aleación en molde permanente son:

**(5-7)% Zn, (0,5-0,65)% Mg, (0,4-0,6)% Cr, (0,1-0,25)% Ti**

### COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA

	% Si	% Mg	% Cu	% Zn	% Cr	% Ti
<b>ZINC</b>				100		
<b>PERFILERÍA</b>	0,4	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1

### CÁLCULO PARA 100 kg

	Peso (kg)	Fración	% Zn	% Mg	% Cr	% Ti
<b>ZINC</b>	6	0,06	6			
<b>PERFILERÍA</b>	94	0,94	0,094	0,658	0,094	0,094
<b>TOTAL</b>	100	1	<b>6,094</b>	<b>0,658</b>	<b>0,094</b>	<b>0,094</b>

<b>% EVAPORACIÓN</b>	8,66	3	2,5	1
----------------------	------	---	-----	---

	% Zn	% Mg	% Cr	% Ti	% Al
<b>TOTAL disminuyendo % de evaporación</b>	<b>5,5662596</b>	<b>0,63826</b>	<b>0,09165</b>	<b>0,09306</b>	<b>93,6107704</b>

### CÁLCULO DE CARGA PARA LA CAPACIDAD DEL CRISOL (320 gr)

	Peso (gr)	Fración	% Zn	% Mg	% Cr	% Ti	% Al
<b>ZINC</b>	19,2	0,06	6				
<b>PERFILERÍA</b>	300,8	0,94	0,094	0,658	0,094	0,094	
<b>TOTAL</b>	320	1	<b>6,094</b>	<b>0,658</b>	<b>0,094</b>	<b>0,094</b>	
<b>TOTAL disminuyendo % de evaporación</b>			<b>5,5662596</b>	<b>0,63826</b>	<b>0,09165</b>	<b>0,09306</b>	<b>93,6107704</b>

## ANEXO 3

### CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A FO-FN-06 – Resultado de Análisis de Espectrómetro



### Resultados Químicos

<b>Número de Muestra:</b>	<b>muestra 1</b>	<b>Proveedor:</b>	<b>CEDAL</b>
<b>Cliente:</b>	<b>ESPOCH</b>	<b>Hora de chispeo:</b>	<b>11:27</b>
<b>Turno:</b>	<b>Primero</b>	<b>Fecha de chispeo:</b>	<b>2009/08/11</b>
<b>Jefe de Turno:</b>	<b>Ing. W. Real</b>	<b>Fecha de colada:</b>	<b>2009/08/11</b>
<b>Aleación:</b>	<b>355</b>	<b>Nombre Colada:</b>	<b>ALUMINIO-SILICIO</b>

#### Análisis espectrométrico Foundry-MASTER Grado:

# Chispeo	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	88.4	6.55	0.778	1.53	0.0950	0.342	1.10	0.0642
2	93.0	4.51	0.639	0.832	0.0866	0.426	0.143	0.0257
3	92.9	4.84	0.525	0.868	0.0854	0.281	0.155	0.0261
<b>Promedio</b>	<b>89.1</b>	<b>6.34</b>	<b>0.646</b>	<b>1.35</b>	<b>0.115</b>	<b>0.393</b>	<b>0.807</b>	<b>0.0538</b>

# Chispeo	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0.377	0.0721	0.0002	>0.0200	0.0007	0.137	0.0512	0.0440
2	0.169	0.0282	<0.0001	0.0020	<0.0001	0.0151	<0.0075	0.0001
3	0.182	0.0288	<0.0001	0.0059	<0.0001	0.0118	<0.0075	0.0002
<b>Promedio</b>	<b>0.406</b>	<b>0.0556</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0088</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.170</b>	<b>0.0879</b>	<b>0.0287</b>

# Chispeo	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0.0466	0.0075	0.0219	0.0434	<0.0005	0.0548	0.0531	0.118
2	0.0077	0.0090	<0.0050	0.0064	<0.0005	0.0118	0.0035	0.0082
3	0.0073	0.0039	<0.0050	0.0051	<0.0005	0.0113	0.0018	0.0038
<b>Promedio</b>	<b>0.0404</b>	<b>0.0090</b>	<b>0.0716</b>	<b>0.0318</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.0370</b>	<b>0.102</b>	<b>0.0907</b>

## ANEXO 4

**CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A**  
**FO-FN-06 – Resultado de Análisis de Espectrómetro**



### Resultados Químicos

<b>Número de Muestra:</b>	muestra 1	<b>Proveedor:</b>	CEDAL
<b>Cliente:</b>	ESPOCH	<b>Hora de chispeo:</b>	11:47
<b>Turno:</b>	Primero	<b>Fecha de chispeo:</b>	2009/08/11
<b>Jefe de Turno:</b>	Ing. W. Real	<b>Fecha de colada:</b>	2009/08/11
<b>Aleación:</b>	40E	<b>Nombre Colada:</b>	ALUMINIO-ZINC

*Análisis espectrométrico Foundry-MASTER Grado:*

# Chispeo	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	92.2	0.971	0.894	0.0716	0.0412	0.475	4.35	0.0419
2	92.5	0.766	1.05	0.0683	0.0244	0.289	5.15	0.0063
3	91.9	0.767	1.04	0.0729	0.0217	0.323	5.75	0.0039
<b>Promedio</b>	<b>92.2</b>	<b>0.834</b>	<b>1.00</b>	<b>0.0709</b>	<b>0.0291</b>	<b>0.362</b>	<b>5.08</b>	<b>0.0174</b>

# Chispeo	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0.0564	0.0536	0.0002	>0.0200	0.0005	0.148	0.113	0.0420
2	0.0180	0.0135	<0.0001	0.0026	<0.0001	0.0065	0.0131	<0.0001
3	0.0157	0.0090	<0.0001	0.0016	<0.0001	<0.0020	<0.0075	<0.0001
<b>Promedio</b>	<b>0.0300</b>	<b>0.0254</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>0.0081</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0517</b>	<b>0.0422</b>	<b>0.0140</b>

# Chispeo	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0.0474	0.0279	0.0396	0.131	0.0009	0.0448	0.0275	0.121
2	0.0071	0.0029	<0.0050	<0.0030	<0.0005	0.0116	0.0064	0.0070
3	0.0043	0.0036	<0.0050	<0.0030	<0.0005	0.0095	0.0041	<0.00030
<b>Promedio</b>	<b>0.0196</b>	<b>0.0115</b>	<b>0.0132</b>	<b>0.0446</b>	<b>&lt;0.0005</b>	<b>0.0220</b>	<b>0.0126</b>	<b>0.0429</b>

Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A  
 Avda. Unidad Nacional  
 Latacunga  
 Tel.: 032 812610      Fax: 032 812615  
 Web: www.cedal.com.ec