



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN
DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE
FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA**

Milton Alexander Fuentes Orozco

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Aguilar Rivas

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN
DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE
FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. MILTON ALEXANDER FUENTES OROZCO

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTE EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Luis Diego Aguilar Ralón |
| VOCAL V | Br. Christian Daniel Estrada Santizo |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR | Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | Mtra. Sandra Ninnet Ramírez Flores |
| EXAMINADOR | Dra. Aura Marina Rodríguez Pérez |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN
DE LINGOTES DE ALUMINIO ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE
FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA**

Tema que me fuera aprobado por la dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 18 de septiembre de 2012.

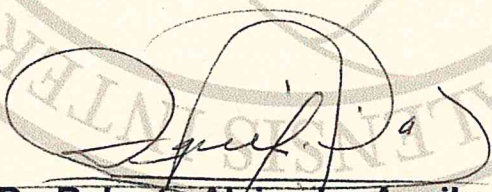

Milton Alexander Fuentes Orozco

EEPFI-811-2019

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico **Milton Alexander Fuentes Orozco** quien se identifica con Carné **100021085** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Dr. Roberto Alejandro Aguilar Rivas
Asesor

Ing. Roberto A. Aguilar Rivas
COLEGIADO No. 862

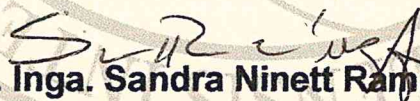
Guatemala, septiembre de 2019

EPPFI-810-2019

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Milton Alexander Fuentes Orozco** quien se identifica con Carné **100021085**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramirez Flores
 Coordinadora de Maestría
 Escuela de Estudios de Postgrado
 Facultad de Ingeniería
 Universidad de San Carlos de Guatemala

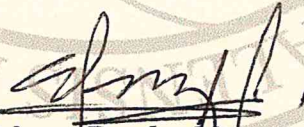


Guatemala, septiembre de 2019

EEPFI-809-2019

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Milton Alexander Fuentes Orozco** quien se identifica con Carné **100021085**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**
Director**Escuela de Estudios de Postgrado**
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, septiembre de 2019

EEPFI-808-2019

En mi calidad como Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO DE ALTA PUREZA Y ALEACIONES ALUMINIO-COBRE FUNDIDOS ARTESANALMENTE Y SUS PROPIEDADES DE DUREZA”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Milton Alexander Fuentes Orozco** quien se identifica con Carné **100021085**, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

“Id y Enseñad a Todos”


Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada ★
Decana

**Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala**

Guatemala, septiembre de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Que es fuente inagotable de sabiduría. Por ser el amigo que nunca falla, el que ha estado en los momentos más felices y en los difíciles de mi vida. Gracias por estar siempre conmigo.
- Mis padres** Edgar Baudilio Fuentes López y Gladys Leticia Orozco Miranda. Por ser instrumento de Dios al darme la vida, por su amor incondicional, formación moral y religiosa a través de esfuerzos y sacrificios. Dios los bendiga.
- Mis hermanos y hermana** Ronal Fuentes, Elfrid Fuentes, Ernesto Fuentes Leonardo Fuentes y Estefani Fuentes, por apoyarme en todo momento.
- Mi familia** Por ser parte de mi vida y porque siempre están ahí cuando los necesito.
- Mis amigos** Por brindarme su amistad y compañía tanto en los momentos felices como en los difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por darme la oportunidad de ser mi casa de estudios nuevamente. |
| Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería | Por los conocimientos adquiridos. |
| Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CII) | Por su apoyo y colaboración en la realización de los ensayos de dureza. |
| Doctor Roberto Alejandro Aguilar Rivas | Por su valioso apoyo y asesoría en la realización de esta investigación y por ser un ejemplo de perseverancia y entrega. |
| Ingeniero Hugo Leonel Ramírez | Por su amistad, confianza y apoyo para utilizar el laboratorio de metalurgia y metalografía. |
| Ingeniero Víctor Manuel Ruiz | Por su amistad y apoyo en el laboratorio de maquinado y CNC. |
| Ingeniero César García y al Ingeniero Héctor Méndez | Por su apoyo y colaboración en el Laboratorio de Investigaciones de Ingeniería Química. |

Ingeniero Sergio López

Por su amistad, apoyo y tiempo en las prácticas de fundición.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XI |
| GLOSARIO | XIII |
| RESUMEN | XV |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS..... | XVII |
| OBJETIVOS..... | XIX |
| RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO | XXI |
| INTRODUCCIÓN..... | XXIII |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1. Principios básicos de fundición..... | 1 |
| 1.1.1. Variables que afectan el proceso de colada | 3 |
| 1.1.1.1. Calentamiento del metal | 3 |
| 1.1.1.2. Vertido del metal fundido | 4 |
| 1.1.1.3. Análisis de ingeniería del vaciado o colada | 4 |
| 1.1.2. Materiales empleados para el moldeo | 6 |
| 1.1.2.1. Propiedades que deben reunir los materiales del moldeo..... | 6 |
| 1.1.2.2. Clasificación del proceso de fundición | 8 |
| 1.1.2.3. Preparación de los materiales empleados para el moldeo..... | 9 |
| 1.1.3. La colabilidad de los metales y aleaciones..... | 9 |
| 1.1.4. El concepto de la fluidez..... | 10 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2. | Principios básicos de solidificación | 12 |
| 1.2.1. | La solidificación de los metales puros | 12 |
| 1.2.1.1. | Cinéticas de los procesos atómicos en la interfase sólido-líquido..... | 12 |
| 1.2.1.2. | Distribución de temperaturas en la interfase sólido-líquido..... | 14 |
| 1.2.1.3. | Morfología de la interfase (forma)..... | 15 |
| 1.2.1.4. | Velocidad de interfase controlada por flujo térmico | 16 |
| 1.2.2. | La solidificación de las aleaciones | 16 |
| 1.2.2.1. | Solidificación de equilibrio | 17 |
| 1.2.2.2. | Solidificación de no equilibrio | 17 |
| 1.2.2.3. | Fusión de zona..... | 17 |
| 1.2.2.4. | Mezcla en el líquido..... | 17 |
| 1.2.2.5. | Forma de la interfase..... | 18 |
| 1.2.3. | El fenómeno de la nucleación | 19 |
| 1.2.4. | Las estructuras de solidificación..... | 21 |
| 1.2.4.1. | Macroestructura de los lingotes..... | 22 |
| 2. | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... | 27 |
| 2.1. | Determinar la relación entre las estructuras de solidificación y las durezas de las aleaciones coladas bajo las mismas condiciones termodinámicas | 27 |
| 2.1.1. | Estructuras resultantes de solidificación..... | 29 |
| 2.1.1.1. | Estructuras del aluminio de alta pureza | 29 |
| 2.1.1.2. | Estructuras de las aleaciones aluminio-cobre | 36 |
| 2.2. | Análisis de las diferencias de dureza cuando se modifican los sobrecalentamientos de colada | 58 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.1. | La dureza de las piezas fundidas en relación a las estructuras de solidificación | 59 |
| 2.2.1.1. | Ensayo de dureza Brinell (HB)..... | 59 |
| 2.2.1.2. | Equipo..... | 60 |
| 2.2.1.3. | Muestras de ensayo..... | 61 |
| 2.2.1.4. | Medición de la impresión o indentación | 63 |
| 2.2.1.5. | Cálculos..... | 64 |
| 2.3. | Determinación de los cambios y beneficios producidos por las estructuras de solidificación en la propiedad de dureza..... | 72 |
| 3. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 75 |
| 3.1. | Análisis interno de los resultados experimentales obtenidos entre las estructuras de solidificación y la dureza de las diferentes probetas de ensayo..... | 75 |
| 3.2. | Análisis externo comparativo con los antecedentes para realizar la siguiente investigación. | 81 |
| | CONCLUSIONES | 83 |
| | RECOMENDACIONES | 85 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 87 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Dos formas de molde: (a) molde abierto, simplemente un recipiente con la forma de la parte de fundición; y (b) molde cerrado, de forma más compleja que requiere un sistema de vaciado conectado con la cavidad. | 2 |
| 2. | Defecto provocado por una resistencia insuficiente del molde en seco y en caliente..... | 7 |
| 3. | Defectos causados por una permeabilidad insuficiente del molde de arena verde | 8 |
| 4. | La fluidez colada en (a) molde espiral (b) molde en forma de placa (c) extrayendo vacío..... | 10 |
| 5. | La temperatura del molde en la determinación de las velocidades de producción y de las propiedades mecánicas..... | 11 |
| 6. | Cuando una fusión solidifica, se (a) mantiene abierta más tiempo con la solidificación frontal de los metales puros y de los eutécticos que con (b) la solidificación dendrítica (c) los escombros de los cristales obstruyen el flujo | 11 |
| 7. | Las reacciones atómicas en la interfase sólido-líquido | 13 |
| 8. | La dependencia de las temperaturas de las velocidades de fusión y solidificación | 13 |
| 9. | El gradiente de temperatura positivo en una interfase sólido-líquido | 14 |
| 10. | Las dos morfologías de interfase observadas en metales puros con gradiente positivo. a) la interfase facetada; b) la interfase no facetada o planar | 15 |

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 11. | Segregación en una probeta de fluidez de aluminio al 99.99% | 16 |
| 12. | Efecto de la formación de una ampolla sobre la interfase en el perfil de temperatura para el caso de solidificación con un gradiente negativo en un metal puro..... | 18 |
| 13. | Energía libre de formación de un núcleo como función de su radio..... | 19 |
| 14. | Tamaño de embriones, con la temperatura en función del sobreenfriamiento | 20 |
| 15. | Ilustración de la temperatura de nucleación homogénea en un punto en donde el radio crítico es igual al radio del aglomerado de tamaño máximo..... | 21 |
| 16. | Zonas de una estructura granular | 22 |
| 17. | Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento en molde de grafito | 23 |
| 18. | La solidificación procede (a) con el crecimiento de granos columnares en los metales puros, pero (b) con el crecimiento de dendritas en las soluciones sólidas..... | 24 |
| 19. | Fenómeno de la multiplicación por efecto de la convección forzada en una probeta de fluidez de aluminio 2 % cobre. 60X..... | 25 |
| 20. | Zonas iniciales de aluminio 0.5 % cobre. 200X..... | 26 |
| 21. | Diagrama de equilibrio aluminio-cobre..... | 28 |
| 22. | a) Macroestructura de un lingote de aluminio alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 30 |
| 23. | a). Macroestructura de un lingote de aluminio alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 31 |
| 24. | a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza, a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 32 |

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 25. | a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 33 |
| 26. | a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento, molde acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 34 |
| 27. | a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 35 |
| 28. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 40 |
| 29. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 41 |
| 30. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 42 |
| 31. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 43 |
| 32. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 44 |
| 33. | a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X | 45 |

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 34. | a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 47 |
| 35. | a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena. b) Macroestructura amplificada a 20X | 48 |
| 36. | a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 49 |
| 37. | a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 50 |
| 38. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 51 |
| 39. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X | 52 |
| 40. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 53 |
| 41. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 54 |
| 42. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X..... | 55 |

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 43. | a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X | 56 |
| 44. | a) Macroestructura de un lingote de Al-33%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X | 58 |
| 45. | Máquina universal Tinius Olsen Super L300 | 61 |
| 46. | Lingote seccionado de aluminio de alta pureza..... | 62 |
| 47. | Cortes de lingote refrentado | 63 |
| 48. | Vernier digital | 64 |

TABLAS

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. | Reactivos utilizados para la revelación de estructuras a nivel macroscópico | 38 |
| II. | Aplicabilidad de reactivos en dependencia del tipo de aleación utilizada, basada en la tabla I..... | 39 |
| III. | Dureza de aluminio de alta pureza, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos | 65 |
| IV. | Dureza de aluminio de alta pureza, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos | 66 |
| V. | Dureza Al-1%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos | 66 |
| VI. | Dureza Al-1%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos | 67 |
| VII. | Dureza Al-3%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos | 67 |
| VIII. | Dureza Al-3%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos | 68 |
| IX. | Dureza Al-5%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos | 69 |
| X. | Dureza Al-5%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos | 70 |
| XI. | Dureza Al-33%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos | 71 |
| XII. | Dureza Al-33%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos | 71 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|------------------------|-----------------------------|
| Al | Aluminio |
| C | Carbono |
| cm | Centímetro |
| Cu | Cobre |
| ρ | Densidad |
| HD | Dureza Brinell |
| °C | Grado Celsius |
| Kg | Kilogramo |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| N/m² | Newton sobre metro cuadrado |
| % | Porcentaje |
| s | Segundo |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coefficiente de transferencia calórica | Capacidad de intercambio calórico de un material en particular en función de sus características físicoquímicas. |
| Dendritas | Formas arbóreas de crecimiento de las estructuras de solidificación. |
| Estructura columnar | Estructura cristalina de forma alargada del metal solidificado. |
| Estructura equiaxial | Estructura cristalina de forma equiaxial. |
| Fluidez | Longitud de la vena fluida alcanzada durante un ensayo de colada, hasta que es frenada por el mecanismo de solidificación. |
| Interface sólido-líquido | Límite entre la fase sólida y la fase líquida del metal. |
| Interfaz metal-molde | Límite superficial entre el metal que fluye durante la colada y la superficie del molde. |
| Presión metalostática | Altura del volumen metálico en estado líquido dentro del recipiente que lo contiene o presión de colada. |

| | |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rechupe | Vacío que aparece en piezas coladas, como consecuencia de la contracción debida a la solidificación. |
| Refrentado | Procedimiento realizado en una probeta de ensayo sobre un material o herramienta para lograr una superficie plana. |
| Segregación | Concentración del soluto en zonas específicas de las estructuras cristalinas. |
| Sobrecalentamiento | Diferencia entre la temperatura de colada y la temperatura del líquido del metal. |
| Sobrepresión | Exceso de presión con respecto a la presión metalostática natural, para provocar el mecanismo de multiplicación cristalina. |
| Solidificación | Paso del metal del estado líquido al estado sólido. |
| Sopladuras | Son cavidades redondeadas de paredes finas y tamaño variable que se producen por la acción de los gases que quedaron ocluidos al solidificar del metal. |
| Sustrato | Superficie de contacto del molde con el metal fluido. |
| Vena fluida | Forma del flujo metálico durante el proceso de colada. |

RESUMEN

Con el propósito de proporcionar un apoyo científico-tecnológico al sector de la fundición artesanal en Guatemala, del cual se carece, este proyecto de investigación analiza los conceptos científico-técnicos más importantes de las estructuras de solidificación de aleaciones de aluminio de alta pureza y aleaciones Al1%Cu, Al3%Cu, Al5%Cu y Al33%Cu, las cuales rigen las propiedades metalmecánicas de las piezas fundidas artesanalmente. De esta manera se implementa una metodología que consiste en determinar el efecto que produce el sustrato de los moldes de fundición, a través del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, incidiendo directamente sobre las estructuras de las piezas fundidas.

En tal sentido, se hizo un diseño modelo de colada mediante el cual se pudieran determinar las variaciones de las estructuras de solidificación para posteriormente relacionarlas directamente con las durezas de las diferentes aleaciones. Se obtuvieron resultados representativos como: la dependencia de la dureza respecto a las estructuras de las probetas fundidas, relacionándolas directamente con la temperatura de colada y las cantidades de soluto de las aleaciones.

Los resultados indican que la investigación realizada en este proyecto mejora la calidad de los productos obtenidos y que nuevas investigaciones en otro tipo de aleaciones fundidas artesanalmente serían de gran beneficio en el desarrollo tecnológico del país.

Se concluye que los parámetros de colada y las estructuras de solidificación de las aleaciones definen directamente las propiedades de dureza de las mismas, estos resultados se trasladan directamente a los usuarios de la fundición artesanal, para mejorar la calidad de las piezas fundidas artesanalmente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

Planteamiento del problema

La fundición artesanal en Guatemala adolece del soporte científico tecnológico necesario para mejorar la calidad de las piezas fundidas en el país, en tal sentido son necesarias investigaciones orientadas a proporcionar ese apoyo.

Descripción del problema

La calidad de las piezas fundidas artesanalmente y la maquinaria construida por los mismos procesos no responde a la demanda nacional, por lo tanto la contribución al valor agregado del producto interno bruto es muy baja. Las piezas fundidas artesanalmente de aluminio y aleaciones aluminio-cobre en la actualidad son de calidad no controlada, debido a la procedencia de la materia prima, por lo general chatarras y residuos metálicos

En general las fundiciones artesanales presentan defectos de proceso y no responden a las necesidades de resistencia mecánica que se solicitan, en tal sentido se hizo necesario investigar el efecto de las estructuras obtenidas sobre la dureza de cada estructura. A raíz de esto surgen las siguientes preguntas de investigación.

Pregunta central

¿Cómo se puede determinar la relación existente entre las estructuras de solidificación de piezas fundidas de aleaciones aluminio-cobre y sus propiedades de dureza?

Preguntas secundarias

1. ¿Cuáles son las diferencias de dureza entre lingotes de diferente composición química, colados bajo las mismas condiciones termodinámicas?
2. ¿Qué modificaciones se dan en las durezas debido al cambio de sobrecalentamiento de colada?
3. ¿Qué cambios y beneficios se producen en las durezas de las aleaciones en función de los cambios de las estructuras de solidificación?

OBJETIVOS

General

Determinar la relación entre las estructuras de solidificación de lingotes de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre fundidos artesanalmente y sus propiedades de dureza.

Específicos

1. Identificar las diferencias de dureza entre lingotes de diferente composición química, colados bajo las mismas condiciones termodinámicas.
2. Analizar las diferencias de dureza cuando se modifican los sobrecalentamientos de colada.
3. Determinar los cambios y beneficios producidos por las estructuras de solidificación en la propiedad de dureza.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación comprende un estudio del tipo experimental ya que se manipularon variables basadas en las características de la fundición artesanal, la cual está constituida por diferentes pasos: obtención de materia prima utilizando envases de aluminio, fundición de lingotes de aluminio de alta pureza, preparación de las aleaciones Al1%Cu, Al3%Cu, Al5%Cu y Al33%Cu, por medio de coladas en los respectivos moldes, cortes longitudinales de los lingotes, refrentado y pulido de las piezas para ensayo de dureza, ataque químico para revelación de estructuras de solidificación, observación y fotografía, con un enfoque mixto ya que se analizan variables cualitativas y cuantitativas, el tipo y alcance es de carácter descriptivo.

Los beneficiarios de esta investigación son las diferentes plantas de fundición artesanales en Guatemala, mejorando la calidad de sus productos a un menor costo.

La fase I comprendió la revisión documental y los antecedentes del tema en estudio, a modo de evidenciar los trabajos previos en cuanto a procesos de fundición artesanal en diferentes aleaciones tanto de aluminio como de aluminio-cobre, en la fase II se realizó la identificación de las diferencias de dureza entre lingotes de diferente composición química, colados bajo las mismas condiciones termodinámicas. La fase III la formó el análisis de las diferencias de dureza cuando se modifican los sobrecalentamientos de colada y, por último, la fase IV consistió en determinar los cambios y beneficios producidos por las estructuras de solidificación en la propiedad de dureza.

A partir de la presente investigación se dejaron resultados donde puede apreciarse que, tanto con el aluminio de alta pureza como con las aleaciones aluminio-cobre, existe una tendencia bien marcada en las características de las estructuras de solidificación, cuando la presión metalostática permanece constante, a depender de las variables termodinámicas que actúan durante la colada. Estas características, tanto metalográficas como de propiedades mecánicas, dependen básicamente de tres variables fundamentales que entran en juego, siendo la cantidad de soluto de la aleación, la temperatura de colada y los tipos de sustratos involucrados.

INTRODUCCIÓN

El reciclado de los desechos metálicos redundará en beneficio del medio ambiente y constituye una fuente de trabajo y desarrollo para los sistemas socioeconómicos del país. La fundición artesanal, que utiliza tales desechos como materia prima, es uno de los sectores más importantes bajo tales conceptos. Por consiguiente, el apoyo científico tecnológico que pueda darse a este sector contribuirá en grande a los beneficios referidos. La investigación posee características sistémicas, siendo una propuesta que mejora metodologías empleadas hoy en día para los procesos de fundición artesanal.

La fundición artesanal en Guatemala adolece del soporte científico-tecnológico necesario para mejorar la calidad de las piezas fundidas, en tal sentido son necesarias investigaciones orientadas a proporcionar este apoyo. La importancia de la metodología propuesta permite reorientar la práctica artesanal hacia la producción de elementos de maquinaria y equipos de mejores calidades, redundando en beneficio de los usuarios, y por consiguiente del país. Los beneficiarios, al considerar los resultados obtenidos en la presente investigación, serán las diferentes plantas dedicadas a la fundición artesanal, mejorando la calidad de sus productos a un menor costo.

Para la ejecución de la investigación se realizaron varios capítulos, a continuación se hace una breve descripción del contenido de cada uno: el capítulo uno se refiere al marco teórico, en el cual se describe la investigación documental y bibliográfica referente a los principios básicos de la fundición, así mismo los materiales empleados para el moldeo y los principios básicos del proceso de solidificación de metales y aleaciones.

En el capítulo dos se muestran los resultados obtenidos durante la experimentación de las probetas fundidas de aluminio de alta pureza y aleaciones de aluminio-cobre en diferentes composiciones. Se analizan las variables involucradas en el proceso como: composición química del metal o cantidad de soluto que incide directamente en las estructuras de solidificación, las variaciones de la temperatura de colada y los distintos sustratos del molde, así mismo la ejecución de ensayos metalográficos para la revelación de las diferentes estructuras de acuerdo a su composición química y la ejecución de ensayos de dureza por el método Brinell.

Para finalizar, en el capítulo tres se hace la discusión de resultados haciendo el análisis interno y externo de la investigación, comparando las estructuras de solidificación y las durezas de las diferentes probetas ensayadas.

La investigación fue realizada de forma satisfactoria, ya que se contó con todos los medios, materiales, equipos y documentación necesarios para proyectar el diseño de la metodología. Asimismo se obtuvo diferentes durezas de las probetas ensayadas en función de las variables mencionadas anteriormente, finalizando con la relación que existe entre las estructuras de solidificación y la dureza del metal.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Principios básicos de fundición

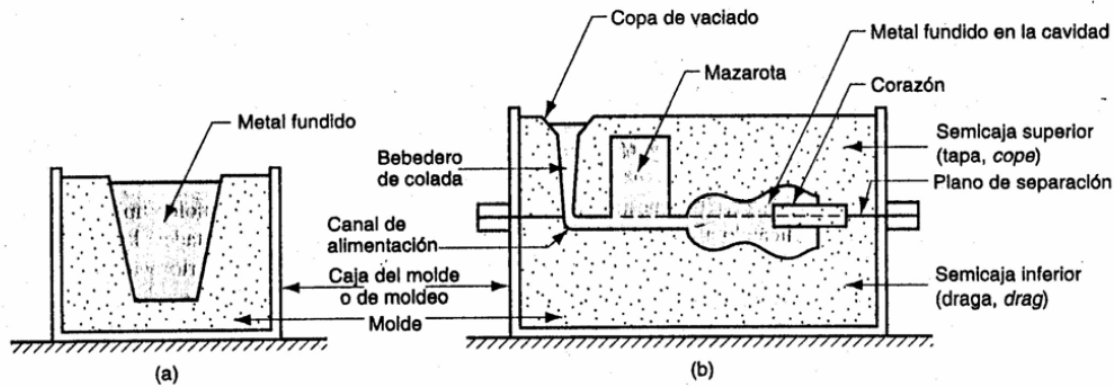
La fundición es un proceso mediante el cual un metal en estado líquido es obligado a llenar una cavidad previamente diseñada, hasta que se desarrolla el fenómeno de la solidificación reproduciendo la forma del molde que lo contiene.

Según Groover (1997):“la fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. El término lingote describe un fundido grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como rolado o forjado”. (p.195)

Según Aguilar (2011): “los resultados del proceso de fundición, tanto en las propiedades mecánicas, cuanto en las características metalográficas de las piezas obtenidas, dependen fundamentalmente del proceso de la solidificación, o sea de las características generales presentes durante el ciclo de la colada”.(p.75).

“La cavidad del molde proporciona la superficie externa de la fundición; de igual manera puede tener superficies internas, el cual es una forma colocada en el interior de la cavidad del molde para formar la geometría interior de la pieza”. (Groover, 1997, p.195)

Figura 1. **Dos formas de molde: (a) molde abierto, simplemente un recipiente con la forma de la parte de fundición; y (b) molde cerrado, de forma más compleja que requiere un sistema de vaciado conectado con la cavidad**



Fuente: Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna materiales, procesos y sistemas*.

El sistema de vaciado consiste típicamente en un bebedero de colada a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal.

Algunas copas de colada se diseñan en forma de tazón con un canal abierto que conduce al bebedero de colada. Tan pronto como el material fundido en el molde empieza a enfriarse, empieza la solidificación.

Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición. (Groover, 1997, p.198)

1.1.1. Variables que afectan el proceso de colada

Las variables más importantes del proceso de colada son: el sobrecalentamiento, la presión metalostática y el sustrato, o sea el material del molde.

1.1.1.1. Calentamiento del metal

Se usan varias clases de hornos para calentar el metal. La energía calorífica requerida es la suma de: 1) temperatura de fusión, 2) calor latente de fusión, y 3) temperatura de colada.

Según Groover (1997, p.99), esto se puede expresar como:

$$H = \rho V (C_s (T_m - T_0) + H_f + C_t (T_p - T_m)) \quad (1)$$

Donde:

H= calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión (J).

ρ = densidad (Kg/m³).

C_s = calor específico en peso para el material sólido (J/Kg °C).

T_m = temperatura de fusión del metal (°C).

T_0 = temperatura inicial, generalmente la ambiente (°C).

H_f = calor de fusión (J/Kg).

C_t = calor específico en peso del metal líquido (J/Kg°C).

T_p = temperatura de vaciado (°C).

V = volumen del metal que se calienta (m³).

1.1.1.2. Vertido del metal fundido

El metal en estado líquido se cuela dentro del molde, llenando las cavidades y formas de este. Para que este paso tenga éxito, el metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde.

Aquí juega un papel importante la colabilidad y la fluidez, con el control de las variables que las definen.

1.1.1.3. Análisis de ingeniería del vaciado o colada

El teorema de Bernoulli establece los principios básicos del movimiento del fluido, a través de la siguiente relación:

$$h_1 + \frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (2)$$

Donde:

h = altura (m)

P = presión en el líquido (N/m²)

ρ = densidad (Kg/m³)

v = velocidad de flujo en (m/seg)

g = constante de la aceleración gravitacional (9.81 m/seg²);

F = pérdidas de carga debidas a la fricción (metros).

Los subíndices 1 y 2 indican los dos puntos cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción y se asume que el sistema permanece a presión atmosférica en toda su extensión, entonces la ecuación puede reducirse a:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

Si se asume la altura del molde como punto de referencia, la ecuación se simplifica a:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (4)$$

Que se puede resolver para la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Donde:

v = velocidad del metal líquido en la base del bebedero de colada (m/seg)

g = 9.81 m/seg²

h = altura del bebedero (m)

La ley de continuidad establece que la velocidad volumétrica del flujo permanece constante a través del líquido:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (6)$$

Donde:

Q = velocidad de flujo volumétrico (m³/seg);

v = velocidad (m/seg);

A = área de la sección transversal del líquido (m²)

El tiempo requerido para llenado queda definido por:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

Donde:

T_{MF} = tiempo de llenado del molde seg. (s)

V = volumen de la cavidad del molde (m³)

Q = velocidad volumétrica de flujo (m³/seg)

1.1.2. Materiales empleados para el moldeo

“Para la construcción de los moldes se utilizan arenas arcillosas o barro, sirviendo estos moldes solo para una vez: se les llama moldes perdidos y se les destruye una vez efectuada la fundición.” (Biedermann y Hassekief, 1957, p.19)

1.1.2.1. Propiedades que deben reunir los materiales del moldeo

Según Biedermann y Hassekief (1957), “las propiedades que deben reunir las arenas que se emplean para el moldeo tienen que ser: plasticidad, consistencia, resistencia y permeabilidad”. (p.19)

La resistencia en seco del molde no debe ser demasiado elevada, lo que impediría la contracción de la pieza, provocando roturas.

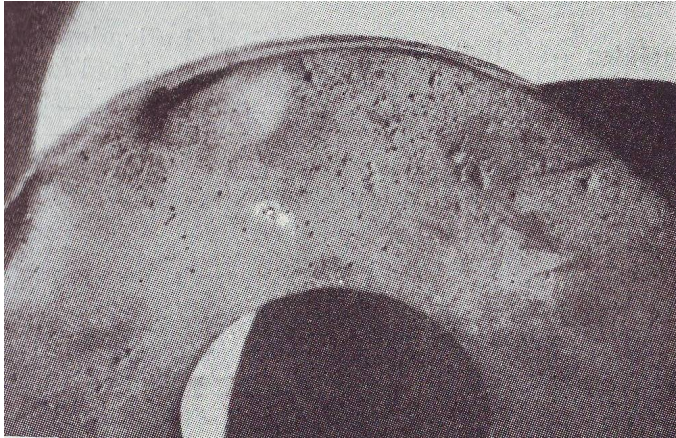
Figura 2. **Defecto provocado por una resistencia insuficiente del molde en seco y en caliente**



Fuente: Biederman, A. y Hassekief, L. (1955). *Fundición del hierro y del acero*.

“Los moldes tienen que ser porosos, es decir, poseer una permeabilidad suficiente para dejar escapar los gases que se generan durante la colada, si estos gases no tienen salida a través del molde, pueden destruirlo y hasta provocar daños personales”. (Biedermann y Hassekief, 1957, p.20)

Figura 3. **Defectos causados por una permeabilidad insuficiente del molde de arena verde**



Fuente: Biederman, A. y Hassekief, L. (1955). *Fundición del hierro y del acero*.

Los materiales para los moldes tienen que ser refractarios, es decir, capaces de soportar las altas temperaturas de la fundición y de enfriamiento lento.

1.1.2.2. Clasificación del proceso de fundición

Los procesos de fundición se clasifican de acuerdo al tipo de moldes utilizados, esto es:

- Moldes de arena: arena sílica o arena verde (por el color cuando está húmeda). El procedimiento consiste en el recubrimiento de un modelo con arena húmeda y dejar que seque hasta que adquiera dureza.

- Moldes de capa seca: consiste en que alrededor del modelo se coloca arena con un compuesto que al secar hace más dura a la arena (almidón, linaza, agua de melaza, etc.).
- Moldes con arena seca. Se hacen con arena verde, pero se mezcla un aditivo como el que se utiliza en el moldeo anterior, el que endurece a la arena cuando se seca.(Reyes y Medina, 2005, págs. 95-96)

De igual forma se utilizan moldes de arcilla, moldes furánicos y otros.

1.1.2.3. Preparación de los materiales empleados para el moldeo

"Dicha preparación consiste en pulverizar, tamizar, mezclar, etc., y puede efectuarse a mano o mecánicamente, por máquinas automáticas". (Biedermann y Hassekieff, 1957, p.22).

1.1.3. La colabilidad de los metales y aleaciones

La colabilidad de los metales no es más que la capacidad de los mismos de llenar los moldes sobre los que se vierte el metal líquido, sin producir ningún tipo de defectos ni discontinuidades en las piezas obtenidas por el proceso. (Aguilar, 2011, p.44).

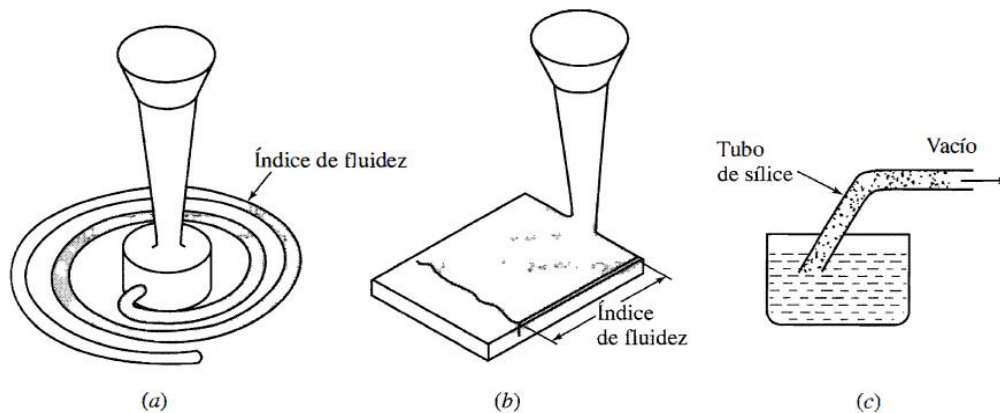
"La principal variable que define la colabilidad es fluidez, que depende de: el coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, la presión metalostática, el sobrecalentamiento, la composición química y el modo de solidificación."(López y Aguilar, 2013, p.32)

1.1.4. El concepto de la fluidez

Según Aguilar (2011):“la fluidez es un parámetro ingenieril que se mide en función de la longitud que un metal líquido es capaz de alcanzar antes de que se inicie la solidificación.” (p. 8)

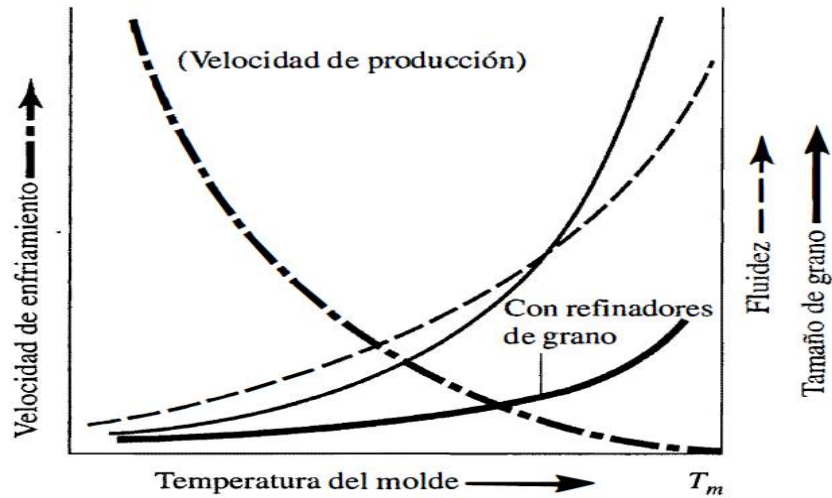
Por otro lado, Schey(2002) indica que “la fluidez se incrementa con el aumento del sobrecalentamiento, porque este baja la viscosidad y retrasa la solidificación.” (p.196)

Figura 4. **La fluidez colada en (a) molde espiral (b) molde en forma de placa (c) extrayendo vacío**



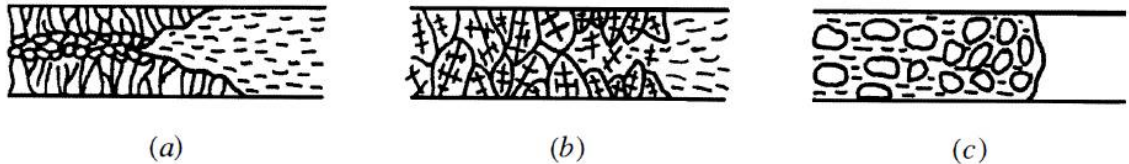
Fuente: Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*.

Figura 5. **La temperatura del molde en la determinación de las velocidades de producción y de las propiedades mecánicas**



Fuente: Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*.

Figura 6. **Cuando una fusión solidifica, se (a) mantiene abierta más tiempo con la solidificación frontal de los metales puros y de los eutécticos que con (b) la solidificación dendrítica, o (c) los escombros de los cristales obstruyen el flujo**



Fuente: Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*.

1.2. Principios básicos de solidificación

Según Aguilar-Rivas (2012)“la solidificación de los metales tiene una interpretación muy compleja, que depende, entre otras variables, de su pureza, o bien, en el caso de las aleaciones, del grado de concentración de soluto” (p.141)

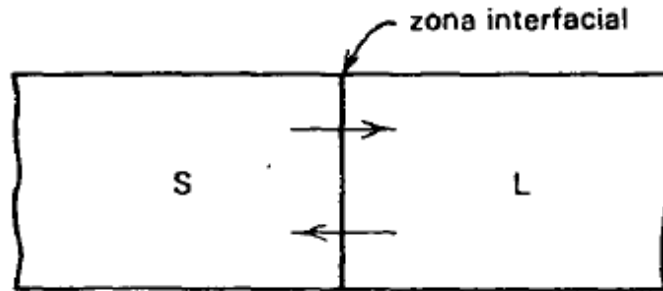
1.2.1. La solidificación de los metales puros

Una vez que se forma un núcleo de sólido en un metal en proceso de enfriamiento, la transformación se completa a menudo por crecimiento de este núcleo sólido y no por nucleación posterior. Se considerarán ahora varios aspectos del crecimiento del metal en proceso de solidificación.(Verhoeven, 1987, p.258)

1.2.1.1. Cinéticas de los procesos atómicos en la interfase sólido-líquido

“Considérese una interfase sólido-líquido en movimiento, como se muestra en la figura 7. Puede imaginarse que ocurren dos procesos atómicos en esta interfase.” (Verhoeven, 1987, p.258)

Figura 7. **Las reacciones atómicas en la interfase sólido-líquido**

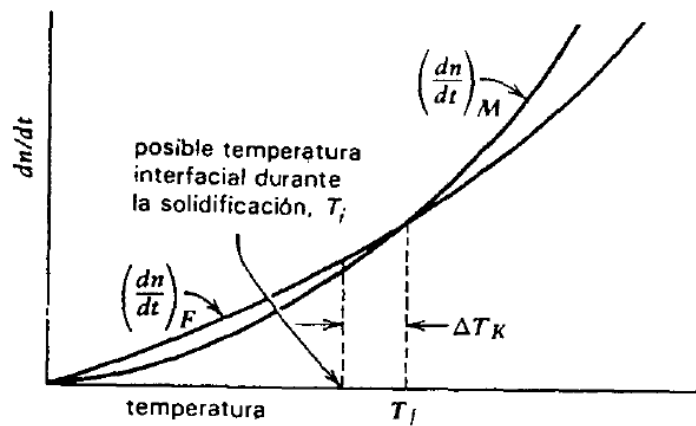


Fuente: Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*.

Átomo en el sólido \rightleftarrows átomo en el líquido: reacción de fusión

Átomo en el líquido \rightleftarrows átomo en el sólido: reacción de solidificación

Figura 8. **La dependencia de las temperaturas de las velocidades de fusión y solidificación**



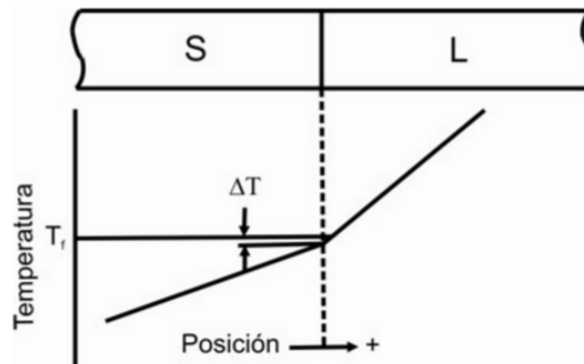
Fuente: Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*.

1.2.1.2. Distribución de temperaturas en la interfase sólido-líquido

“El perfil de temperaturas en la interfase sólido-líquido es un factor importante en el control de la forma de la interfase. Por lo tanto, es útil hacer una distinción clara entre dos tipos de perfiles.”(Verhoeven, 1987, p.260)

- “Gradiente positivo. Considérese una barra de metal que solidifica en las condiciones de flujo de calor unidireccional. Generalmente, la temperatura del líquido es más alta que la del sólido, ver figura 9.” (Verhoeven, 1987, p.260)

Figura 9. **El gradiente de temperatura positivo en una interfase sólido-líquido**



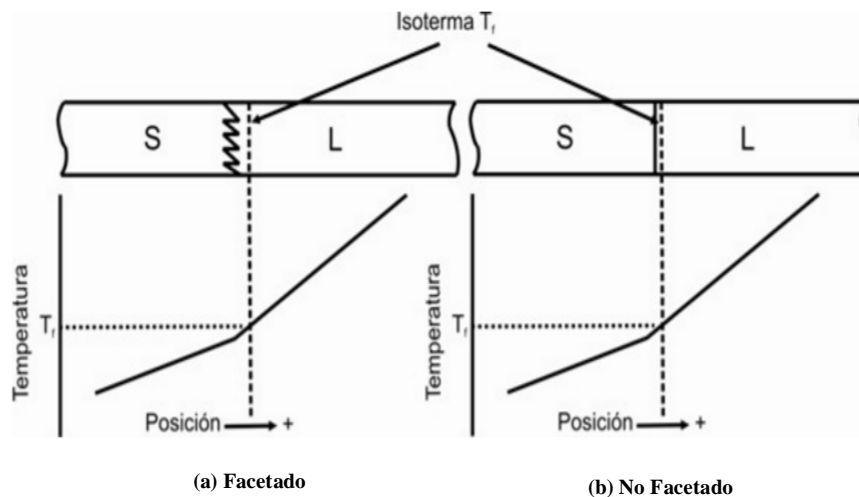
Fuente: Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*.

1.2.1.3. Morfología de la interfase (forma)

El tema de la forma de la interfase se dividirá en dos secciones, dependiendo del tipo de gradiente de temperatura en el líquido de la interfase.

- “Gradiente positivo. Se observan dos tipos distintos de interfases, los cuales se muestran en la figura 10.” (Verhoeven, 1987, p.261)

Figura 10. **Las dos morfologías de interfase observadas en metales puros con gradiente positivo: a) la interfase facetada; b) la interfase no facetada o planar**



Fuente: Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*.

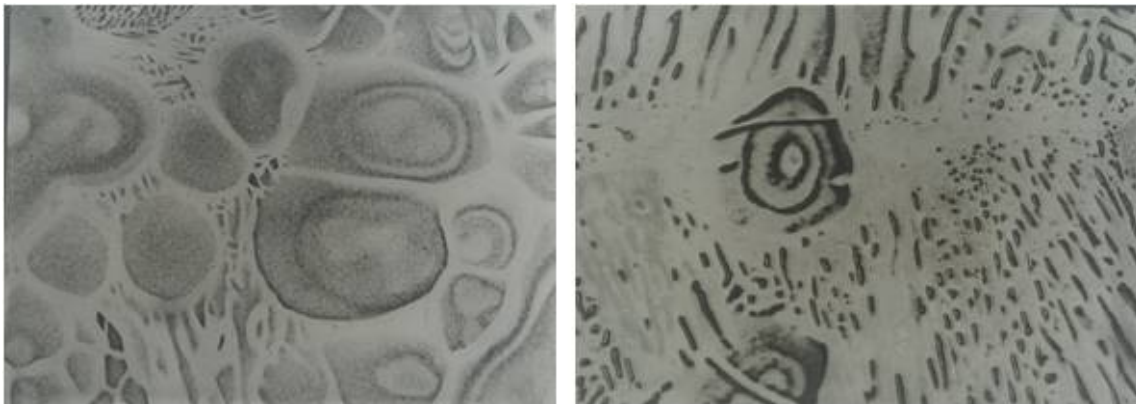
1.2.1.4. Velocidad de interfase controlada por flujo térmico

“La situación de la isoterma de la temperatura de solidificación se controla por las condiciones de transferencia de calor del sistema. Consiguientemente, la velocidad de solidificación se controla por el flujo térmico.”(Verhoeven,1987, p.265).

1.2.2. La solidificación de las aleaciones

“Cuando una aleación solidifica, el sólido que se forma generalmente tiene una composición diferente a la del líquido del cual está solidificando. Esta redistribución del soluto producida por solidificación se denomina frecuentemente segregación.”(Verhoeven, 1987, p.265)

Figura 11. Segregación en una probeta de fluidez de aluminio al 99.99%



Fuente: Aguilar, R. (2011). *Solidificación de metales y aleaciones y el mecanismo de cierre de vena fluida durante los ensayos de fluidez.*

1.2.2.1. Solidificación de equilibrio

“Se define como la producida en cristales donde la longitud del cristal que crece es mucho menor que el producto del coeficiente de difusividad del soluto, además supone que hay difusión completa tanto en líquido como en sólido.” (Verhoeven, 1987, p.266)

1.2.2.2. Solidificación de no equilibrio

“Este fenómeno sucede cuando hay enfriamientos bruscos en una aleación a alta temperatura, ocasionando que la difusión de un metal en otro no sea uniforme, generando una segregación sin equilibrio durante la transición de su estado líquido a sólido.”(Verhoeven, 1987, p.267)

1.2.2.3. Fusión de zona

La fusión de zona es un método extremadamente efectivo para la eliminación de elementos de impurezas que en la mayoría de los casos son indeseables. Sin embargo, es importante que el resultado de dicho método esté sujeto a restricciones específicas que limitan un proceso particular de solidificación normal. En la práctica este proceso tiene pocas aplicaciones.

1.2.2.4. Mezcla en el líquido

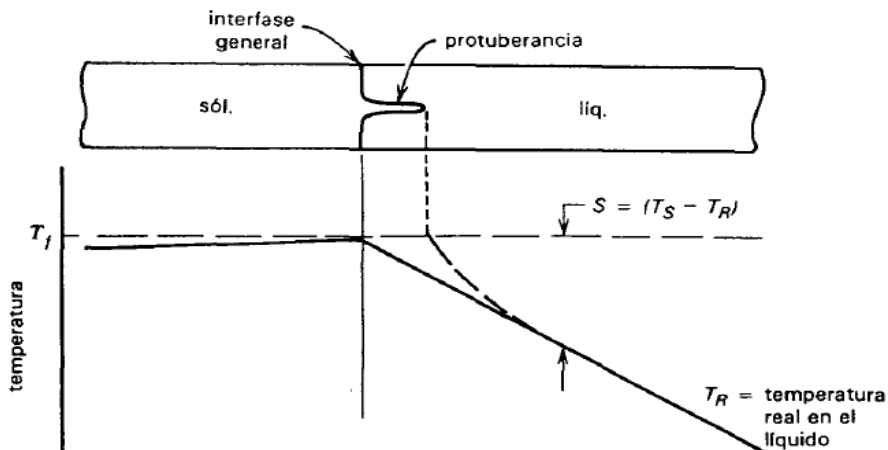
Según Verhoeven (1987) “las corrientes de convección en la fracción de líquido de una aleación que solidifica tenderán a producir una composición uniforme del líquido.” (p.272)

“La convección natural es muy difícil de eliminar de las aleaciones metálicas líquidas debido a su baja viscosidad y alta densidad, así que se podría esperar que se obtuviera generalmente una composición uniforme del líquido.” (Verhoeven, 1987, p.272)

1.2.2.5. Forma de la interfase

En los metales puros que solidifican bajo un gradiente negativo de temperatura, la interfase plana se vuelve inestable y se forman dendritas. Para comprender por qué es inestable la interfase, considere lo que sucede cuando se forma una pequeña ampolla sobre la superficie. (Verhoeven, 1987, p.278).

Figura 12. **Efecto de la formación de una ampolla sobre la interfase en el perfil de temperatura para el caso de solidificación con un gradiente negativo en un metal puro**



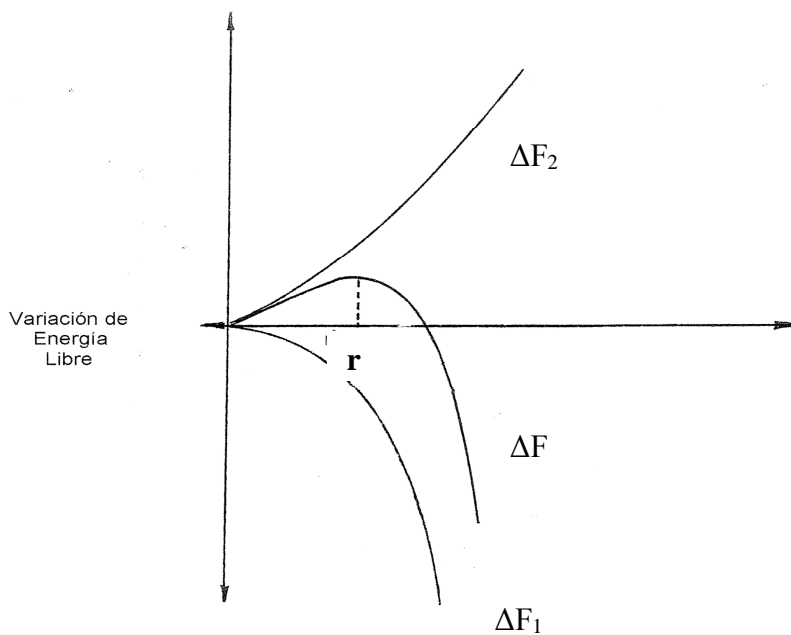
Fuente: Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*.

1.2.3. El fenómeno de la nucleación

Se define como nucleación, durante el proceso de solidificación, a la formación de pequeños cristales dentro del seno líquido y que eventualmente pueden desarrollarse y crecer. A temperaturas inmediatamente inferiores a la temperatura de fusión, el paso de átomos de la fase líquida a la sólida disminuye la energía del sistema.(Aguilar, 2012, p.141).

Sin embargo, la solidificación no comienza espontáneamente, es necesario primero crear una interface sólido líquido que exige un aumento de energía del sistema:

Figura 13. **Energía libre de formación de un núcleo como función de su radio**

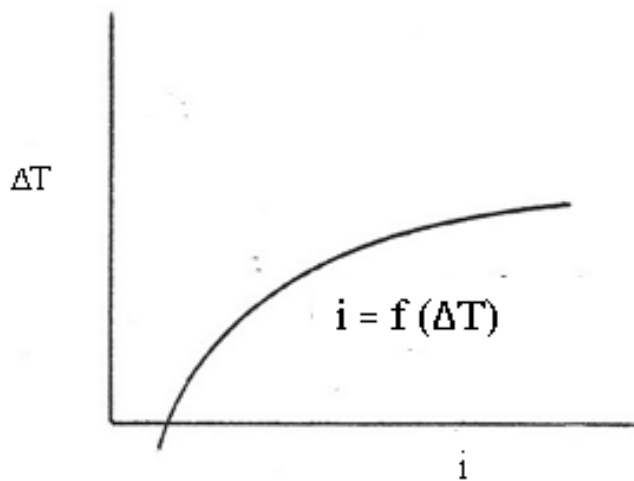


Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

Núcleos de radio mayor que r^* tenderán a crecer espontáneamente, ya que de esta manera se disminuye la energía del sistema. De igual forma, aquellos cuyo radio sea menor que r^* se disolverán.

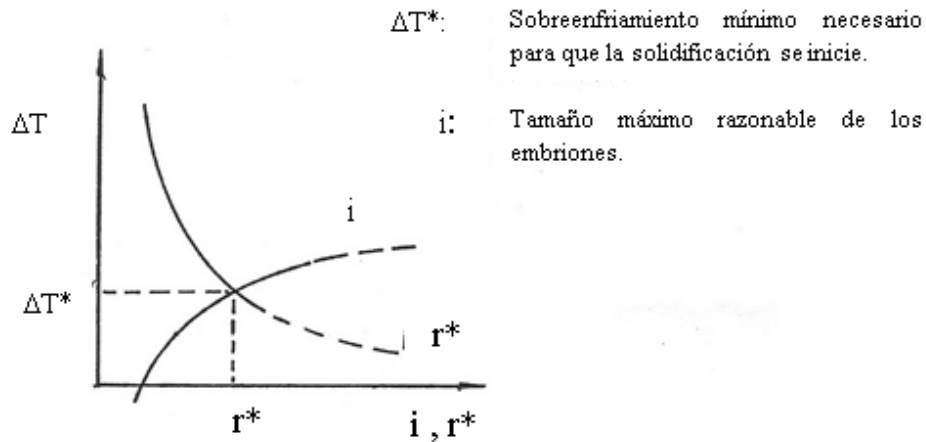
Por otro lado, los metales líquidos están constituidos por pequeños agrupamientos atómicos con estructura semejante a la del estado sólido. A estos agrupamientos se les denomina “embriones”. Esto se puede apreciar en la figura 14, en donde se ha relacionado “ i ”, tamaño de embriones, con la temperatura en función del sobreenfriamiento. (Aguilar, 2012, págs. 142 y 145)

Figura 14. **Tamaño de embriones, con la temperatura en función del sobreenfriamiento**



Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

Figura 15. **Ilustración de la temperatura de nucleación homogénea en un punto en donde el radio crítico es igual al radio del aglomerado de tamaño máximo**



Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

Esta nucleación que ocurre en el seno del líquido a expensas del sobreenfriamiento. En la realidad, sucede un tipo de nucleación denominada “heterogénea” y que se produce a partir del líquido en contacto con las paredes del recipiente que lo contiene, o sobre partículas extrañas. (Aguilar, 2012, p.147)

1.2.4. Las estructuras de solidificación

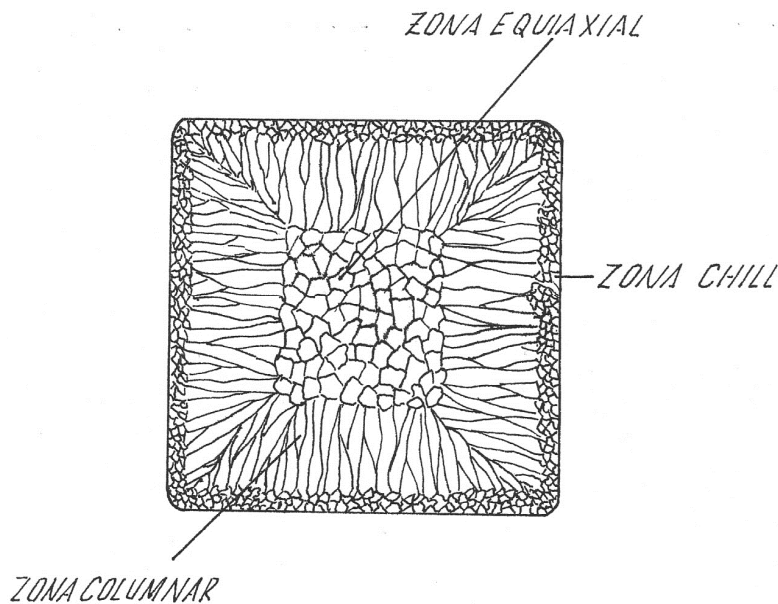
“Las estructuras de solidificación de las piezas fundidas son de gran importancia, ya que de ellas depende, en gran parte, su comportamiento y resistencia mecánica a las sollicitaciones a que se les somete. (Aguilar, 2012, p.155). En general, los productos obtenidos por el proceso de fundición pueden concentrarse en dos grandes grupos:

- Aquellas piezas cuya forma final queda de una vez definida durante el proceso, y las que en su gran mayoría no sufren ningún tipo de modificación mecánica y/o por tratamiento térmico en sus características normales.
- Lingotes que son sometidos a proceso mecánicos posteriores, tales como laminación, extrusión, forja, etc.

1.2.4.1. Macroestructura de los lingotes

Los lingotes metálicos presentan en su estructura granular tres zonas bien definidas (como se puede apreciar en la figura 16), cuyas características son las siguientes:

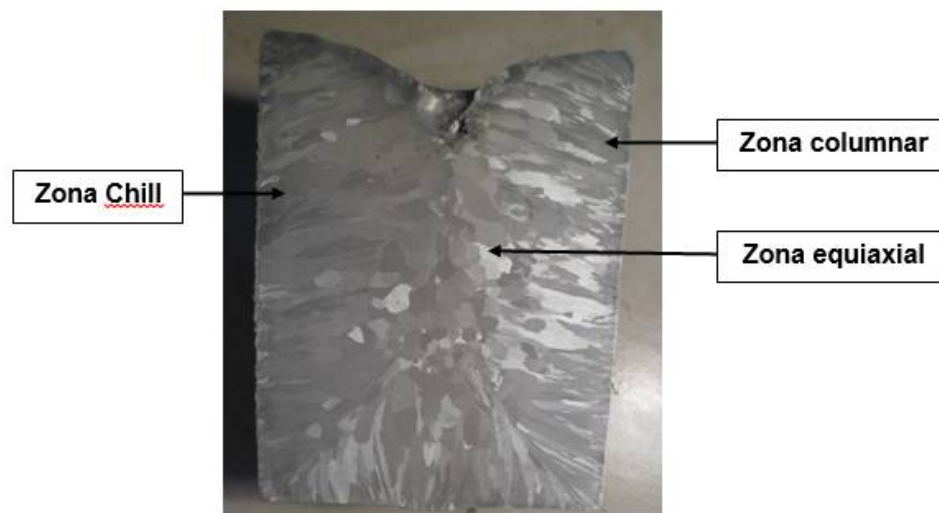
Figura 16. **Zonas de una estructura granular**



Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

- Zona *chillo* acoquillada: son los granos finos equiaxiales que solidifican en la superficie y en la zona cercana a la misma.

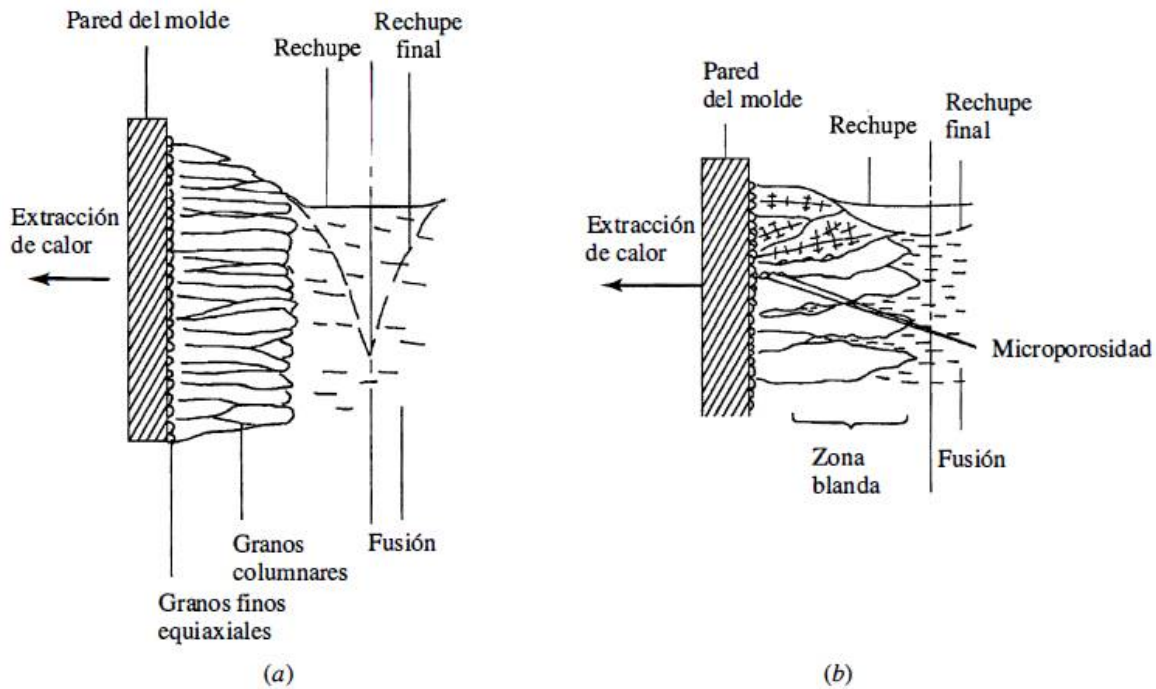
Figura 17. **Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento en molde de grafito**



Fuente: elaboración propia.

- Zona columnar: está formada por granos que se originan en la superficie del molde, o cerca del mismo, y que crecen hacia el interior.

Figura 18. **La solidificación procede (a) con el crecimiento de granos columnares en los metales puros, pero (b) con el crecimiento de dendritas en las soluciones sólidas**



Fuente: Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*.

- Zona equiaxial: está constituida por una cantidad de granos, cuyas superficies geométricas son equidistantes entre sí. Su forma es similar a la de los granos de la zona *chill*, pero de mayor tamaño.

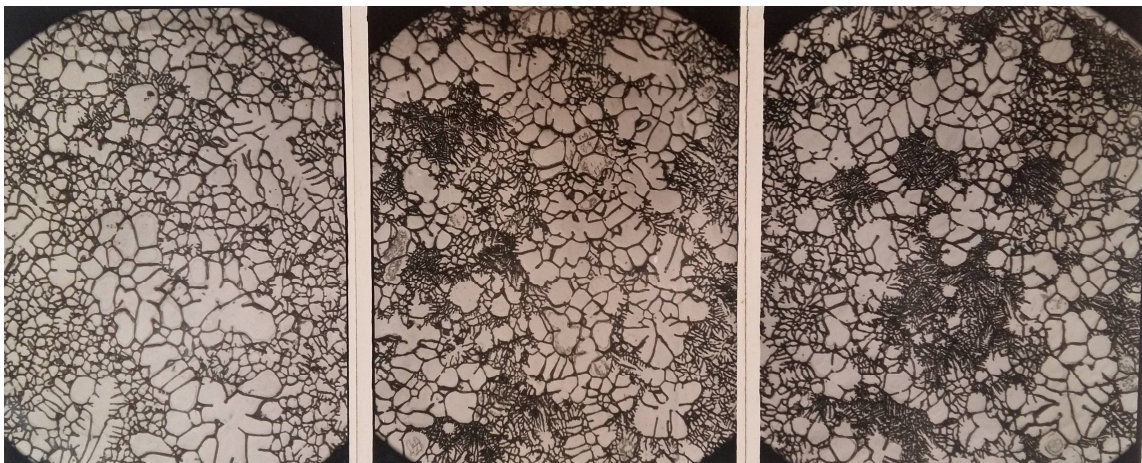
Las zonas predendríticas constituyen los primeros puntos de nucleación y crecimiento del sólido y toman en general una forma hemisférica que, a partir de cierto punto, da origen a una estructura celular o celular dendrítica.

Estas predendritas son cristales que aún no presentan las ramas y la estructura arborescente orientada según ejes cristalográficos que caracteriza a las dendritas, sin embargo, la observación metalográfica permite apreciar cómo a partir de estas zonas se origina el crecimiento dendrítico que puede generar cristales en cualquiera de las tres zonas de los lingotes. (Aguilar, 2012, p.160)

En general, el análisis de la estructura de los lingotes permite observar que las predendritas o zonas iniciales, como también se les conoce, crecen en el seno del líquido siendo su origen cualquiera de los siguientes:

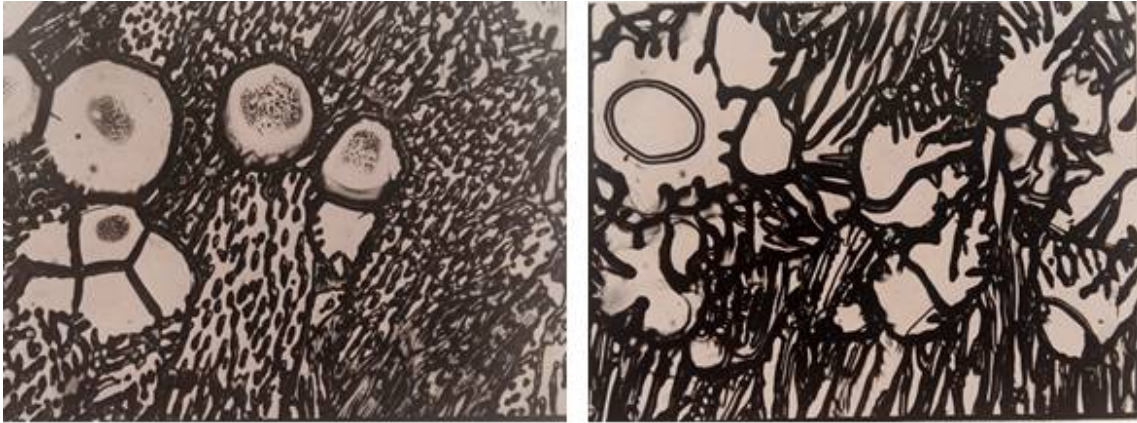
- Cristales nucleados durante la colada, en o cerca de las paredes de la lingotera o molde.
- Ramas rotas o cabezas de dendritas.
- Cristales nucleados en la superficie libre de lingotes colados, que se enfrían lentamente en contacto con el aire y que luego se hunden en el líquido.

Figura 19. **Fenómeno de la multiplicación por efecto de la convección forzada en una probeta de fluidez de aluminio 2 % cobre. 60X**



Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

Figura 20. **Zonas iniciales de aluminio 0.5 % cobre. 200X**



Fuente: Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia*.

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

2.1. Determinar la relación entre las estructuras de solidificación y las durezas de las aleaciones coladas bajo las mismas condiciones termodinámicas

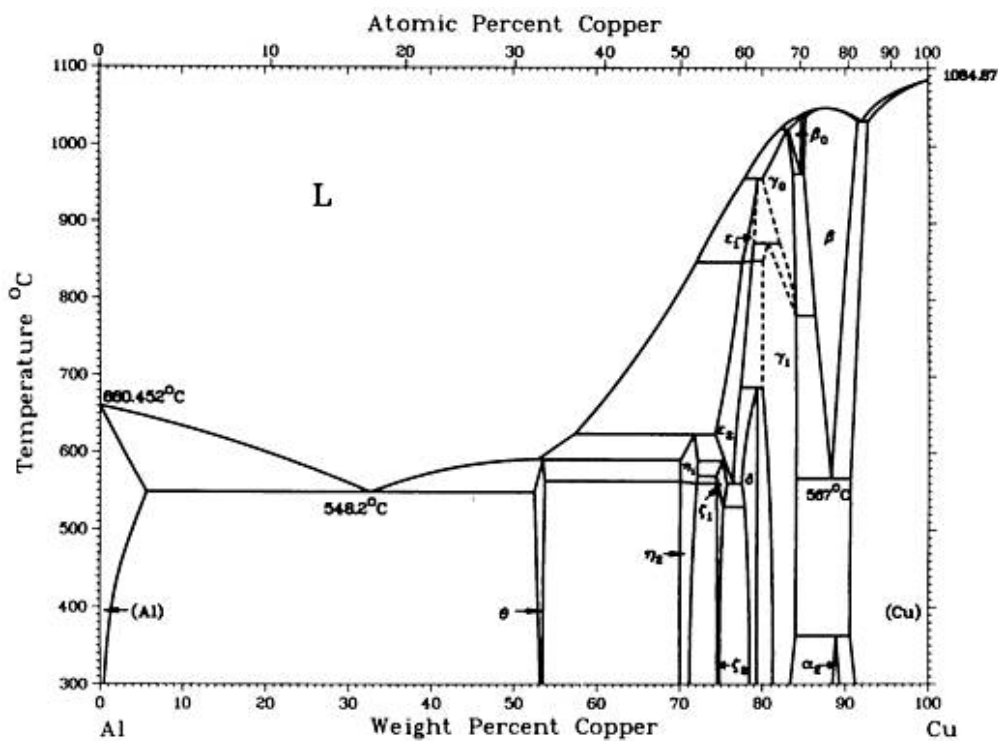
De acuerdo a los objetivos planteados para la ejecución del presente trabajo, se analizan las características estructurales resultantes de la fundición de probetas (lingotes) de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre con tenores de 1, 3, 5 y 33 % de cobre a 75 y 150 °C de sobrecalentamiento, a partir de su temperatura de fusión calculada en el diagrama aluminio-cobre (figura 21), simulando las características de la fundición artesanal, determinando el cambio de las estructuras de solidificación, preliminarmente observando el efecto producido por los tenores crecientes de soluto desde el metal de alta pureza y posteriormente el efecto de los cambios de sustrato y su relación con el coeficiente de transferencia calórica de la interfaz metal-molde.

Para el desarrollo del proceso experimental se definió la metodología de investigación, similar a la definida previamente dentro del Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, desarrollado inicialmente por López y Rivas(2013, p. 68-80), mediante la realización de los procesos siguientes:

- Obtención de materia prima.
- Fundición de la materia prima y preparación de las aleaciones definidas.
- Colada artesanal en distintas lingoteras.

- Corte de las probetas de forma longitudinal y transversal, según la necesidad de análisis.
- Refrentado de los cortes en las caras seleccionadas.
- Preparación de las probetas para el análisis metalográfico: pulido de las probetas hasta papel esmeril 600.
- Ataque químico para revelación de estructuras.
- Observación macroscópica de resultados estructurales.

Figura 21. **Diagrama de equilibrio aluminio-cobre**



Fuente: Alloy Phase Diagrams. *Metals handbook*. Volume 3.

2.1.1. Estructuras resultantes de solidificación

Los siguientes resultados representan las características más significativas de las estructuras resultantes, obtenidas por el proceso de fundición artesanal, para lo cual fue necesario colar varias probetas en los diferentes sustratos y a diferentes temperaturas de sobrecalentamiento.

2.1.1.1. Estructuras del aluminio de alta pureza

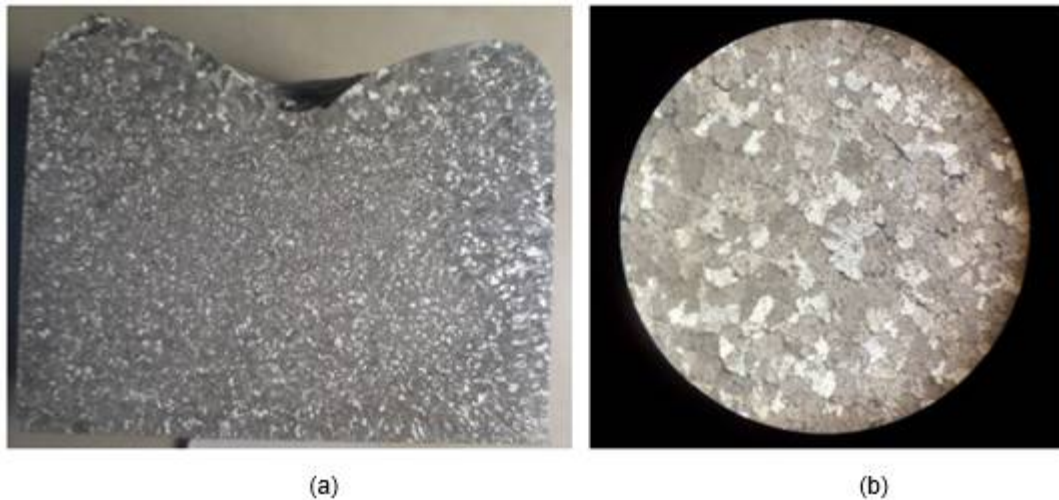
Las muestras fueron observadas en microscopio estereoscópico, lo que permitió la obtención de una mejor visibilidad de la de la macroestructura de los lingotes estudiados a diferentes aumentos.

- Lingote número 1

En la figura 22 se puede apreciar claramente la formación casi total de granos equiaxiales, con escasa presencia de zona columnar con granos de mayor tamaño en toda la periferia del lingote. Conforme se va acercando al centro el tamaño de grano va disminuyendo, posiblemente debido a nucleación copiosa dentro de un líquido sobreenfriado. La zona *chill*, difícil de apreciar a simple vista, ocupa todas las zonas en contacto con el molde, terminando cerca de los vértices del rechupe.

Este lingote fue colado en una lingotera de tubo de acero de bajo carbono, con un corte longitudinal. La fotografía se enfocó a una distancia de 20 centímetros. Estos resultados son producidos por la alta velocidad de extracción de calor, debida al tipo de material de la lingotera.

Figura 22. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo acero de bajo carbono (TBC) b)Macroestructura amplificada a 20X**

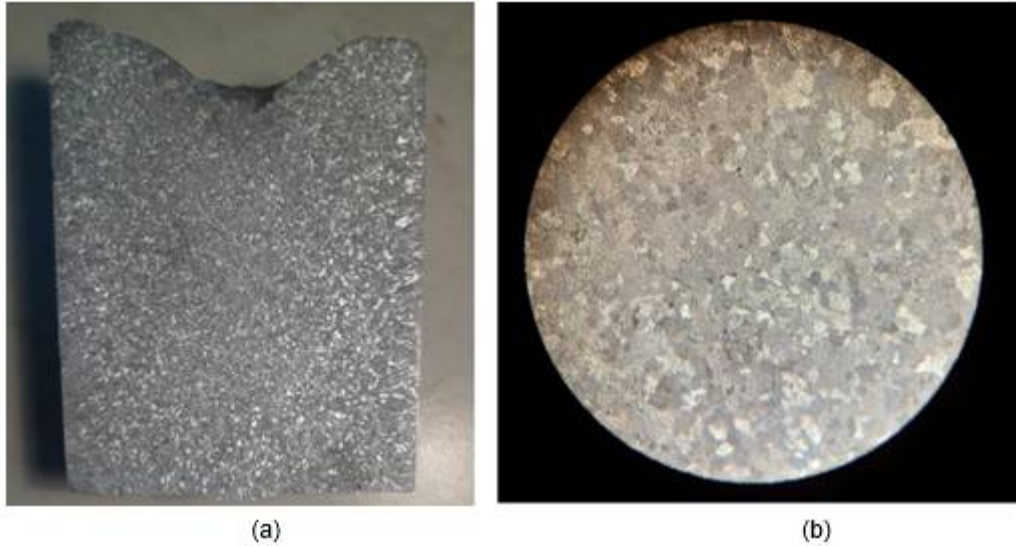


Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 2

En la figura 23 se puede apreciar una formación leve de zona columnar en los alrededores, seguidamente se puede observar un crecimiento equiaxial copioso, debido al rápido enfriamiento; no se aprecia la zona *chill*. El lingote fue colado en una lingotera de acero de medio carbono. Se fotografió la macroestructura del lingote a una distancia de 20 centímetros, la otra fue captada con un microscopio estereoscópico con un aumento de 20X.

Figura 23. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

- **Lingote número 3**

En la figura 24 se puede observar en primera instancia que el repuche es menor, debido a la transferencia calórica lenta, así mismo la formación en todo el lingote de una zona casi completamente equiaxial, con ciertas sopladuras provocadas por la extracción de los gases debido al tipo de molde. Es posible observar que el tamaño de grano es proporcional en toda la estructura de solidificación.

El lingote fue colado en molde de arena, a una presión metalostática constante. Se fotografió la macroestructura del lingote a una distancia de 20 centímetros, la otra fue captada con un microscopio estereoscópico con un aumento de 20X.

Figura 24. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza, a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 4

En la figura 25 se pueden observar las tres zonas bien marcadas, en primera instancia una fina capa de la zona *chill*, seguida de la zona columnar que crece a expensas de la primera, hacia adentro del lingote, en dirección opuesta a la dirección de extracción calórica.

En la parte central se observa claramente la formación de granos equiaxiales producto del sobreenfriamiento, es decir en donde el pozo se mantiene líquido, en función de este sobreenfriamiento sucede la nucleación de la zona denominada equiaxial. Este lingote fue colado en una lingotera de grafito, a una presión metalostática constante, la fotografía se enfocó a una altura 20 centímetros. Estos resultados son producidos por una velocidad de extracción calórica moderada, debida al tipo de material de la lingotera.

Figura 25. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito b) Macroestructura ampliificada a 20X**



(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 5

En la figura 26 se puede observar, al igual que en el lingote número cuatro, tanto la zona columnar como la equiaxial bien definidas, de igual manera una zona *chill* muy fina, debido a un enfriamiento brusco por el contacto del metal fundido con la pared del molde. Se puede observar mayor presencia de granos columnares debido a una transferencia calórica controlada y granos equiaxiales de diversos tamaños. Este lingote fue colado en lingotera de acero de medio carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C.

Figura 26. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



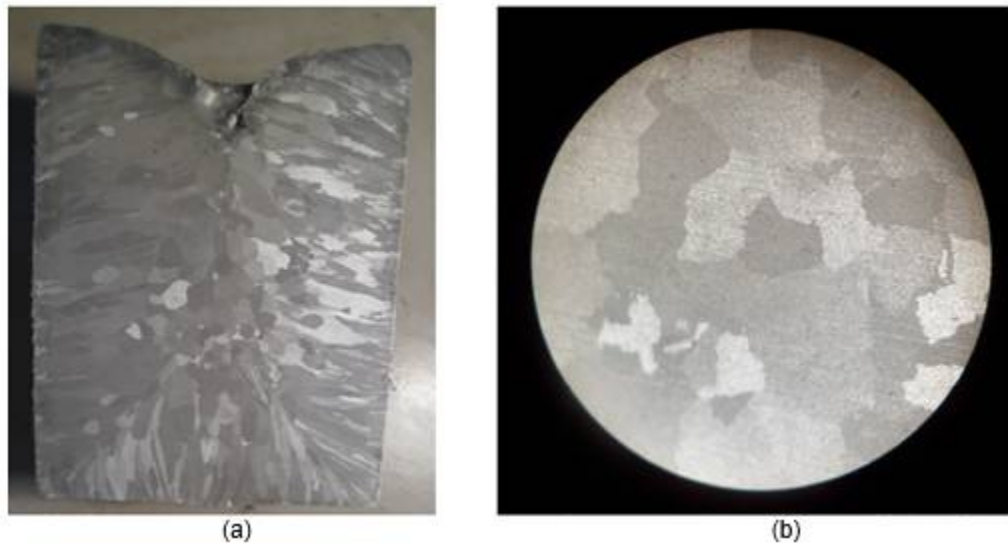
(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 6

En la figura 27 se puede observar en primera instancia la formación de un rechufe de tamaño considerable debido a la contracción y al efecto de la lenta velocidad de extracción calórica durante la solidificación. El crecimiento columnar en este lingote es bastante amplio, predominando en la mayoría de la superficie revelada. Se aprecia un leve núcleo de granos equiaxiales muy hacia el centro y una zona *chill* poco diferenciable no visible. El lingote obtenido fue colado en molde de grafito a una temperatura de sobrecalentamiento de 150°C y fotografiado a una distancia de aproximadamente 20 centímetros.

Figura 27. **a) Macroestructura de un lingote de aluminio de alta pureza a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura ampliada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

2.1.1.2. Estructuras de las aleaciones de aluminio-cobre

Las aleaciones que contienen 4 a 5 por ciento de cobre, con trazas de hierro y las impurezas habituales de silicio y algunas veces con pequeñas cantidades de magnesio, son tratables térmicamente y pueden soportar altos esfuerzos a la vez que manifiestan cierta mejora en la ductilidad. Las aleaciones aluminio-cobre son aleaciones monofásicas. Cuando estas aleaciones y otras aleaciones monofásicas se hacen en moldes permanentes o por medio de otros métodos rígidos de colada, se requieren técnicas especiales para aliviar las tensiones de solidificación. (López, 2013, p.97)

Durante la fundición de estas aleaciones se hace necesaria la aplicación de técnicas especiales durante el vaciado, para promover el progreso de la solidificación del metal de las zonas remotas de la fundición a las zonas más calientes de la misma, y también a las más líquidas en los tubos de ventilación y luego en los alimentadores verticales.

Cuando se utilizan estas técnicas de fundición necesaria y más exigente, las aleaciones aluminio-cobre han sido utilizadas con éxito para producir piezas de fundición de alta resistencia y alta ductilidad. Técnicas más estrictas de fundición también son útiles y necesarias al tener otros sistemas de aleaciones monofásicas o aleaciones de aluminio. (López, 2013, p.98)

Para la obtención de aleaciones de aluminio y 1 % cobre se pesaron las proporciones adecuadas de cada uno de los elementos en cuestión, es decir 1 % de cobre en peso y 99% de aluminio en peso, para luego ser fundidos dentro del mismo crisol a diferentes temperaturas de sobrecalentamiento.

Para la revelación de las macroestructuras, tanto de aluminio de alta pureza como aleaciones aluminio-cobre, se utilizaron las tablas I y II, realizando diferentes pruebas y en algunos casos aumentando la proporción de las mismas según el tipo de aleación para poder visualizar las estructuras resultantes de solidificación.

Tabla I. **Reactivos utilizados para la revelación de estructuras a nivel macroscópico**

| No. | Reactivo | Fórmula | Aplicación |
|-----|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Reactivo caustico | 10 g de NaOH disueltos en 90 ml de H ₂ O | Sumerja el espécimen de 5 a 15 minutos en la solución calentándola de 60 a 70 °C, lavar con agua, untar con una solución de 50% de HNO ₃ para quitar suciedades, lavar con agua y secar |
| 2 | Reactivo de <i>tucker</i> | 45 ml de HCl(concentrado), 15 ml de HNO ₃ (concentrado), 15 ml de HF (48%), 25 ml de H ₂ O | Mezclar antes de usar (fresco), sumerja o unte el espécimen por 10 o 15 segundos, lavar con agua tibia, secar y examinar para los resultados deseados. Repetir el proceso hasta obtener los resultados esperados |
| 3 | | 1 ml de HF (48%), 9 ml de H ₂ O | Esto requiere que se unte rápidamente sobre la superficie. Sumergir si el resultado no es el deseado, lavar con agua caliente, secar. |
| 4 | Reactivo de <i>poulton</i> | 12 ml de HCl(concentrado), 6 ml de HNO ₃ (concentrado), 1 ml de HF (48%), 1 ml de H ₂ O | Puede ser pre mezclado y almacenado por largos periodos. Ataque por inmersiones breves o por medio de untado, lavar con agua fría, no permita que el reactivo o el espécimen entren en contacto con calor durante el ataque. |
| 5 | | 50 ml HCl (concentrado), 15 ml de HNO ₃ (concentrado), 3 ml de HF (48%), 5 ml de una solución de FeCl ₃ (concentrado) | Hágase la mezcla fresca antes de usar, enfriar la solución hasta 10 o 15 °C en camisa de agua fría, sumerja unos pocos segundos, lavar con agua fresca, repetir hasta obtener los resultados esperados |
| 6 | | 10ml HCl (concentrado), 30 ml de HNO ₃ (concentrado), 20 ml de H ₂ O, 5 gramos de FeCl ₃ | Hágase la mezcla fresca antes de usar, agregue el ácido fluorhídrico al final. Usar a temperatura ambiente. Sumerja por pocos segundos, lavar con agua fresca, repetir hasta obtener los resultados esperados. Puede usarse también por medio de untado. |
| 7 | | 60 ml de HCl (concentrado), 40 ml de HNO ₃ (concentrado) | Hágase la mezcla fresca antes de usar. Sumerja o unte por pocos segundos, lavar con agua fría, secar y examinar. Repita el proceso de ser necesario. |
| 8 | | 20 gramos de CuCl ₂ (cloruro cúprico), 100 ml de H ₂ O | Sumerja el espécimen por pocos segundos. Remover los depósitos de cobre con una mezcla de 6 partes de HNO ₃ (concentrado) y 1 parte de HF (concentrado). Repetir hasta obtener el resultado esperado. Limpiar con la mezcla de HNO ₃ -HF y lavar con agua entre los pasos. |

Fuente: ASM Internacional. (1985). *Metals handbook volume 9. Metallography and microstructures aluminium alloys metallographic techniques and microstructures.*

Tabla II. **Aplicabilidad de reactivos en dependencia del tipo de aleación utilizada, con base en la tabla I**

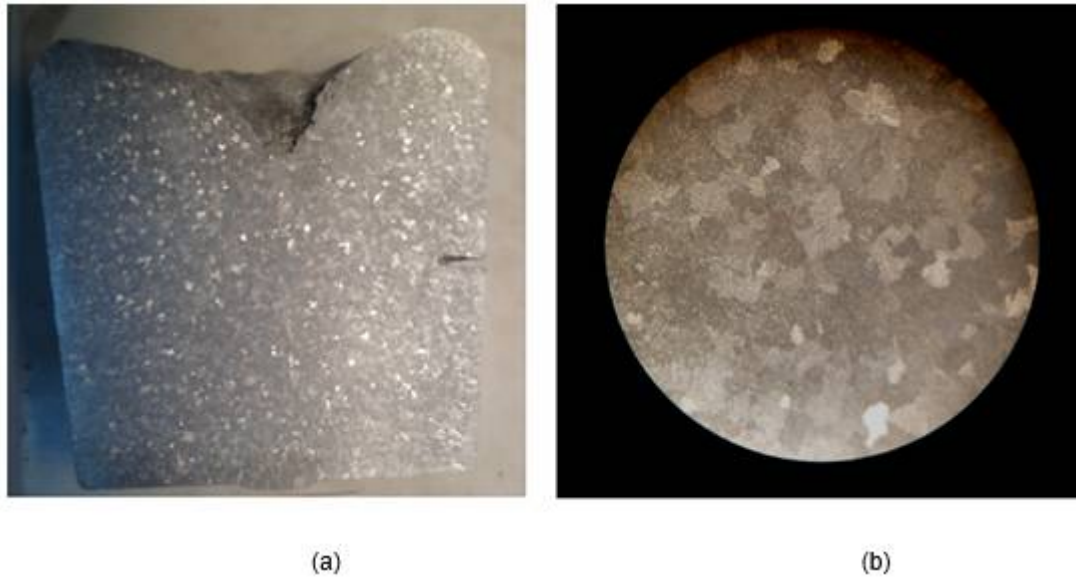
| Aleación | Reactivo a utilizar |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Aluminio de alta pureza | 4 o 5 |
| Aluminio de pureza comercial series 1XXX | 1,2 o 4 |
| Todas las aleaciones de alta concentración de cobre series 2XXX y aleaciones fundidas | 1,6 o 7 |
| Aleaciones aluminio manganeso series 3XXX | 1,2,4 o 6 |
| Aleaciones aluminio silicio series 4XXX y aleaciones fundidas | 2,3,4 u 8 |
| Aleaciones aluminio magnesio series 5XXX y aleaciones fundidas | 1,2,4 o 6 |
| Aleaciones aluminio magnesio silicio series 6XXX y aleaciones fundidas | 1, 2,4 o 6 |
| Aleaciones aluminio cobre magnesio zinc series 7xxx y aleaciones fundidas | 1 o 6 |

Fuente: ASM Internacional. (1985). *Metals handbook volume 9. Metallography and microstructures aluminium alloys metallographic techniques and microstructures.*

- Lingote número 1: aleación Al-1%Cu

En la figura 28 se puede observar una propagación de granos equiaxiales de tamaño reducido en la mayoría del lingote, una pequeña zona columnar próxima a las áreas de contacto de la fundición con el molde, en comparación con la macroestructura de aluminio de alta pureza a la misma temperatura de sobrecalentamiento y el mismo molde (figura 23), se puede observar que el grano equiaxial es más pequeño, por lo que influye en cierta medida la cantidad de cobre agregada. El lingote fue colado en molde de acero de medio carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 75 °C.

Figura 28. a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X

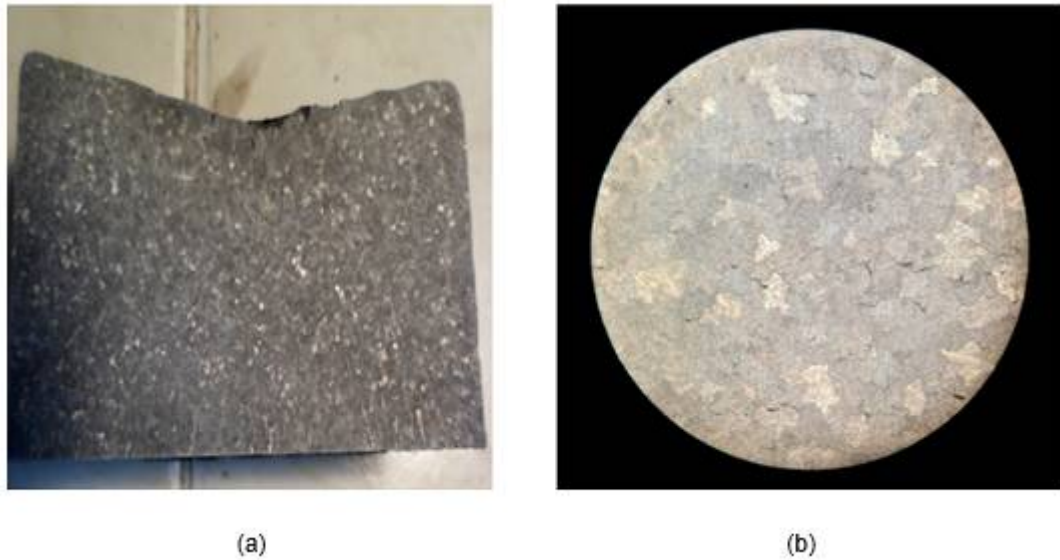


Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 2: aleación Al-1%Cu

La figura 29 muestra la macroestructura de solidificación de la aleación Al-1%Cu. Se aprecia que en la totalidad del lingote la presencia de granos equiaxiales es masiva, así también es de recalcar que el tamaño de estos granos es uniforme, en comparación con el lingote fundido en el mismo molde con aluminio de alta pureza, donde se observó que los granos en el exterior eran columnares con un núcleo equiaxial(figura 22). El lingote fue colado en molde de tubo de acero de bajo carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 75 °C respecto a la temperatura de fusión de ambos elementos.

Figura 29. **a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 3: aleación Al-1%Cu

En la figura 30 se puede observar una propagación de granos columnares alargados en la mayoría del lingote, el crecimiento columnar de este lingote es bastante amplio, predominando en la mayoría de la superficie revelada.

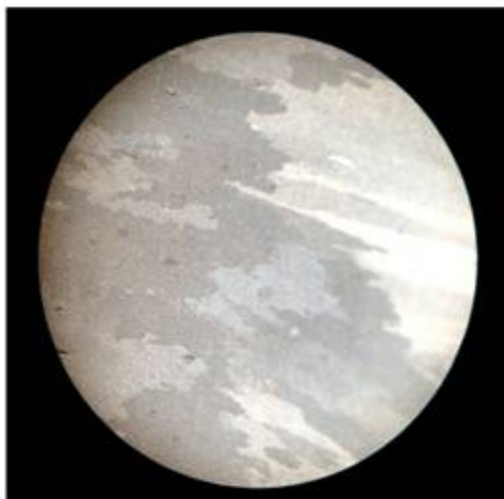
Así mismo se puede observar porosidades de distinta magnitud en la parte superior del rechupe, provocadas posiblemente por la humedad del medio ambiente.

Si se hace una comparación con la macroestructura de la colada de la figura 25, vaciada a la misma temperatura, se puede observar que en el aluminio de alta pureza se encuentra mejor definida la zona columnar con predominio de la zona equiaxial. La colada se realizó a presión metalostática constante, al igual que el resto de las probetas, en molde de grafito a 75 °C de sobrecalentamiento.

Figura 30. **a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 4: aleación Al-1%Cu

La figura 31 muestra el corte transversal de un lingote fundido en molde de arena a temperatura de colada con sobrecalentamiento de 75 °C, a presión metalostática constante. Se puede observar que el repuche es casi nulo, debido a la transferencia calórica lenta. Se aprecia que en la totalidad del lingote la presencia de granos equiaxiales es masiva. Así mismo se observan sopladuras distribuidas a lo largo de todo el lingote, provocadas por la evacuación de los gases debido al tipo de molde.

Figura 31. **a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



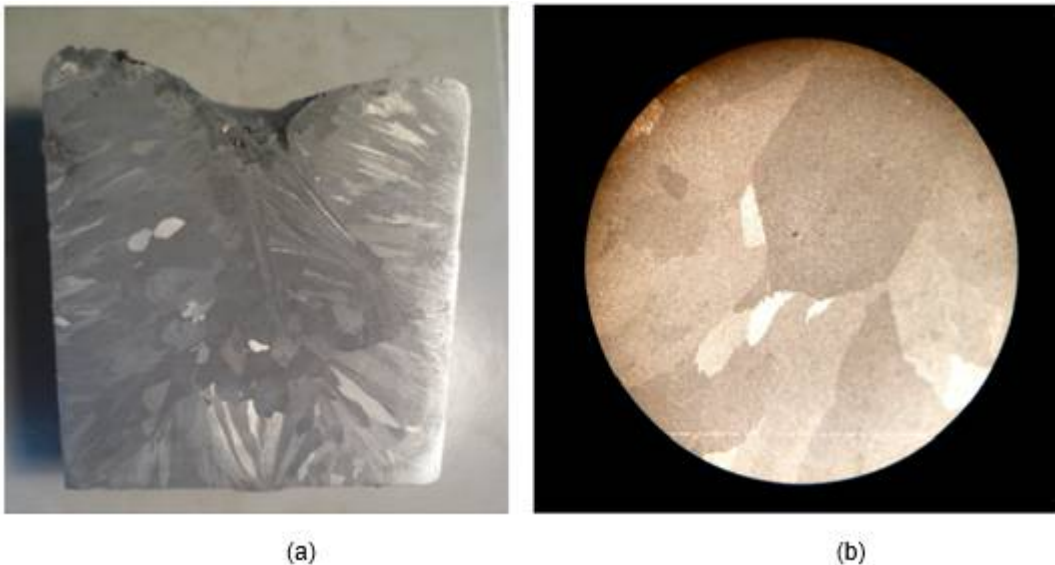
(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 5: aleación Al-1%Cu

La figura 32 muestra el corte transversal del lingote fundido en molde de grafito a presión metalostática constante, colado a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C, la zona columnar predomina en su mayoría con un tamaño de grano bastante amplio, esto debido a la velocidad lenta en la transferencia calórica. En la parte central se aprecia la formación de granos equiaxiales de tamaño considerable, en comparación con la colada obtenida en la figura 38 a la misma temperatura. En el aluminio de alta pureza se encuentra un núcleo equiaxial mejor definido.

Figura 32. **a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 6: aleación Al-1%Cu

En la figura 33 se pueden observar tres zonas bien marcadas, en primera instancia una zona *chill* muy fina, seguida por la zona columnar en las paredes y base del lingote, y en la parte interna la formación de granos equiaxiales producto del sobreenfriamiento, es decir en donde el pozo se mantiene líquido. En función del sobreenfriamiento sucede la nucleación que da origen a la zona equiaxial. El lingote fue colado en molde de tubo de acero de bajo carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C.

Figura 33. **a) Macroestructura de un lingote de Al-1%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura ampliada a 20X**



(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

Para las aleaciones de aluminio y 3 % cobre se trabajó de la misma forma que para la obtención de aleaciones de aluminio y 1 % cobre, pesándose las cantidades proporcionales de cada elemento.

- Lingote número 1: aleación Al-3%Cu

La figura 34 muestra un corte transversal del lingote fundido en molde de acero de medio carbono, a una presión metalostática constante, colado a una temperatura de sobrecalentamiento de 75 °C.

Se observa la formación de una zona *chill* muy fina, de la que parte una pequeña zona columnar, predominando la zona equiaxial con tamaño de grano reducido y uniforme en toda la estructura. Así mismo, se observan pequeñas porosidades en la parte superior, posiblemente originadas por la humedad del medio ambiente.

Figura 34. a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura ampliificada a 20X



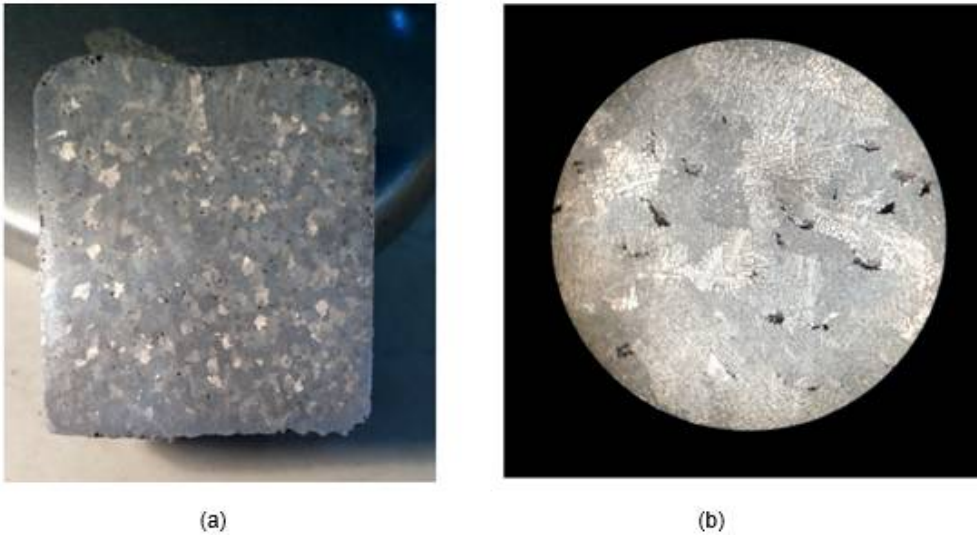
Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 2: aleación Al-3%Cu

En la figura 35 se puede observar que el repuche es casi nulo, debido a la transferencia calórica lenta, se aprecia que en la totalidad del lingote, después de la zona *chill*, la presencia de granos equiaxiales es masiva, así mismo se observan porosidades distribuidas a lo largo de todo el lingote, provocadas por la evacuación de los gases debido al tipo de molde.

En comparación con la colada realizada al 1 % de cobre a la misma temperatura (figura 31), el grano equiaxial es de menor tamaño. El lingote fue colado en un molde de arena a una temperatura de sobrecalentamiento de 75 °C, a presión metalostática constante.

Figura 35. a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura ampliada a 20X



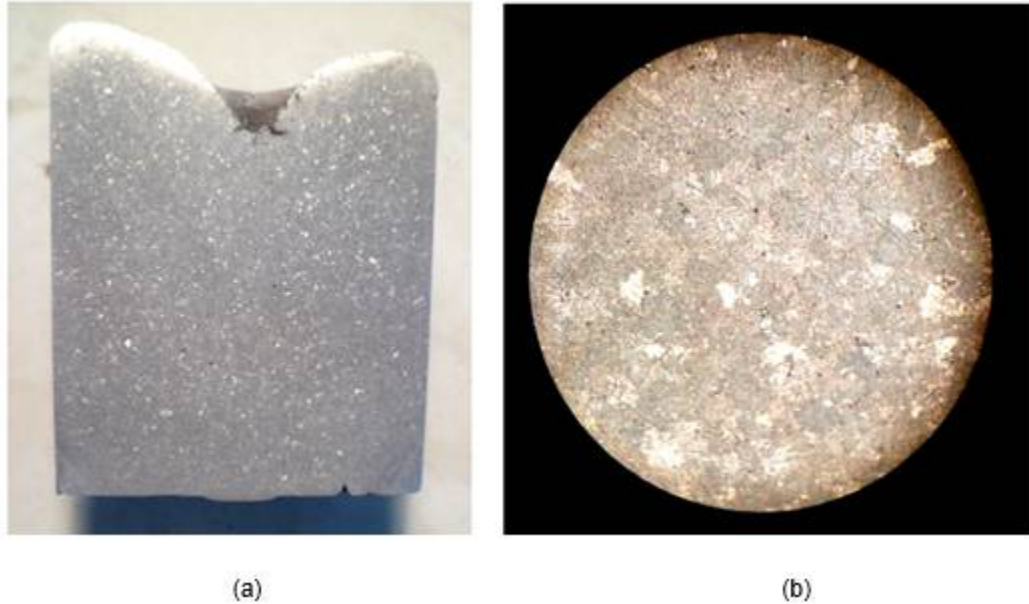
Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 3: aleación Al-3%Cu

En la figura 36, después de la zona *chill*, se observa predominantemente la formación de granos equiaxiales uniformes y de tamaño reducido desde los extremos hacia el núcleo. Se aprecia levemente, en los extremos del lingote, la formación de granos columnares.

En comparación con la colada realizada al 1% de cobre a la misma temperatura de sobrecalentamiento (figura 30), se puede observar una estructura totalmente distinta, predominantemente columnar. El lingote fue colado en un molde de grafito, a presión metalostática constante.

Figura 36. a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura ampliada a 20X



Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 4: aleación Al-3%Cu

La figura 37 muestra el corte transversal de un lingote fundido en molde de acero de medio carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C. En este lingote se puede apreciar una zona equiaxial más copiosa de granos con tamaño reducido, una zona columnar escasa próxima a las paredes molde confundiendo con la zona *chill*. En comparación con la colada realizada al 3 % de cobre a 75 °C de sobrecalentamiento (figura 34), se aprecia un tamaño de grano levemente mayor.

Figura 37. a) Macroestructura de un lingote de Al-3%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura ampliada a 20X



Fuente: elaboración propia.

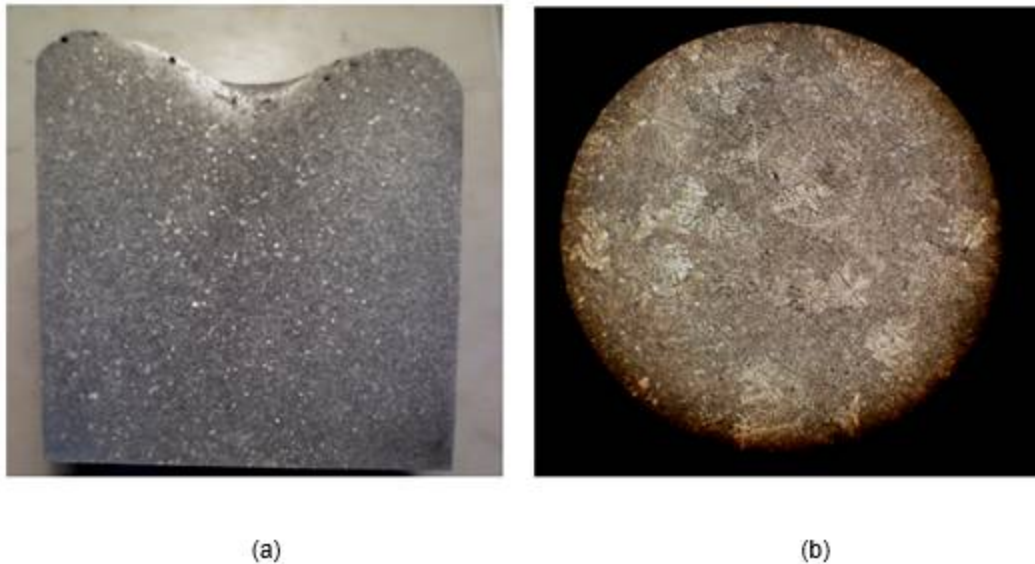
En cuanto a las aleaciones de aluminio y 5 % de cobre, es importante decir que la máxima solubilidad del cobre en el aluminio, que tiene aplicación ingenieril, ocurre cuando el contenido es de aproximadamente 5 %, es por esto que la utilización de muestras con este contenido de soluto es necesaria. Para la obtención de las mismas se utiliza la misma metodología que en las aleaciones 1 y 3 %.

- Lingote número 1: aleación Al-5%Cu

En la figura 38, partiendo de una fina capa de la zona *chill*, se puede observar la formación de una zona columnar escaza en las proximidades de las paredes del molde, predominando en toda la estructura la formación de granos equiaxiales de tamaño reducido y uniforme.

Se observa en la parte superior algunas porosidades. En comparación con el lingote obtenido en la figura 34 a la misma temperatura de sobrecalentamiento y con 3 % de cobre, se muestra igualmente predominio de la zona equiaxial. El lingote fue colado en molde de acero de medio carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 75 °C.

Figura 38. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura ampliada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 2: aleación Al-5%Cu

En la figura 39 se aprecia que en la totalidad del lingote la presencia de granos equiaxiales es masiva, se puede observar también la formación de una zona columnar escaza, partiendo de la zona *chill*, en la inmediata vecindad de las paredes del molde, con porosidades en las partes superior e inferior del molde. En comparación con el lingote de la figura 35, hay una diferencia en el tamaño de grano equiaxial con la estructura obtenida con 5 % de cobre.

El lingote fue colado en molde de arena a una temperatura de sobrecalentamiento de 75°C y a una presión metalostática constante.

Figura 39. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de arena b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



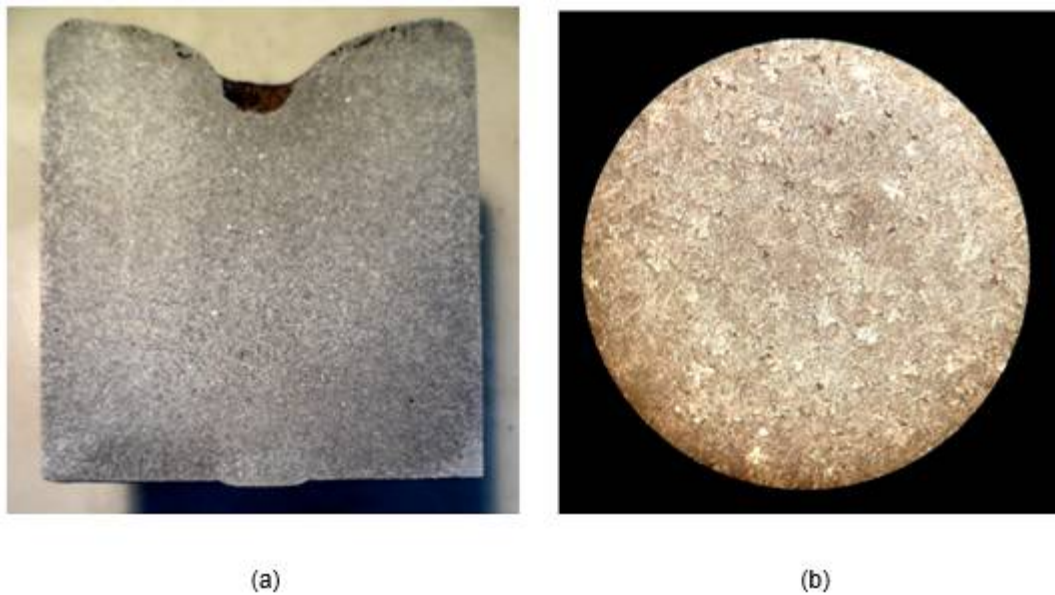
(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 3: aleación Al-5%Cu

En la figura 40 se aprecia que la zona con mayor presencia es la equiaxial de grano reducido, esto por la rápida extracción calórica producida por el molde. Sin embargo, se muestra la presencia de la zona columnar en los márgenes próximos al contacto con el molde, partiendo de la zona *chill*. El lingote fue colado a una temperatura de 75 °C por encima de la temperatura de fusión calculada en el diagrama de aluminio-cobre (figura 21).

Figura 40. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 75 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X**

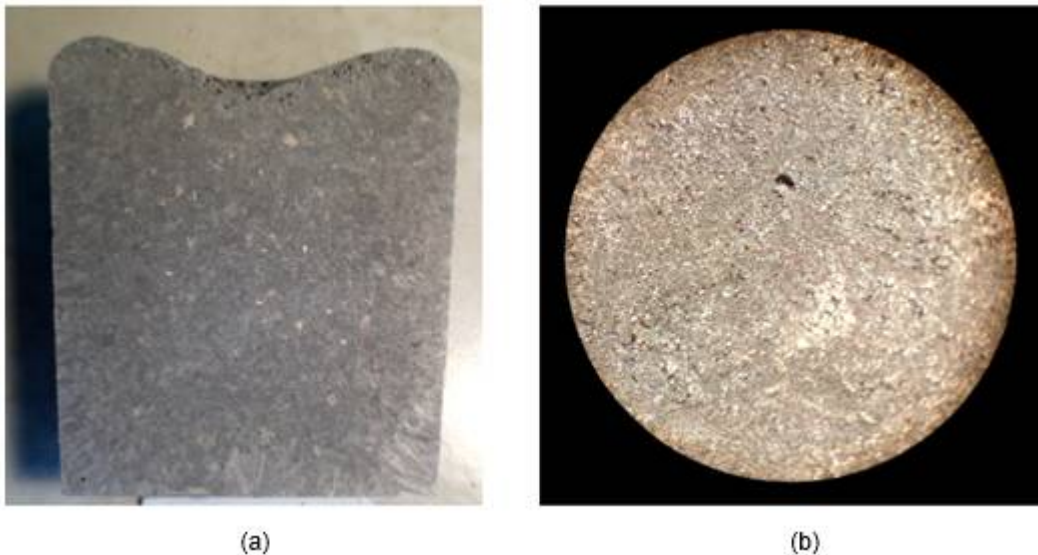


Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 4: aleación Al-5%Cu

En la figura 41 se puede observar el corte longitudinal de una probeta colada en molde de grafito a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C, a presión metalostática constante. Se puede apreciar que la superficie muestra una zona columnar de crecimiento fino casi en forma de agujas de reducido tamaño, partiendo de la zona *chill* y el crecimiento granular equiaxial copioso. Así mismo, se muestran en el extremo superior varias porosidades provocadas en gran medida debido, posiblemente, a la humedad del medio ambiente y a la oxidación del metal líquido durante la colada.

Figura 41. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de grafito (G) b) Macroestructura amplificada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

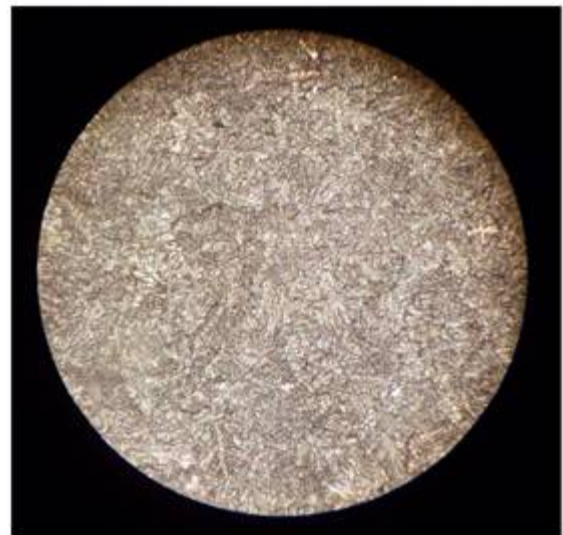
- Lingote número 5: aleación Al-5%Cu

En la figura 42 se aprecia que la zona con mayor presencia es la equiaxial de grano reducido, esto por la rápida extracción calórica producida por el molde. Sin embargo, se aprecia claramente la presencia de la zona columnar, partiendo de la zona *chill*, principalmente en los vértices de la base del lingote y levemente en sus extremos. El lingote fue colado en molde de tubo de acero de bajo carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C, a una presión metalostática constante.

Figura 42. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de tubo de acero de bajo carbono (TBC) b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

- Lingote número 6: aleación Al-5%Cu

La figura 43 muestra el corte transversal de un lingote fundido en molde de acero de medio carbono a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C. En este lingote se puede apreciar una zona equiaxial más copiosa de granos con tamaño reducido y uniforme, y una zona columnar escaza partiendo de una zona *chill* muy poco observable.

Figura 43. **a) Macroestructura de un lingote de Al-5%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura amplificada a 20X**



(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

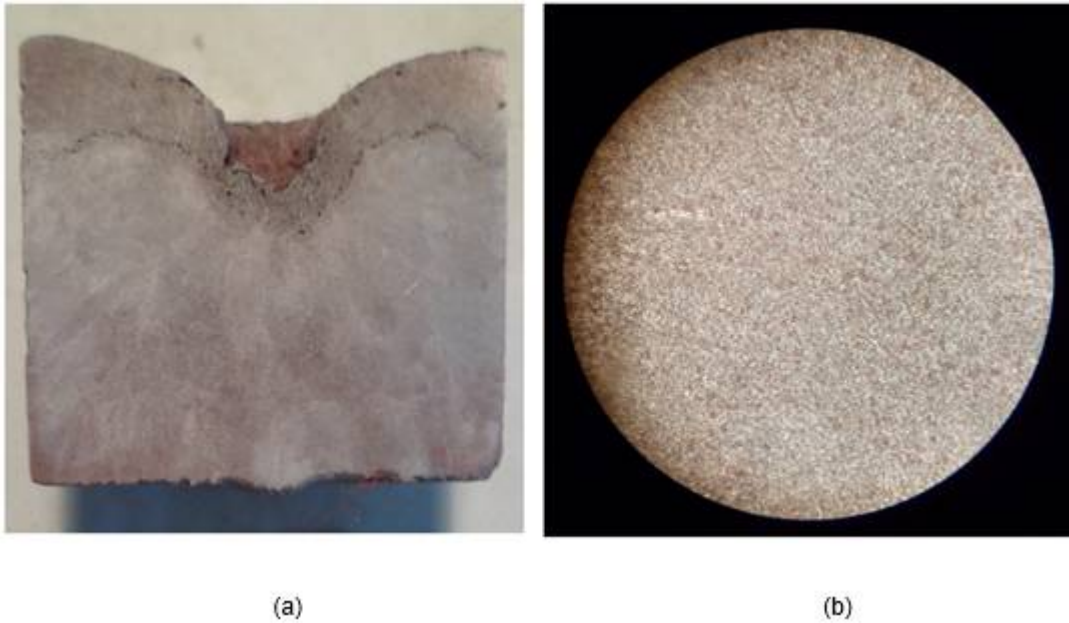
Para aleaciones de aluminio y 33 % de cobre, debe saberse que las aleaciones de aluminio-cobre forman, a 547°C, un eutéctico que contiene 33 % de cobre. La metodología de preparación de esta aleación fue la misma empleada para las aleaciones anteriores.

- Lingote número 1: aleación Al-33%Cu

En la figura 44 se aprecia que la zona con mayor presencia es la equiaxial de grano reducido, aunque no se logró revelar la estructura de mejor forma, dado que se realizaron varios ensayos con diferentes reactivos, siendo los siguientes: 100ml alcohol etílico, 20 ml ácido clorhídrico y 5 ml de cloruro férrico, pero no se obtuvo ningún resultado, luego se aumentó las concentraciones a 200 ml, 50 ml y 10 ml, respectivamente, lo que provocó que la muestra se oscureciera.

Por último se probó con el reactivo 6 de la tabla I, logrando obtener la revelación como se muestra en la figura 44:

Figura 44. **a) Macroestructura de un lingote de Al-33%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, molde de acero de medio carbono (AMC) b) Macroestructura ampliada a 20X**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Análisis de las diferencias de dureza cuando se modifican los sobrecalentamientos de colada

De acuerdo al segundo objetivo planteado se presentan los resultados obtenidos en las diferentes probetas de aluminio y aleaciones aluminio-cobre cuando se modifican los sobrecalentamientos de colada, siendo estos en 75 °C y 150 °C.

2.2.1. La dureza de las piezas fundidas en relación a las estructuras de solidificación

La dureza es una condición de la superficie del material, es la propiedad que se opone a ser penetrada o rayada. En la presente investigación se determinó su valor por medio del ensayo de dureza Brinell.

2.2.1.1. Ensayo de dureza Brinell (HB)

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM E10 “Métodos de ensayos Normalizados para la dureza Brinell de los Materiales Metálicos”, tiene como objetivo determinar la dureza de materiales blandos y duros. El ensayo no es recomendable para materiales que tengan una dureza Brinell mayor de 630.”(Pazos, 2005, p.121)

La dureza es la resistencia que opone un material a la penetración por un objeto duro y se relaciona con la resistencia al desgaste de los materiales. A pesar de que existen docenas de técnicas para medir la dureza, la más común es el ensayo Brinell, en donde una esfera de carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro es presionada hacia la superficie del material de ensayo. (Newel,2009, p.80).

La dureza Brinell(*HB*) se determina por la fórmula:

$$HB = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (8)$$

En donde:

P= carga aplicada en kilogramos (Kg)

D= diámetro de la esfera 10mm

d= diámetro de la impresión que dejó la huella (mm)

Los materiales más duros tienen valores HB más altos. La dureza Brinell para los metales se encuentra en un rango alrededor de 50 a 750. El valor se reporta como el número de dureza seguido de tres letras (HBW), la dureza Brinell de 300 se reportaría como 300 HBW.

La W indica que se utilizaron esferas de carburo de tungsteno. El ensayo Brinell es rápido, fácil, confiablemente exacto y por mucho el más utilizado. También no es destructivo ya que el material no se rompe durante el ensayo.(Newel, 2009, p.81)

2.2.1.2. Equipo

Para el ensayo de dureza se contó con el apoyo del Centro de Investigaciones (CII) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, utilizando la máquina universal Tinius Olsen Super L300(figura 45) y de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ASTM E10 para el ensayo de dureza Brinell.

La magnitud de la carga de indentación utilizada fue de 1000 Kgf y una esfera normalizada de 10 mm de diámetro, manteniendo la carga durante 10 a 15 segundos en cada ensayo.

Figura 45. **Máquina universal Tinius Olsen Super L300**

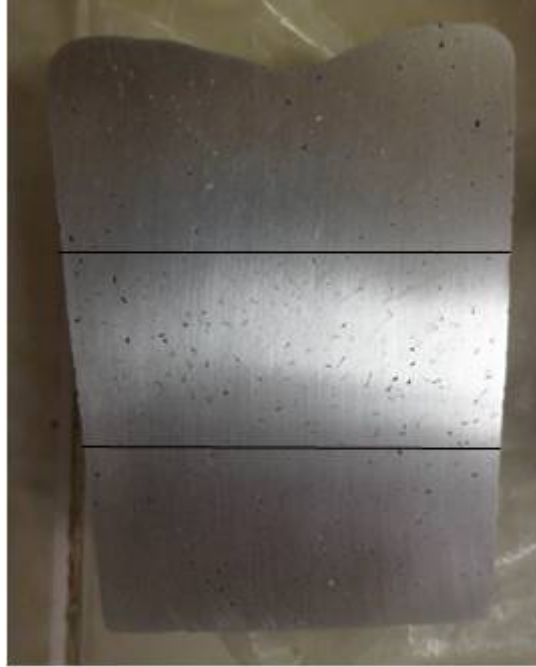


Fuente: Centro de Investigaciones Ingeniería(CII). USAC.

2.2.1.3. Muestras de ensayo

Las muestras utilizadas para el ensayo de dureza Brinell fueron obtenidas de la otra sección transversal de los lingotes de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre utilizados para el ensayo macrográfico, los cuales fueron seccionados en dos o tres partes dependiendo del tamaño según se muestra en la figura 46:

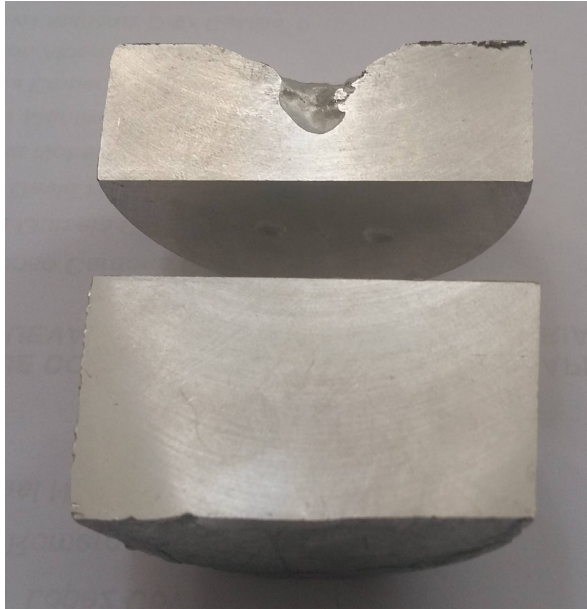
Figura 46. **Lingote seccionado de aluminio de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

Después de haber realizado los cortes se procedió a refrentar las piezas obtenidas (figura 47), estas se trabajaron con la ayuda de una fresadora instalada en el Laboratorio de Maquinado y CNC de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de tal forma que las superficies a ensayar quedaran completamente pulidas y libres de defectos, para mostrar que el borde de la impresión quede claramente definido para medir el diámetro de indentación con la precisión especificada.

Figura 47. **Cortes de lingote refrentado**



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.4. Medición de la impresión o indentación

Luego de haber realizado dos indentaciones en las caras superior, media e inferior, denotadas en esta investigación con las letras A, M, B, respectivamente en todas las probetas de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre, se procedió a realizar la medición de diámetros con la ayuda de un vernier digital según se muestra en la figura 48.

Figura 48. Vernier digital



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.5. Cálculos

El número de dureza Brinell(HB) se relaciona con la carga aplicada y el área de la superficie de la impresión permanente hecha por la indentación de la esfera, y se calculó con la ecuación 8, digitándola en hoja electrónica en Excel, para su fácil obtención.

A continuación se presentan las diferentes durezas obtenidas de las piezas tanto de aluminio de alta pureza como aleaciones aluminio-cobre a dos temperaturas de sobrecalentamiento: 75 y 150 °C.

Dureza del aluminio de alta pureza a 75 y 150 °C de sobrecalentamiento:

A continuación se presentan los resultados de las durezas obtenidas de los diferentes lingotes tanto de aluminio de alta pureza como aleaciones aluminio-cobre. Cabe mencionar que las letras A, M y B denotadas en la presente investigación representan las durezas en las caras superior, media e inferior, respectivamente.

Tabla III. **Dureza de aluminio alta pureza, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ARENA | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 5.20 mm | 5.20 mm | 43.7 |
| M | 5.20 mm | 5.20 mm | 43.7 |
| B | 5.20 mm | 5.20 mm | 43.7 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.84 mm | 4.84 mm | 51.0 |
| M | 4.84 mm | 4.84 mm | 51.0 |
| B | 4.83 mm | 4.83 mm | 51.2 |
| MOLDE TUBO ACEROBAJO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.84 mm | 4.84 mm | 51.0 |
| M | 4.84 mm | 4.83 mm | 51.0 |
| B | 4.83 mm | 4.83 mm | 51.2 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.84 mm | 4.84 mm | 51.0 |
| M | | | |
| B | 4.83 mm | 4.83 mm | 51.0 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Dureza de aluminio de alta pureza, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.75 mm | 4.75 mm | 53.1 |
| M | 4.74 mm | 4.74 mm | 53.3 |
| B | 4.74 mm | 4.74 mm | 53.3 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.75 mm | 4.75 mm | 53.1 |
| M | 4.75 mm | 4.75 mm | 53.1 |
| B | 4.75 mm | 4.75 mm | 53.1 |

Fuente: elaboración propia.

Dureza del aluminio 1% cobre a 75 y 150 °C de sobrecalentamiento:

Tabla V. **Dureza de Al-1%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ARENA | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.84 mm | 4.84 mm | 51.0 |
| M | 4.85 mm | 4.85 mm | 50.7 |
| B | 4.85 mm | 4.85 mm | 50.7 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.56 mm | 4.56 mm | 57.9 |
| M | 4.55 mm | 4.55 mm | 58.1 |
| B | 4.56 mm | 4.56 mm | 57.9 |
| MOLDE TUBO ACERO BAJO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.45 mm | 4.45 mm | 60.9 |
| M | | | |
| B | 4.45 mm | 4.45 mm | 60.9 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Dureza de Al-1%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE TUBO ACERO BAJO CARBONO | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.40 mm | 4.40 mm | 62.4 |
| B | 4.40 mm | 4.40 mm | 62.4 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.28 mm | 4.28 mm | 66.2 |
| M | 4.28 mm | 4.28 mm | 66.2 |
| B | 4.28 mm | 4.28 mm | 66.2 |

Fuente: elaboración propia.

Dureza del aluminio 3 % cobre a 75 y 150 °C de sobrecalentamiento:

Tabla VII. **Dureza de Al-3%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ARENA | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.19 mm | 4.19 mm | 69.2 |
| M | 4.19 mm | 4.19 mm | 69.2 |
| B | 4.19 mm | 4.19 mm | 69.2 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| M | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| B | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.05 mm | 4.05 mm | 74.3 |
| M | 4.01 mm | 4.01 mm | 75.9 |
| B | 4.01 mm | 4.01 mm | 75.9 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Dureza de Al-3%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos

| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.02 mm | 4.02 mm | 75.5 |
| M | 4.02 mm | 4.02 mm | 75.5 |
| B | 4.02 mm | 4.02 mm | 75.5 |
| MOLDE TUBO ACERO BAJO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.07 mm | 4.07 mm | 73.5 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.87 mm | 3.87 mm | 81.7 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| M | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| B | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |

Fuente: elaboración propia.

Dureza del aluminio 5 % cobre a 75 y 150 °C de sobrecalentamiento:

Tabla IX. **Dureza de Al-5%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ARENA | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.75 mm | 3.75 mm | 82.6 |
| M | 3.75 mm | 3.75 mm | 82.6 |
| B | 3.75 mm | 3.75 mm | 82.6 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.59 mm | 3.59 mm | 95.5 |
| M | ----- | ----- | ---- |
| B | 3.59 mm | 3.59 mm | 95.5 |
| MOLDE TUBO ACERO BAJO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.85 mm | 3.85 mm | 87.2 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.86 mm | 3.86 mm | 87.2 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.64 mm | 3.64 mm | 92.8 |
| M | 3.64 mm | 3.64 mm | 92.8 |
| B | 3.64 mm | 3.64 mm | 92.8 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Dureza de Al-5%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE ARENA | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 4.03 mm | 4.03 mm | 75.1 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.82 mm | 3.82 mm | 83.9 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.85 mm | 3.85 mm | 82.6 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.79 mm | 3.79 mm | 85.3 |
| MOLDE TUBO ACERO BAJO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.80 mm | 3.80 mm | 84.9 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.54 mm | 3.54 mm | 98.3 |
| MOLDE GRAFITO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 3.79 mm | 3.79 mm | 85.3 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 3.75 mm | 3.75 mm | 87.2 |

Fuente: elaboración propia.

Dureza del aluminio 33 % cobre a 75 y 150°C de sobrecalentamiento:

Tabla XI. **Dureza de Al-33%Cu, sobrecalentamiento 75 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE GRAFITO | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 2.27 mm | 2.27 mm | 243.9 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 2.27 mm | 2.27 mm | 243.9 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 2.24 mm | 2.24 mm | 250.5 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 2.24 mm | 2.24 mm | 250.5 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Dureza de Al-33%Cu, sobrecalentamiento 150 °C, diferentes sustratos**

| MOLDE GRAFITO | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 2.23 mm | 2.23 mm | 252.8 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 2.23 mm | 2.23 mm | 252.8 |
| MOLDE ACERO MEDIO CARBONO | | | |
| | diámetro 1 | diámetro 2 | HB |
| A | 2.42 mm | 2.42 mm | 214.2 |
| M | ----- | ----- | --- |
| B | 2.42 mm | 2.42 mm | 214.2 |

Fuente: elaboración propia.

2.3. Determinación de los cambios y beneficios producidos por las estructuras de solidificación en la propiedad de dureza

En función de los resultados obtenidos en las estructuras de solidificación de las diferentes aleaciones, se determinó que estas estructuras influyen directamente en las propiedades de dureza de las mismas y de igual forma se determinó que los cambios de temperatura de colada, al influir directamente sobre las estructuras de solidificación, también tienen un efecto directo sobre la dureza de las aleaciones y representan un beneficio para el proceso de fundición artesanal. De tal manera se puede observar lo siguiente:

El incremento del soluto en las aleaciones produce una disminución en el tamaño de grano de las estructuras de solidificación e incide directamente en las estructuras de solidificación, tanto cualitativa como cuantitativamente, lo cual puede verificarse al observar las estructuras obtenidas en las macrografías de las figuras de la 33 a la 55, en las cuales se nota la diferencia de las estructuras de las piezas de aluminio de alta pureza, con las estructuras de las aleaciones diluidas Al 1% Cu y de igual manera con las aleaciones más concentradas, en este caso, aleaciones Al 3% Cu y Al5%Cu. Mientras en las primeras se denotan claramente las tres estructuras básicas de solidificación, en las segundas aparece como predominante una zona equiaxial copiosa de granos finos. En tal sentido, al analizar los resultados expuestos en las tablas V a la XIII, se concluye que la dureza se relaciona directamente con las estructuras de solidificación.

Se determinó que la dureza es inversamente proporcional al tamaño de grano de las estructuras de solidificación obtenidas, esto es a menor tamaño de grano de mayor dureza y a mayor tamaño de grano de menor dureza.

El efecto del sobrecalentamiento de colada incide directamente sobre el tamaño de grano aumentando el mismo proporcionalmente con el sobrecalentamiento, esto es a mayor temperatura de colada mayor tamaño de grano en una misma aleación, esto puede observarse en las figuras 25, 26, 27, 30 y 32.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis interno de los resultados experimentales obtenidos entre las estructuras de solidificación y la dureza de las diferentes probetas de ensayo

En el análisis interno se logró obtener mejores estructuras de solidificación, por lo que el beneficio sobre los resultados de la fundición artesanal es directo hacia la mejora de la calidad de las piezas fundidas de las aleaciones ensayadas.

- Aluminio de alta pureza, 75 °C de sobrecalentamiento

Al realizar el análisis comparativo entre los resultados estructurales en los lingotes de aluminio de alta pureza, colados en diferentes sustratos a 75 °C de sobrecalentamiento, se puede observar que, aunque las estructuras de solidificación son similares para dos de ellos (figuras 22 y 23), que presentan granos equiaxiales en forma copiosa, de tamaño moderado, difieren de la observada en la figura 25, que presenta una zona equiaxial con granos de mayor tamaño. Así mismo, existe una diferencia amplia con los resultados obtenidos con el sustrato de arena, en donde la estructura de solidificación, que continúa siendo equiaxial en su mayoría, presenta un tamaño de grano mayor (figura 24).

Al relacionar los resultados experimentales de dureza de los lingotes correspondientes se puede observar una similitud en las durezas obtenidas en tres sustratos, dos de acero y uno de grafito, con promedio de 51 HB. Por otro lado, la dureza de la probeta obtenida con el sustrato de arena es considerablemente inferior a las anteriores, 43.7 HB, esto se relaciona, en gran medida, con la velocidad de extracción calórica durante el proceso de solidificación, que para los moldes de arena es mucho menor.

- Aluminio de alta pureza, 150 °C de sobrecalentamiento

Los lingotes de las figuras 26, molde de acero de medio carbono, y 27, molde de grafito, colados a la misma temperatura de sobrecalentamiento, 150 °C, de aluminio de alta pureza, muestran una estructura de solidificación muy parecida entre ambos, predominantemente columnar, muy bien definida, que crece a expensas del pozo líquido sobrecalentado.

La diferencia de durezas con respecto a las probetas coladas con 75 °C de sobrecalentamiento puede atribuirse al cambio estructural, una zona columnar relativamente fina, contra las zonas equiaxiales anteriores, en este caso, un promedio de durezas de 53.1 HB. Es de observar que la partes media y baja del lingote colado en molde de acero de medio carbono presentan una dureza un tanto mayor, 53.3 HB, esto provocado por la velocidad de extracción calórica del molde de acero de medio carbono, que es más alta en comparación con la del molde de grafito.

- Aluminio 1 % cobre, 75 °C de sobrecalentamiento

Para las aleaciones Al-1%Cu, a 75 °C de sobrecalentamiento es posible observar que existe diferencia entre las estructuras de solidificación obtenidas: figura 28, probeta colada en molde de acero de medio carbono, presentando una estructura equiaxial fina; figura 29, colada en molde de tubo de acero de bajo carbono, presentando una estructura de solidificación muy similar a la anterior; figura 30, colada en molde de grafito, presentando una estructura de tipo columnar de tamaño regular; y la figura 31, probeta colada en molde de arena, presentando una estructura de grano equiaxial más gruesa .

En lo referente a las durezas de las estructuras citadas, las correspondientes a las tres primeras coladas presentan una variación considerable, entre 57.9HB para las coladas en moldes de acero, y 60.9HB para el molde de grafito, como puede apreciarse en las tablas correspondientes. Para la obtenida en molde de arena, la dureza correspondiente fue de 50.7 HB. Estos resultados pueden atribuirse a las diferencias de la velocidad de extracción calórica en los distintos sustratos, que actúan directamente en la morfología de las estructuras de solidificación.

- Aluminio 1% cobre, 150 °C de sobrecalentamiento

En los lingotes de aleaciones Al-1%Cu a 150 °C de sobrecalentamiento, las estructuras de solidificación obtenidas presentan una diferencia bien marcada, figura 32, colada en molde de grafito, mostrando una estructura columnar bastante homogénea de tamaño regular, y figura 33, colada en molde de acero, mostrando una estructura predominantemente equiaxial, con una zona columnar escasa, provocando, de la misma manera, un valor de dureza diferente para ambas estructuras 62.4 HB y 66.2 HB, respectivamente, siendo estas durezas mayores en comparación con las obtenidas en los lingotes colados a 75 °C.

- Aluminio 3 % cobre, 75 °C de sobrecalentamiento

Para la aleación Al-3%Cu, los lingotes de la figura 34, molde de acero, y de la figura 36, molde de grafito, colados a la misma temperatura de sobrecalentamiento, 75 °C, muestran una estructura de solidificación similar con predominio de la zona equiaxial en la mayoría del lingote, mientras que en la probeta obtenida en molde de arena la estructura de solidificación es diferente con granos equiaxiales de mayor tamaño, figura 35.

Las durezas obtenidas en los dos primeros casos fueron de 75.1 HB y 75.9 HB respectivamente, mientras la probeta colada en molde de arena presenta una dureza de 69.2 HB, inferior a las obtenidas en los moldes anteriores.

- Aluminio 3 % cobre, 150 °C de sobrecalentamiento

Los lingotes colados de aleación Al-3%Cu, a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C, muestran estructuras de solidificación bastante similares, granos equiaxiales pequeños, figura 36 para el molde de grafito y figura 37 para el molde de acero. Sin embargo, muestran diferencias en sus durezas de acuerdo al tipo de molde, siendo menor la obtenida en sustrato de grafito, 75.1HB. La figura 37, correspondiente al molde de acero, muestra una estructura de solidificación con un grano equiaxial bastante reducido alcanzando una dureza de 75.5 HB, presentando una diferencia de dureza en la parte inferior, 81.7 HB, en relación a la parte superior de 73.5 HB, esto pudo ser ocasionado por diferencias de la velocidad de extracción calórica en las diferentes zonas del lingote.

- Aluminio 5 % cobre, 75 °C de sobrecalentamiento

Los lingotes de aleación Al-5%Cu, colados en diferentes sustratos a 75 °C de sobrecalentamiento, presentan diferentes estructuras de solidificación, figuras 38, 39 y 40, y por consiguiente en la variación de sus durezas, siendo mayor la obtenida en el sustrato de acero de mediano contenido de carbono 95.5 HB. Por otro lado, las durezas de las probetas coladas en molde de tubo de acero de bajo carbono, fue de 87.2 HB, mientras la colada en molde de arena fue de 82.6 HB.

- Aluminio 5 % cobre, 150 °C de sobrecalentamiento

Los lingotes de las figuras 41, molde de grafito; 42, molde tubo de acero de bajo carbono; y 43, molde de acero de medio carbono, colados a una temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C de aleación de Al- 5%Cu, presentan una estructura de solidificación similar, aunque al verificar su dureza, en la cara superior del sustrato de acero de medio carbono en la parte superior (A, según la tabla respectiva), presenta una dureza de 82.6 HB y en su parte inferior (B), 85.33 HB, lo mismo sucede con el sustrato de tubo de acero de bajo carbono, se observa una dureza en la parte superior de 84.9 HB, y en su cara inferior mayor dureza con un valor de 98.3 HB, generado posiblemente por el subenfriamiento rápido al contacto con las paredes del molde. Mientras que en el molde de grafito se mantiene una dureza similar a la obtenida en el molde de acero de medio carbono y haciéndose notar que la dureza más baja se da en el molde de arena, como ha sido en la mayoría de ensayos.

- Aluminio 33 % cobre, 75 °C de sobrecalentamiento

En las coladas realizadas a una temperatura de 75 °C de sobrecalentamiento de aleación Al-33%Cu, se ensayaron dos lingotes, siendo el primero en sustrato de grafito presentando una dureza de 243.9 HB y el segundo en sustrato de acero de medio carbono con una dureza de 250.5 HB, denotando que a mayor temperatura de transferencia calórica metal-molde existe mayor dureza formando granos equiaxiales muy finos. Las estructuras de solidificación correspondientes no permitieron su definición por los procedimientos metalográficos seguidos. Sin embargo, la figura 44 es representativa de dichos ensayos.

- Aluminio 33 % cobre, 150 °C de sobrecalentamiento

En el lingote de la figura 44 se logra apreciar una estructura de solidificación predominantemente de granos equiaxiales muy finos, con una dureza de 252.8 HB en sustrato de grafito, mientras que en el sustrato de acero de medio carbono se observa un descenso de dureza a 214.2 HB, mucho menor a la obtenida en la misma aleación solo que a una temperatura de sobrecalentamiento de 75°C.

3.2. Análisis externo comparativo con los antecedentes para realizar la siguiente investigación.

Aguilar (2011), mediante un análisis micrográfico en probetas de fluidez, encontró que las estructuras de solidificación varían en función de la cantidad de soluto de aleaciones y de los sobrecalentamientos de colada, definiendo que ambos parámetros externamente controlables influyen directamente en las características de las estructuras de solidificación , de igual forma Aguilar (2016)determinó que la fluidez definida por los sobrecalentamientos de colada influye en las estructuras de solidificación.

López (2013) aplicó los criterios establecidos en las investigaciones anteriores a la colada de las mismas aleaciones simulándolas a características artesanales del medio guatemalteco.

López y Aguilar (2013) determinaron las características estructurales de aleaciones aluminio-cobre ligeramente concentradas en función de la colabilidad de las mismas.

En la presente investigación se comprobó que todo lo propuesto en las investigaciones citadas se cumple a totalidad en las estructuras obtenidas mediante la simulación del sistema de colada artesanal y se definió la correlación existente entre las estructuras de solidificación analizadas exhaustivamente en los trabajos citados y las durezas de las aleaciones ensayadas.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que existe en el aluminio de alta pureza, así como en las aleaciones aluminio-cobre, una relación directa entre las estructuras de solidificación obtenidas mediante la variación de los parámetros de colada. Estas características influyen directamente en las propiedades mecánicas de dureza.
2. La diferencia de composición química o cantidad de soluto entre las diferentes probetas se logró al hacer el análisis en las probetas sobre la dureza, logrando alcanzar el objetivo propuesto que incide directamente en las estructuras de solidificación, actuando como afinador de grano, por lo tanto, existe una variación de dureza en cada probeta obtenida.
3. Al hacer la evaluación se pudo comprobar los siguientes beneficios: el efecto directo de las temperaturas de colada, así como el de los sobrecalentamientos, puede notarse en el mayor crecimiento del tamaño de grano de las estructuras, por lo tanto, se comprobó que, a mayor temperatura de sobrecalentamiento, mayor tamaño de grano y, por consiguiente, menor dureza.
4. Se determinó que las durezas de las diferentes probetas analizadas son influenciadas por las estructuras de solidificación, afectadas directamente por los parámetros involucrados como: cantidad de soluto de la aleación, temperatura de sobrecalentamiento y tipos de sustratos.

RECOMENDACIONES

1. Debido a que las composiciones químicas de las estructuras de solidificación inciden en las propiedades de dureza en las aleaciones Al1%Cu, Al3%Cu, Al5%Cu y Al33%Cu, se hace necesaria la evaluación continua y control minucioso de dichas composiciones químicas.
2. Es importante continuar analizando el control total sobre la cantidad de soluto en las aleaciones para poder obtener las estructuras de solidificación deseadas y por consiguiente las durezas requeridas.
3. En lo referente al sobrecalentamiento se sugiere emplear las temperaturas en forma exacta, para obtener los tamaños de grano deseados de las estructuras requeridas, para que no exista variación en las propiedades mecánicas, específicamente las de dureza.
4. Para obtener las características de dureza requeridas en una fundición en particular se hace necesario mantener absoluto control sobre los parámetros involucrados tales como: cantidad de soluto, temperatura y sobrecalentamiento de colada y tipo de sustrato involucrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, R. (2011). *Fluidity of Al-Cu alloys with no superheats and solidification mechanisms*. (Tesis doctoral). Atlantic International University. Honolulu Hawaii.
2. Aguilar R. (2011). *Solidificación de metales y aleaciones y el mecanismo de cierre de vena fluida durante los ensayos de fluidez*. (Ensayo Metodológico). Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.
3. Aguilar, R. (2012). *Introducción a la metalurgia. Curso básico para ingenieros*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.
4. Aguilar, R. y Biloni, H. (1977). *Fluidez de aleaciones Al-Cu con sobrecalentamiento nulo*. Argentina: OEA-CNEA.
5. ASM International. (1987). *Fractography. Metal Handbook*, vol. 12. ASM International. USA: Ohio.
6. ASM International. (1990). *Properties and selection: non ferrous alloys and special purpose materials*. Metal Handbook, vol. 2. ASM International. USA: Ohio.

7. ASM International. (1985). *Metallography and microstructures. Metal Handbook*, vol. 9. ASM International. USA: Ohio.
8. Biederman, A. y Hassekief, L. (1955). *Fundición del hierro y del acero*. Argentina: Editorial Macagno, Lando y Cía.
9. Biloni, H. y Chalmers, B. (1965). *Trans. Met. Soc. AIME*, 233. Estados Unidos.
10. Biloni H. y Chalmers, B. (1966). *Origin of the equiaxed zone in small ingots*. (Tesis doctoral). Harvard University. Estados Unidos.
11. Biloni, H. y Morando, R. (1968). *On the nature of the chill zone in ingot solidification*. *Trans. AIME*. Estados Unidos
12. Biloni, H. (1971). *Relación entre las estructuras de segregación y las estructuras de fundición*. Argentina: OEA-CNEA.
13. Biloni, H. (1983). *Solidification. Physical metallurgy*. 3a ed. Cahn R.W. and Haasen P. Estados Unidos: North Holland Physics Publishing.
14. Bower, T. F. y Flemings, M. (1967). *Trans. TMS-AIME*. Vol. 239.
15. Chalmers, B. (1964). *Principles of solidification*. Estados Unidos: J. Wiley and Sons.
16. Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.

17. Kiss, F. J. (1974). *Estudio de las morfologías de crecimiento cristalino en diferentes procesos de solidificación en aluminio y sus aleaciones*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.
18. López, S. A. (2013). *Estructuras de solidificación del aluminio fundido artesanalmente*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Guatemala.
19. López, S. A. y Aguilar, R. (2013). *Colabilidad del aluminio de alta pureza y aleaciones Al-Cu ligeramente concentradas*. Guatemala.
20. Morales, A. (1975). *Efecto de la naturaleza de la superficie del molde sobre la transferencia calórica en el sistema metal/molde y las estructuras resultantes*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Rosario. Argentina.
21. Newel, J. (2009). *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería*. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
22. Pazos, N. (2005). *Tecnología de los metales y procesos de manufactura*. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas. Venezuela.
23. Prates, M. y Biloni, H. (1972). *Zona chill de los lingotes. Parámetros que controlan la estructura de solidificación*. Argentina: PMM/CNEA-OEA.
24. Reyes, I. y Medina, G. (2000). *Procesos de manufactura para el administrador*. México: Editorial Spanta.

25. Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*. México: McGraw-Hill Interamericana editores, S.A. de C.V.
26. Verhoeven, J. D. (1987). *Fundamentos de metalurgia física*. México: Limusa.