



**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE SOLERAS DE COBRE**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. GERARDO RENDÓN GUTIERREZ
ASESOR: DRA. MARÍA GUADALUPE NAVARRO ROJERO**

TOLUCA, EDO. DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2020.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR

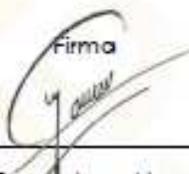


Querétaro, Querétaro, 27 de Octubre del 2020.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del **ING. GERARDO RENDÓN GUTIÉRREZ**, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE SOLERAS DE COBRE**" autorizo que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Firma


Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Asesor Académico

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



San Luis Potosí, San Luis Potosí Estado, 16 de noviembre del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno Gerardo Rendón Gutiérrez, cuyo título es:

"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE SOLERAS DE COBRE"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Firma

Dr. Raúl Pérez Bustamante

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por permitirme tener la salud y fuerzas para lograr este proyecto de vida y darme la oportunidad de crecer en mi trayectoria personal y profesional.
- A mi esposa Virginia y nuestros hijos Gerardo, Mauricio, Cynthia y Luis Alberto por su amor incondicional y apoyo en todo este proceso, que este esfuerzo represente un símbolo de superación personal que cada uno puede alcanzar cuando lo desea.
- A mis padres que siempre han sido un apoyo y ejemplo de valores y unión familiar, con sus valiosas enseñanzas y consejos he avanzado en mi vida profesional y personal.
- A mi empresa IUSA por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y brindarme espacio y tiempo para crecer en mi formación como ser humano y pueda traducir está a mejorar en mi vida laboral y personal.
- A todo el equipo de trabajo de la empresa y particularmente de la planta de producción de soleras, barras y perfiles de cobre, quienes participaron activamente apoyando en las diferentes corridas de producción para evaluar los resultados de las pruebas y variaciones requeridas en el presente documento.
- Al CONACYT por permitirme a través de los apoyos económicos mediante la beca, en poder continuar mi preparación y formación como profesionista.
- Al CIATEQ por brindarme el espacio de cultura e investigación que a través de sus maestros y personal, hicieron posible que el conocimiento y desarrollo teórico práctica de la enseñanza adquirida, pudiera consolidarse en proyectos de mejora continua para el trabajo cotidiano de la empresa.

RESUMEN

En la fabricación de soleras, barras y perfiles de cobre para uso eléctrico, el contar con un proceso que asegure la optimización del uso del metal, la eficacia del proceso y el maximizar la salida de producto, nos permite tener una continuidad en la operación, mediante la ejecución de pruebas con diferentes valores de cambio en los factores relevantes en el proceso de producción y, el análisis del resultado con cada uno, se logró poder establecer cuáles son los parámetros de operación que son importantes para asegurar la mejora de la fabricación de éstos productos; sin dejar de lado el cumplimiento de las especificaciones requeridas por los clientes y la composición química de la aleación que se está procesando.

Las temperaturas de procesamiento del metal, el calentamiento y temperatura ideal de extrusión de los lingotes, los tiempos del proceso en cada etapa, el enfriamiento adecuado y, una composición química idónea, establecieron la mejora del proceso de fabricación, permitiendo que la conformación del grano se uniformizara y el comportamiento del producto en sus procesamientos subsecuentes tuviera un mejor desempeño. En términos generales, los logros resultantes de este estudio nos aseguran el tener un proceso optimizado en la fabricación y uso del cobre, así como el tener un mejor producto terminado.

Palabras clave: Cobre, Aleaciones de cobre, Rendimiento de metal, Soleras de cobre, Extrusión de cobre, Optimización de uso de cobre, Estirado de cobre y conformación de tamaño de grano, Enfriamiento y composición química de aleaciones de cobre.

ABSTRACT

In the manufacture of copper busbar, rods and profiles for electrical use, having a process that ensures the optimization of the use of metal, the efficiency of the process and the maximization of product output, allows us to have a continuity in the operation, through the execution of tests with different values of change in the relevant factors in the production process and, the analysis of the result with each one, it was possible to establish which are the operating parameters that are important to ensure the improvement of manufacturing of these products; without neglecting compliance with the specifications required by customers and the chemical composition of the alloy of which it is composed.

The metal processing temperatures, the ideal temperature in the billets heating step and, the extrusion temperature of the ingots, the process time in each stage, the adequate cooling and an ideal chemical composition, established the improvement of the manufacturing process, allowing the formation of the grain become uniform and the behavior of the product in its subsequent processing will have a better performance. In general terms, the achievements resulting from this study assures us of having an optimized process in the manufacture and use of copper, as well as having a better finished product.

Key words: Copper, Copper alloys, Metal yield, Copper busbar, Extrusion process of non-metallic products, Copper usage, Copper drawing and grain size structure, Cooling process and composition of copper alloys.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR	i
CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
GLOSARIO	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. HIPÓTESIS.....	4
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1. METALES DE COBRE	5
2.1.1. Formación y estructura del tamaño de grano.....	6
2.1.2. Apariencia y características	13
2.2. SOLERAS DE COBRE.....	14
2.2.1. Proceso de fabricación	15
2.3. RENDIMIENTO DE METAL	28
2.4. MÉTODO DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	32

3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.1. REVISIÓN INICIAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN.....	33
3.2. ANÁLISIS DETALLADO DE CAUSALES DE BAJO RENDIMIENTO.....	51
3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS.....	52
4. RESULTADOS.....	63
4.1. VACIADAS O COLADAS.....	63
4.2. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO UTILIZADO.....	63
4.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	64
4.4. PRUEBA DE DOBLES.....	67
4.5. ANÁLISIS DE COLADAS CON CONTENIDO DE FIERRO.....	68
4.6. ANÁLISIS DE DESPRENDIMIENTO.....	75
4.7. ANÁLISIS DE RAYAS EN EL PRODUCTO.....	76
CONCLUSIONES.....	78
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	81
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento de núcleos [19]	7
Figura 2. Estructura granular [19]	7
Figura 3. Tamaño de grano [19]	8
Figura 4. Cambio en la estructura granular [19]	9
Figura 5. Recristalización de la micro estructura [19]	9
Figura 6. Efecto de los elementos de impurezas en la conductividad eléctrica [19]	12
Figura 7. Composición química del cobre según ASTM-B187 [13]	14
Figura 8. Foto soleras IUSA - http://www.iusa.com.mx	15
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de soleras	16
Figura 10. Descripción esquemática del proceso de extrusión [1]	17
Figura 11. Flujo del material en extrusión directa [1]	17
Figura 12. Flujo del material en extrusión indirecta [1]	18
Figura 13. Patrones de flujo en el proceso de extrusión [1]	19
Figura 14. Formación del defecto de extrusión [1]	20
Figura 15. Componentes de la prensa de extrusión [1]	22
Figura 16. Dado plano [1]	23
Figura 17. Dado entrada cónica [1]	23
Figura 18. Proceso de estirado de barras [2]	24
Figura 19. Proceso rolado y/o laminado en caliente [11]	26
Figura 20. Sistema extrusión continua de cobre [12].....	28
Figura 21. Defecto de calidad por mes - 2016	44
Figura 22. Defectos de calidad acumulada por causa - 2016.....	45
Figura 23. Defectos de calidad por mes – 2017	46
Figura 24. Defectos de calidad acumulada por causa – 2017	46
Figura 25. Defectos de calidad por mes – 2018	47
Figura 26. Defectos de calidad acumulada por causa – 2018	48
Figura 27. Comportamiento de vaciadas del año 2017	50
Figura 28. Comportamiento de vaciadas del año 2018.....	51
Figura 29. Ratificación de resultados con vaciadas del 2019 al corte	51
Figura 30. Defectos causantes de bajo rendimiento del metal	52
Figura 31. Prensa de extrusión de soleras de cobre	53

Figura 32. Lingotes de cobre	54
Figura 33. Velocidad del ram.....	55
Figura 34. Parámetros de velocidad.....	56
Figura 35. Presión y flujo volumétrico	57
Figura 36. Horno para capacidad de 2 lingotes.....	59
Figura 37. Horno para capacidad de 1.5 lingotes.....	60
Figura 38. Tina de enfriamiento y zonas que lo conforman	64
Figura 39. Muestra de las probetas empleadas para los análisis	64
Figura 40. Tamaño de grano presentado a diferentes razones de enfriamiento (A).....	66
Figura 41. Tamaño de grano presentado a diferentes razones de enfriamiento (B)	67
Figura 42. Contenido de oxígeno inicial y final	70
Figura 43. Tamaño de grano vs. contenido de hierro	72
Figura 44. Tamaño de grano vs. temperatura de enfriamiento	73
Figura 45. Diagrama Ishikawa de desprendimiento	75
Figura 46. Análisis de causas de desprendimiento (5 Por Qué)	76
Figura 47. Diagrama Ishikawa de rayas en el producto	77
Figura 48. Análisis de causas de rayas en el producto (5 Por Qué)	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de los elementos en aleaciones de cobre [10]	14
Tabla 2. Mezclas de cargas en horno holding 2016	35
Tabla 3. Mezclas de cargas en horno holding 2016 - continuación	36
Tabla 4. Mezclas de cargas en horno holding 2017	37
Tabla 5. Mezclas de cargas en horno holding 2017 - continuación	38
Tabla 6. Mezclas de cargas en horno holding 2018	39
Tabla 7. Mezclas de cargas en horno holding 2018 - continuación	40
Tabla 8. Composición química de lingotes C-11000 – año 2016	41
Tabla 9. Composición química de lingotes C-11000 – año 2017	41
Tabla 10. Composición química de lingotes C-11000 – año 2018	41
Tabla 11. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2016	43
Tabla 12. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2017	45
Tabla 13. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2018	47
Tabla 14. Rendimiento de metal mensual por aleación – 2016.....	48
Tabla 15. Rendimiento de metal mensual por aleación - 2017	49
Tabla 16. Rendimiento de metal mensual por aleación - 2018	49
Tabla 17. Medida de producto terminado vs. velocidad de extrusión.....	57
Tabla 18. Medidas de lingote.....	58
Tabla 19. Temperaturas de calentamiento de lingotes.....	59
Tabla 20 . Resultados de tamaño de grano vs. temperatura de enfriamiento.....	65
Tabla 21. Resultado de prueba de dobles en soleras	68
Tabla 22. Contenido de oxígeno en muestras por vaciada	69
Tabla 23. Tamaño de grano por vaciada y muestra	72
Tabla 24. Tamaño de grano vs temperatura de enfriamiento	73

GLOSARIO

Los conceptos más relevantes del presente documento son los siguientes:

Aleante – Componentes químicos que se utilizan en los procesos de fusión y sirven para dar al producto características específicas de dureza, tensión, elongación, y la conformación del grano.

Anisotropía – Es una propiedad que le da a los materiales propiedades de resistencia a la tensión, elongación y en función de la orientación que tengan los granos de los metales y/o cristales de los materiales, estos le dan la resistencia ó estrés a éstos llevándolos al punto de fractura. Esta propiedad en el análisis de materiales pueden darle resultados heterogéneos dependiendo de la orientación uniaxial ó biaxial y ayuda en la característica de la elasticidad de los materiales [3].

Colado – Proceso de fusión de metales a través del cual éstos (en este caso el cobre), es fundido a alta temperatura de 1,100°C aproximadamente para tener el metal de manera líquida y poder ser empleado para verterse sobre moldes ó lingoteras de formas diversas y obtener el metal de manera sólida para procesos de transformación y uso posteriores.

Conformación – Proceso por el cual los metales son sometidos a procesos de calentamiento hasta llegar al punto de plasticidad para poder ser transformados en otro producto con características físicas específicas.

Corrosión – Desde el punto de vista de cobre es el efecto superficial que va adquiriendo la pieza y/o metales con el contacto con el medio ambiente, Este proceso puede ser evitado con la correcta aplicación de ceras y líquidos de protección ambiental

Estirado – Proceso mediante el cual los metales son sometidos a una fuerza de tensión que reduzca sus dimensiones originales a otras menores, que puede ser a través de dados y obtener la forma que el dado de extrusión tiene predefinido.

Extrusión – Proceso de manufactura por el cual los metales son procesados y transformados a través de procesos de presión y/o compresión, formando barras, soleras, perfiles y láminas del mismo material para poder ser empleado en procesos posteriores para fabricar partes y componentes de diversidad de productos.

Frontera de grano – En la micro estructura, los materiales están formados por granos y, cada grano es un arreglo de átomos idénticos, pero algunos arreglos son distintos a otros, en el punto donde se aprecian diferencias se denomina frontera de grano.

Grano - Es aquella proporción diminuta del metal que presenta una estructura cristalina homogénea o idéntica, la cual se evalúa en como se va conformado en el proceso de solidificación del material que forma parte.

Límites o Bordos de Macla – Es un es un tipo especial de límite de grano a través del cual existe una simetría de red especular; esto es, los átomos de un lado del límite son como imágenes especulares de los átomos del otro lado. La región de material entre estos límites se denomina macla. Las maclas se generan por desplazamientos atómicos producidos al aplicar fuerzas mecánicas cizallantes (maclas mecánicas) y también durante tratamientos térmicos de recocido posteriores a la deformación (maclas de recocido). Los bordes de macla interfieren con el proceso de deslizamiento incrementando la resistencia del metal.

Maquinabilidad – Proceso con el cual las barras, perfiles y soleras de cobre son sometidos a contacto con herramientas de corte y desbaste para ser procesados y obtener a altas revoluciones por minuto la formación de piezas específicas.

Recocido – Proceso de calentamiento de los metales con el cual éstos son sometidos con cierta temperatura y tiempo de estancia en atmósfera controlada para poder liberar los esfuerzos generados por procesos previos, generando que exista y se dé una reconformación del tamaño de grano.

Rendimiento – Nivel de aprovechamiento del material empleado en el proceso de fabricación de cualquier producto.

Soldabilidad – Proceso por el cual los metales tienen características superficiales que permiten que éste pueda unirse y conserve sus propiedades

Solera – Producto de metal específico con forma de perfil rectangular que se utiliza usualmente de cobre para uso eléctrico en instalaciones donde se requiere conductividad.

Tensionado – Proceso que sirve para generar la liberación de esfuerzos en los metales y que permiten que el material sea enderezado y su tamaño de grano re-conformado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Proyecto desarrollado para optimizar el proceso y mejorar el uso del cobre utilizado en la fabricación de las soleras en la planta Busbar, la cual es integrante de la división Cobre y Aleaciones. Esta planta fabrica diversas medidas dimensionales de soleras y barras, las cuales los clientes las utilizan para fabricar artículos y equipos para control, conducción y distribución de energía eléctrica, principalmente de uso industrial; también son altamente empleados en procesos de transferencia electrolítica en procesos de lixiviación, refinación y colado de metales.

El proceso inicial que se tenía en operación en la planta fabricante de soleras de cobre, contaba con un proceso de producción con el uso de lingotes de cobre de 10" de diámetro por 27" de largo, el cual se empleaba para todas las medidas de soleras y perfiles que iban desde ½" de espesor por 2" de ancho, hasta ½" x 10" de ancho y diferentes perfiles especiales y barras redondas, cuadradas y rectangulares de varias dimensiones. El uso de esta longitud generaba solo con algunas medidas producción terminado con una utilización de material superior al 70%, pero la mayoría generaba demasiado desperdicio. Los niveles de rendimiento iniciales del año 2016 y años previos, eran del 69 % promedio, aunque teníamos valores inferiores que partían desde el 65%. Esto es que un 35% de material se enviaba a fundirse nuevamente, teniendo que ser considerado como reciclaje de metal con los respectivos costos incurridos, los cuales se reflejan al final del período contable como pérdidas dando una rentabilidad de la operación de la planta.

Además de que en el proceso de fabricación, también se generaba ya de manera recurrente, piezas con defectos de fabricación debido a manejo de una sola temperatura de calentamiento de lingotes para todas las aleaciones y temperaturas de enfriamiento de las corridas de producción sin control, ya que toda la planta solo tenía un solo sistema de enfriamiento de agua y un solo intercambiador de calor que daba el servicio a la prensa y los equipos hidráulicos y el mismo sistema suministraba la solución acuosa de enfriamiento con temperaturas variables dependiendo de la hora y la capacidad del equipo mismo de enfriamiento.

Esta serie de factores son el escenario inicial que da pauta a que genere este proyecto de tesis para buscar mejorar el área mediante un proceso de experimentación y control de las diferentes variables que se llevan a cabo en la manufactura de las soleras de cobre, que es el principal producto de esta planta. El análisis derivado de este estudio se enfocó a revisar lo relativo a toda la cadena de suministro de los materiales sobre los que como empresa y planta productiva, tenemos control y éste inicia desde la fabricación de lingotes de cobre aleación C-11000 de 10" de diámetro y longitud variable, proceso que se es realizado en la fundición continua de lingotes y 2 moldes que se utilizan para fabricar lingotes de geometría cilíndrica; posteriormente pasaremos al área de extrusión y estirado, para finalmente cubrir la ruta hasta corte y empaque del producto solicitado.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se tiene un bajo nivel de aprovechamiento de metal en los procesos de fabricación de las soleras, barras y perfiles de cobre y requiere analizarse todo el proceso para tener un plan de mejoramiento y aumento del rendimiento de metal en la fabricación de la planta Busbar.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La naturaleza de los procesos de fundición, extrusión, estirado y terminado de barras, soleras y perfiles de metales no ferrosos, en procesos de manufactura similares a nivel mundial, manejan como objetivo el lograr elevar los parámetros de utilización del metal y mantenerlos en niveles del 76% al 78%, el cual es variable en función de los procesos de fabricación que incurra cada producto, de las presentaciones de producto requerido, así como de la demanda específica de cada una de las medidas procesadas.

A mayor volumen de fabricación y menor variabilidad de tamaños y medidas procesadas, el proceso es más estable, teniendo un mejor rendimiento; pero esto es solo en términos ideales, en la práctica, los distribuidores del producto generan requerimientos muy diversos, generándonos diferentes utilidades de metal y mayor variabilidad del proceso.

Este documento nos lleva a través de muestreos de información real del proceso a poder establecer parámetros de operación que reduzca la generación de materiales residuales y podamos tener un mejor control en los productos, para lograr cumplir las características físico-mecánicas que los clientes demanda para cada requerimiento.

El lograr esta meta con la aplicación de las recomendaciones, ayudará a la empresa a tener una mayor disponibilidad de capital de trabajo, menor gasto en materias primas y usar de manera efectiva todos los equipos de producción en términos prácticos.

Analíticamente se estima que por cada 1% de mejora del rendimiento, se traduce en un beneficio de tener fabricación potencial buena de 3 toneladas métricas mas de producto terminado, esto reduce el costo de producción por kilogramo procesado y, genera una mayor contribución a la compañía, lo anterior sobre la base del valor mínimo de requerimiento mensual generado a esta planta que oscila en las 150 toneladas métricas mensuales de productos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Optimizar el proceso de fabricación y la utilización del cobre empleado en la manufactura de soleras, barras y perfiles de cobre, mediante la revisión completa del proceso de producción y, el análisis estadístico de las variables del proceso.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis dimensional de los productos fabricados para determinar las longitudes de lingotes requeridos para maximizar la utilización del metal de éstos.
- Determinar las principales causas de rechazo interno del proceso de fabricación de soleras y establecer acciones de mejora.
- Analizar la composición química de los lingotes de cobre empleados en el proceso y su comportamiento en la extrusión y estirado.

- Revisar y establecer los parámetros de operación de la prensa de extrusión y la temperatura y velocidad de operación de ésta.
- Analizar el proceso de enfriamiento que junto con la composición química de los lingotes se determine el mejor tamaño de grano para el uso de las soleras fabricadas.

1.5. HIPÓTESIS

La optimización del proceso de manufactura para la fabricación de soleras, barras y perfiles de cobre, reducirá en un 3% el consumo de este material, lo que reeditarán en un incremento en la disponibilidad de los productos terminados para su venta y la correspondiente contribución económica a la compañía.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. METALES DE COBRE

El cobre es un metal ampliamente usado en la industria a nivel mundial, por tener la propiedad de una alta conductividad eléctrica, posee además propiedades mecánicas y de alta resistencia a la corrosión, usado también como recubrimientos sobre otros metales por las mismas características del metal [14].

Actualmente es el principal material empleado para fabricar cables eléctricos y otros componentes que requieran tener la propiedad de altas conductividad eléctrica. El cobre tiene la ventaja de ser muy duradero y se puede reciclar de manera ilimitada sin perder sus propiedades mecánicas [19].

El cobre es considerado como metal no ferroso por ser buen conductor de calor y electricidad, con alta densidad y a temperatura normal es de consistencia sólida. Se denomina no ferroso por no contener hierro dentro de su composición en una cantidad relevante.

Este material dependiendo de sus propiedades y pureza, se representa por números UNS C10100 a C13000. [19]

Los diversos tipos dentro de este grupo tienen diferentes grados de pureza y diferentes características. La aleación designada como C11000 es la más común de todas las llamadas "cobre eléctrico", con un contenido de oxígeno de 0.005 % a 0.04 % (50 a 400 ppm). El oxígeno dentro de esta aleación en función de su contenido es beneficioso ya que oxida además las impurezas presentes en el cobre, de forma que disminuye el efecto perjudicial de éstas sobre la conductividad eléctrica del metal base. [19]

Por lo anterior se realiza más adelante un análisis específico de los contenidos de oxígeno empleados en la fabricación de lingotes y como afecta este componente en el comportamiento y las propiedades ya como producto procesado que tienen los productos fabricados a partir de éstos.

El cobre y/o sus aleaciones, está concebido como un material muy importante ó esencial en la vida del ser humano y un elemento altamente empleado y comercializado, hasta para el control del metabolismo humano [18].

Las propiedades físico – mecánicas del material y sus aleantes, están íntimamente relacionadas con la composición química y la temperatura a la que fue procesada el metal. Las propiedades más importantes son la maleabilidad del material que permite realizar procesos de extrusión, estirado, doblado y resorteo del material, también es altamente empleado en procesos de soldadura y maquinados, uso en cubiertas, chapas ó aplicado el metal como recubrimiento en piezas de hierro ó acero.

Sus propiedades le permiten utilizarse para productos con alta resistencia, tenacidad, conductividad eléctrica y térmica, soldabilidad y resistencia al estrés, menos fallas en procesos de fatiga y bajo nivel de corrosión.

Todas las aleaciones son resistentes al ataque atmosférico y el estar expuestas a la intemperie tienen mayor resistencia las que tienen más del 80% de cobre [9].

Bajo este fundamento también estoy enfocando una parte del análisis a la revisión de las temperaturas de extrusión y enfriamiento del metal para definir los parámetros ideales que permitan tener las soleras con las propiedades requeridas y el material también tenga la misma funcionalidad. [15].

2.1.1. Formación y estructura del tamaño de grano

El grano ó la conformación del mismo dentro del metal, nos ayuda e influye en el comportamiento físico mecánico de las soleras, ya que esta estructura metalográfica ó granular del metal permite que el material tenga la maleabilidad y la uniformidad en el trabajo mecánico donde sea empleado.

Todos los productos metálicos en su transformación, se obtienen a través de diferentes procesos y éstos para garantizar su homogeneidad inician su conformación en estado

líquido, posteriormente pasa al estado sólido y, en esta solidificación adquiere sus propiedades vitales mediante las etapas siguientes:

Nucleación: Etapa inicial con formación de pequeñas partículas llamadas "núcleos".

Crecimiento: Posterior a la nucleación se da el crecimiento de estos núcleos a medida que desciende la temperatura. Durante la solidificación están presentes las dos fases, líquida y sólida (Figura 1). [19]



Figura 1. Crecimiento de núcleos [19]

Estructura granular

La estructura granular está dada en función del tamaño de grano, el tener una uniformidad en esta nos genera un beneficio enorme en el comportamiento físico-mecánico, ya que a menor tamaño de grano, se reducen las fracturas en los lingotes y proporciona una estructura más homogénea, así como buenas propiedades mecánicas al producto final.

Si no se tienen la forma de generar un tamaño de grano reducido en forma natural a través de composición y enfriamiento se tiene que recurrir a uso de compuestos químicos que ayuden al proceso de nucleación, en este caso se utilizan refinadores de grano para ayudar a la conformación de los mismos en el producto fabricado.

La calidad del material en su utilización posterior como: estirado y/o aplanado (deformación), dependerá en gran medida de dos características que son: el tipo de grano (la forma, tamaño y orientación, y la ubicación y distribución de estos granos (Figura 2).

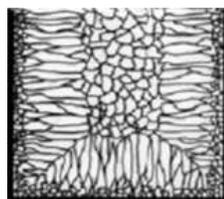


Figura 2. Estructura granular [19]

La conformación del grano es de vital importancia ya que mientras los granos sean pequeños se tiene una dureza de material uniforme a lo largo del producto realizado, además de que en los procesos de manipulación del producto como torsión, doblado y maquinado no presenta defectos superficiales el mismo.

Granos de tipo suave, nos genera una dureza baja y en la manipulación del producto se tendrán reventamientos, fisuras y apariencia rugosa en los productos.

Finalmente, un grano intermedio no es aceptable por las variaciones que el material puede tener en su manejo, ya que la falta de uniformidad generará agrietamiento y porosidad interna en las piezas, que de ser sometida a esfuerzos, terminará con problemas de reventamiento del mismo.

Estos tipos de conformación se pueden observar en la figura 3.

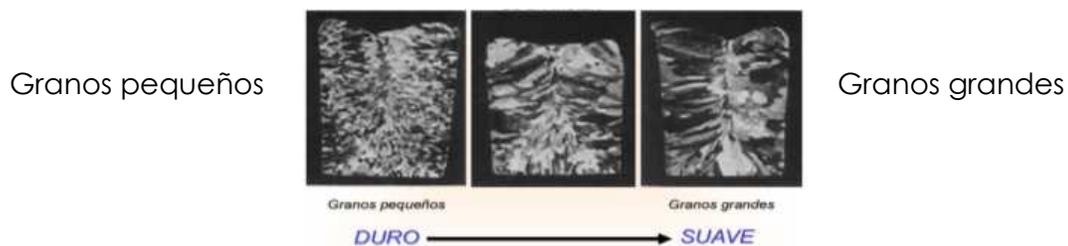


Figura 3. Tamaño de grano [19]

Es de suma importancia el estudio de los procesos de deformación. Debido a que se aplica en la elaboración de barras, soleras, perfiles, cintas, lámina, etc.

Además de mencionar que los procesos de deformación pueden modificar la estructura cristalina y por tanto las propiedades mecánicas de los materiales. [19]

Cuando el material pasa por un proceso de deformación, la estructura granular cambia debido al aumento de temperatura causada por la fricción entre los granos, la fricción del material con la pastilla del dado estirador provoca que los granos se compacten provocando así un endurecimiento del material (Figura 4). (19)

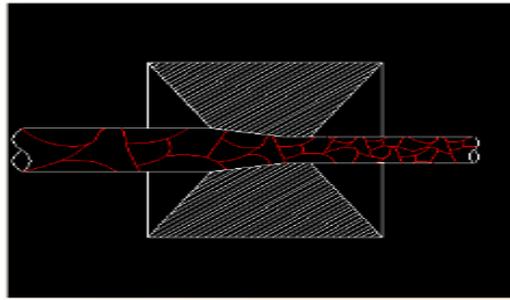


Figura 4. Cambio en la estructura granular [19]

Cambio de la estructura granular

Cuando una aleación se deforma plásticamente, se producen defectos en la red cristalina y, estos defectos junto con la deformación elástica (tensionado) sirven como mecanismos para el almacenamiento de energía en la aleación. [17]

En el proceso de estirado que es el principal para fabricar la soleras y perfiles de cobre, se obliga al metal a trabajarse en frío, durante este trabajo en frío, solo el 10% de la energía es ocupada en la deformación el resto es calor generado por la fricción del metal con el dado de estirado, otras propiedades que se afectan lo es la conductividad eléctrica y la resistencia de las piezas. [19]

Otros problemas de estructura granular que se presentan en la pieza son la presencia de dislocaciones, vacancias, átomos intersticiales, fallas de apilamiento y límites de maclas (Figura 5). [17]

Efecto del trabajo en frío sobre la microestructura

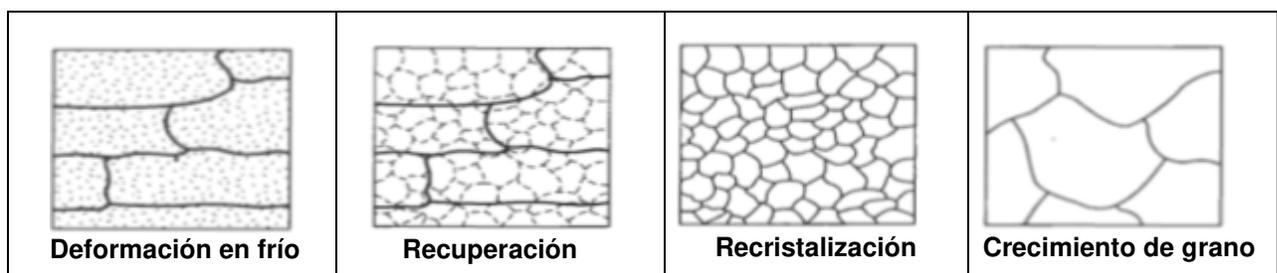


Figura 5. Recristalización de la micro estructura [19]

El crecimiento anormal de grano (también llamado crecimiento exagerado de grano) es un tipo de engrosamiento de micro estructura en la cual algunos (o pocos) granos grandes crecen inusualmente rápido en una matriz de grano fino con una velocidad de crecimiento muy lenta. [19]

Se reconocen tres factores principales que pueden resultar en crecimiento anormal de grano:

- La presencia de distribuciones especiales de partículas de fases secundarias que actúan como inhibidores del crecimiento normal en la mayoría de los granos del material, excepto en algunos granos especiales.

Esta está dada por la diferencia de temperaturas en el proceso de enfriamiento tanto del molde de grafito al fabricar los lingotes, así como en la tina de enfriamiento al contacto del lubricante de enfriamiento con el producto extruido, donde con una mayor temperatura no permitirá la conformación del tamaño de grano de manera más rápida.

- La existencia de granos con orientaciones de crecimiento preferenciales, derivada del proceso específico de fabricación que al momento de realizar los procesos de estirado, el grano tiende a ser columnar en las secciones superficiales sobre todo su contorno y, en el centro se presenta otra conformación de éstos, tendiendo a ser más reducida.

- La anisotropía en la formación de los granos genera materiales con problemas de manejo en los dobleces y otros defectos de apariencia superficial. [8]

Esta última nos genera que el material tenga que buscarse someter al menor estrés posible en los estirados para no afectar las variaciones de grano.

Se puede reestructurar el tamaño de grano a través de un proceso de recocido, pero este proceso en la planta en estudio no se tienen los recursos ni el horno requerido para tenerlo instrumentado en línea y, de ahí que se dio a la tarea de buscar todos los demás parámetros que nos permitan lograr la conformación homogénea y un tamaño de grano de rango pequeño, que ayude en todo el proceso de determinación de las propiedades físico-mecánicas.

Los métodos que nos ayudan a mejorar la conformación del tamaño de grano son:

- Enfriamiento
- Agitación mecánica, electromagnética y vibración
- Adición de refinador de grano [20]

En el primer método, la estructura fina del grano es formada durante el control del crecimiento de grano en el proceso de solidificación, donde en enfriamiento que se tiene al manejar un buen gradiente de temperatura entre las paredes y el centro de la pieza, ayuda a ser un factor relevante para la formación de la micro estructura [16, 20].

El segundo método se hace mecánicamente con el uso del electromagnetismo llevando en la fusión y generando una extracción de impurezas y homogenizando los granos del metal principal.

El tercer método es adicionar refinadores de grano, éste ayuda en los procesos actuales ya que homogeniza los granos y éstos se distribuyen de manera uniforme, este efecto se llama nucleación.

La nucleación se lleva a cabo con la ayuda de una aleación maestra ó introducen sales al proceso de fusión y esto genera la reacción en la conformación de la estructura molecular del metal [20].

A manera de ejemplo, "Un efecto nucleante en la aleación C66400 (86.5 Cu – 11.5 Zn – 1.5 Fe - 0.5 Co) denominada Latón modificado Bajo Zinc, se observa el agregado de Fe y Co con la finalidad de generar una dispersión en la matriz de partículas inter metálicas, si bien estas partículas reducen apenas la conductividad, también aumentan la resistencia a la corrosión bajo tensión" [18].

La nucleación y el crecimiento de grano son dos pasos principales para la variación de la micro estructura logrando un aumento de la resistencia mecánica con una menor aplicación de trabajo en frío, con este último, se cambia la micro estructura y provoca endurecimiento de las piezas. [19]

Existen dos relaciones, entre la formación y crecimiento del núcleo:

- 1.- Nucleación lenta y crecimiento acelerado, donde se forman granos grandes con pocos núcleos.
- 2.- Formación rápida del núcleo y crecimiento lento, donde se genera una estructura de muchos cristales entre sí y lento.

En esta situación se forman muchos cristales entre sí y de tamaño pequeño.

Conductividad eléctrica

Además de mencionar que la formación de núcleos reduce de manera significativa el número de dislocaciones, por lo tanto el material disminuye su resistencia y aumenta la ductilidad, lo que ayuda a reducir la presencia de cascara de naranja en el producto terminado.

En términos de conductividad eléctrica, el material mejora sus valores, el cual evaluado bajo la normatividad IACS "International Annealed Copper Standard", esta debe estar cercana al 100%.

La figura 6 presenta el efecto de las impurezas y efectos del agregado de aleantes secundarios, en la conductividad del cobre.

Aquellos elementos muy insolubles en el cobre tienen poco efecto sobre la conductividad, ya que están presentes como partículas discretas, añadidas intencionalmente para mejorar la maquinabilidad de cobre de alta conductividad.

[19]

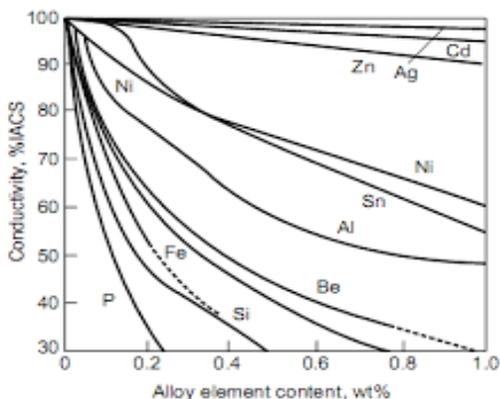


Figura 6. Efecto de los elementos de impurezas en la conductividad eléctrica [19]

El efecto del oxígeno beneficia la mezcla, ya que algunas contaminaciones ó impurezas insolubles se combinan con este generando óxidos en lugar de estar en forma sólida dentro de la solución metálica. Es decir, mientras más concentración de impurezas esté diluida en el metal, éstas reducirán la conductividad, y dentro de las más perjudiciales en las aleaciones que fabricamos en nuestras soleras lo es el fósforo (P).

2.1.2. Apariencia y características

El cobre por su apariencia es de color marrón rojizo pardo, brillante, maleable y dúctil, más pesado que el níquel y más duro que el oro y la plata. Es el metal mayormente utilizado en el mundo por su abundancia en la corteza terrestre en combinación con otros 24 elementos. [14]

El cobre es un metal denominado como súper conductor de alta temperatura [5].

El cobre muestra una amplia posibilidad de ser aleado con otros metales, cuando es aleado, le dan diferentes características tales como modificación en:

- Resistencia mecánica en función de la temperatura de procesamiento.
- Resistencia a la corrosión
- Soldabilidad con otros metales
- Resistencia al reblandecimiento
- Maquinabilidad, etc. [4]

Dentro de las principales aleaciones del cobre tenemos:

- Cobre fosforo (cobre reducido en óxidos),
- Cobre plata (con alta conductividad eléctrica),
- Cobre bajo oxígeno (alta conductividad y mínima micro porosidad),
- Cobre azufre (maquinable con maleabilidad para su procesamiento),
- Cobre telurio (alta dureza y maquinabilidad excelente),
- Cobre zinc (latón maquinable),
- Y otros de menor uso como cobre-cadmio, cobre-berilio, cobre-níquel, cobre-silicio.

En todos los casos el elemento de alto contenido >95% es el cobre y los aleantes varían.

La aleación a analizar en este estudio será la C-11000, la cual su composición química dada en la norma ASTM B-187 se muestra en la figura 7:

ALEACION ASTM B-187	COMPOSICION								TOTAL
	COBRE	ZINC	PLOMO	ESTAÑO	TELURIO	AZUFRE	NIQUEL	FOSFORO	
C-11000	99.940%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.010%	0.005%	0.005%	100.000%

Figura 7. Composición química del cobre según ASTM-B187 [13]

El cobre, en función de los aleantes en su preparación, cambia sus propiedades, ver tabla 1.

Tabla 1. Efecto de los elementos en aleaciones de cobre [10]

Elemento Aleación	Efecto
Hierro	- Aumenta la resistencia mecánica
Aluminio	- Aumenta la dureza y resistencia mecánica
	- Aumenta la resistencia a la corrosión y desgaste
	- Disminuye la ductilidad
Manganeso	- Aumenta la dureza y resistencia a la tracción
	- Inhibe el crecimiento de grano
	- Disminuye la ductilidad
Cromo	- Aumenta las propiedades mecánicas
Telurio	- Aumenta las propiedades mecánicas, dureza y maquinabilidad
Berilio	- Aumenta la dureza
Fósforo	- Aumenta la resistencia a la tracción
	- Aumenta el límite de fatiga
	- Disminuye la conductividad

2.2. SOLERAS DE COBRE

La solera es una barra del metal especificado, la cual tiene una forma rectangular con orillas o extremos en escuadra o redondeados y de longitudes diversas, en especial se utiliza el cobre para su fabricación principalmente cuando se requieren propiedades mencionadas como maleabilidad, conductividad, resistencia térmica, resistencia mecánica y maquinabilidad principalmente.

Se ha empleado como un material de alto uso eléctrico ya que permite la transferencia de electricidad en voltajes arriba de 120 V y superiores, por su forma reducen los riesgos de calentamiento excesivo y ayuda a disipar el mismo sin afectar los componentes eléctricos en los que esté instalándose este tipo de producto. Ver (Figura 9).



Figura 8. Foto soleras IUSA - <http://www.iusa.com.mx>

2.2.1. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las soleras de cobre actualmente puede realizarse por 3 métodos, los cuales se describen a continuación:

- 1.- Extrusión de lingotes y estirado barras de cobre
- 2.- Colado y rolado o laminado en caliente de barras de cobre
- 3.- Extrusión continua en caliente.

Cada uno de estos procesos nos da en las soleras de cobre características similares y con variabilidad en los tamaños de grano y resistencia de los materiales.

Extrusión de lingotes de cobre y estirado de barras y soleras

Este proceso inicia con la recepción de materias primas (cátodo de cobre y chatarra de 1ª.) y metales aleantes contenidos en estos materiales, realizándose los siguientes pasos con estas:

- Fusión de metal
- Análisis químico de baño metálico
- Colado o lingoteado de metal
- Análisis químico de lingotes de cobre
- Calentamiento de lingotes a 850 °C
- Extrusión de cobre en prensa extrusora directa o indirecta
- Fabricación de punta a soleras, perfiles y/o barras de cobre
- Estirado de material a medida final
- Tensionado – enderezado del material estirado
- Dimensionamiento y corte de soleras, barras y perfiles requeridos
- Limpieza e inspección del producto y
- Empaque e identificación de soleras de cobre

Ver Figura (09)

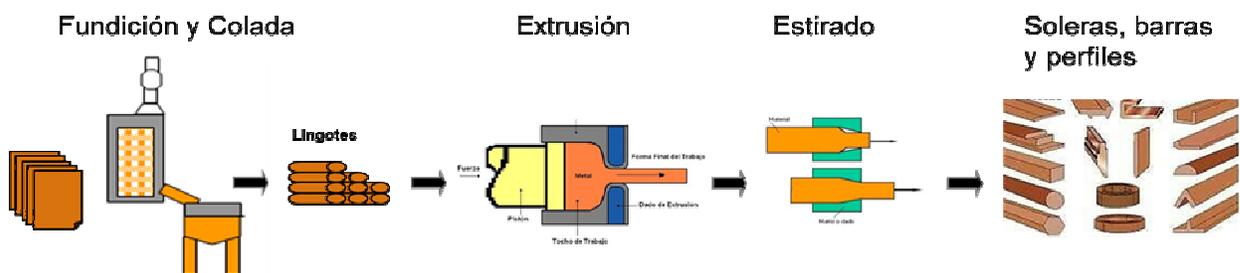


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de soleras

Extrusión

Se entiende como la transformación que sufre un lingote normalmente cilíndrico, que es obligado a fluir a través de un dado con la forma requerida, obteniendo el perfil, que puede ser sólido o hueco, de sección transversal constante (Figura 10). [1]

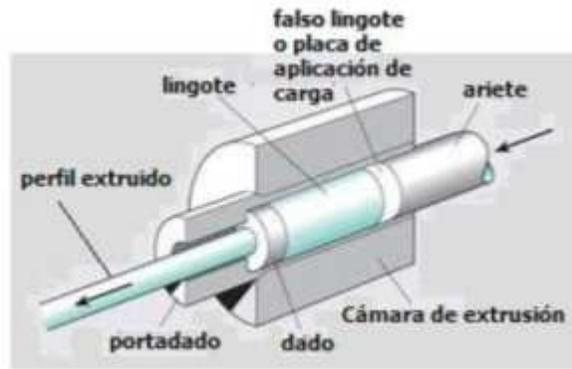


Figura 10. Descripción esquemática del proceso de extrusión [1]

Tipos de extrusión

Extrusión directa

En este caso el metal extruido fluye en la misma dirección que el pistón (Figura 11).

Se considera entonces que el lingote se desplaza con respecto a la cámara de compresión durante el proceso, dando como resultado que la presión sea función de la longitud del lingote [1].

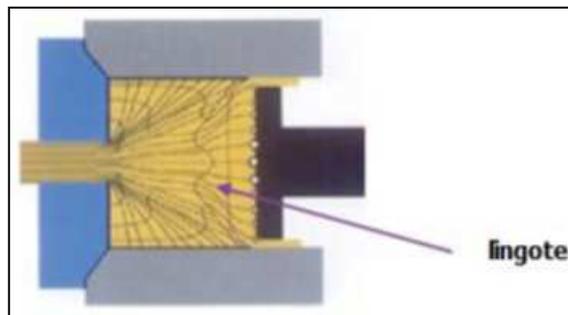


Figura 11. Flujo del material en extrusión directa [1]

Extrusión indirecta

El metal fluye en dirección opuesta a la del movimiento del pistón; en este caso el dado se encuentra montado regularmente en un ariete, ram ó stem hueco (Figura 12).

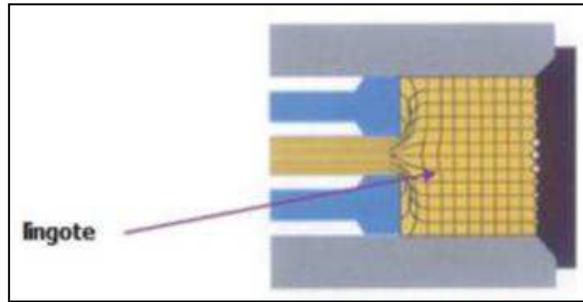


Figura 12. Flujo del material en extrusión indirecta [1]

No existe movimiento relativo entre la pared del contenedor y el tocho, sin embargo existe mucha presión entre el lingote y la pared del mismo, lo cual se traduce entonces en que la carga de extrusión que se requiere aplicar es menor que en una extrusión directa y, el proceso resulta en un menor tiempo de ciclo si se comparan extrusiones de igual configuración en ambos tipos de extrusión.

Es conveniente mencionar que debido a las características del proceso, éste tiene limitaciones y requiere además de un herramental más complicado de fabricar, lo cual restringe su campo de aplicación, dando como resultado que la extrusión directa sea el método más utilizado (1).

Flujo de material en el proceso de extrusión

Para obtener la máxima eficiencia del proceso es necesario tener plena conciencia de los fenómenos que se ven involucrados en él. Por tal motivo, muchos de los trabajos de investigación se han desarrollado con la finalidad de conocer las características de flujo de un lingote metálico durante el proceso de extrusión. Uno de los investigadores que más aportó en este campo fue Pearson (1944), quien a principios de la década de los cuarentas publicó por primera ocasión su obra.

El problema más grave que presentan estos estudios es que el patrón de flujo del material varía con el tiempo durante el ciclo [1].

De los experimentos realizados se identificaron tres patrones de deformación (Figura 13), cuya diferencia se atribuyó a la fricción entre el lingote y la cámara.

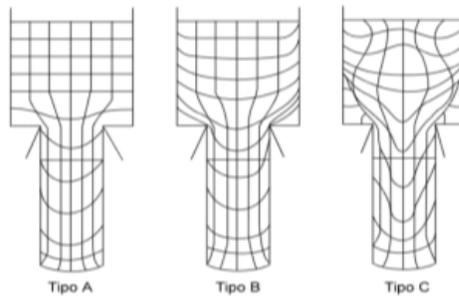


Figura 13. Patrones de flujo en el proceso de extrusión [1]

El tipo A se presenta cuando no existe fricción entre el contenedor y el material, por lo tanto, es típico de extrusión invertida o también en donde la relación de extrusión es muy pequeña y el material fluye más libremente. En este caso las líneas perpendiculares a las del flujo sufren distorsión sólo hasta que se encuentran en la cercanía del dado; una vez en la vecindad de éste, la superficie del lingote se deforma y la región central fluye rápidamente.

El tipo B se caracteriza por la presencia de un componente de fricción de limitada influencia.

El tipo C muestra el patrón de flujo cuando existe fricción sin deslizamiento entre el lingote y el contenedor. En este caso se forma una zona muerta a partir de la placa de apoyo del contenedor y se extiende hasta el extremo opuesto del lingote. El flujo genera turbulencia horizontal hacia lo largo y por debajo de la superficie del lingote. Este patrón es típico de la extrusión directa, principalmente con cobre y aluminio [1].

Defectos característicos de la extrusión

Existe una gran diversidad de imperfecciones que pueden presentar los perfiles extruidos. A la más conocida se le denomina "Defecto de extrusión". Existen también problemas por la heterogeneidad del producto, agrietamiento, ampollas y rayas. Estos defectos pueden tener su origen en el lingote, en problemas de imperfecciones o diseño del herramental o en las condiciones del proceso [1].

Los defectos de extrusión se caracterizan por la presencia de rugosidad o discontinuidades internas provenientes de las zonas superficiales del lingote, cuando están sucias u oxidadas. Por la forma en que se presenta el flujo del material (Figura 14),

una vez que se ha extruido aproximadamente 2/3 del lingote su superficie forma la zona interior del perfil. Para evitar lo anterior será necesario descartar el 30% del lingote, lo cual es antieconómico, o bien emplear un cojín de apoyo (falso lingote) de diámetro inferior a la cámara, con su auxilio se forma una cáscara o calavera mediante la cual se elimina la superficie oxidada [1].

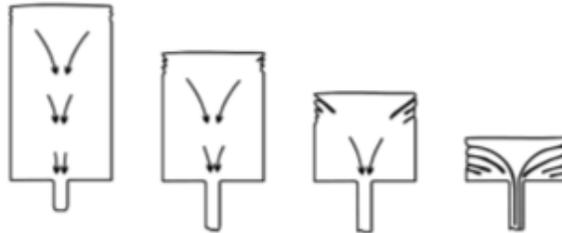


Figura 14. Formación del defecto de extrusión [1]

Esta mecánica de operación se puso en marcha en el proceso de análisis a efecto de evaluar la disminución de las imperfecciones y defectos muestreados, esa camisa nos permitió jugar con una variación mínima de diámetros entre el diámetro del contenedor donde va alojado el lingote y el cuerpo del dado de extrusión que genera el empuje en la extrusión directa, esa camisa ó cáscara que se obtuvo, por el movimiento interno del metal las impurezas y porosidades se van hacia los extremos del lingote y al final al compactarse, se queda la cascarilla con toda la oxidación y metal con inclusiones y demás problemas de calidad que el lingote llevara dentro de su conformación al ser lagoteado.

Estos materiales de desecho se regresan y vuelven a fundir en el proceso de colada y se endulza (mete con metal virgen) para mejorar las propiedades químicas del nuevo lingote a fabricar.

Falta de heterogeneidad

Se debe a las diversas condiciones que presenta el lingote durante el proceso. Lo anterior se refleja en variación del tamaño de grano a lo largo del eje de la barra. Dicha problemática presenta diversos orígenes, entre los que se pueden mencionar el diseño del dado y la velocidad de extrusión [1].

Grietas

El agrietamiento o resquebrajamiento transversal de la sección extruida se presenta en extrusión directa fundamentalmente. Son causadas normalmente por temperaturas demasiado elevadas (cercanas a las de fusión incipiente del metal), aunque también se puede tener el mismo efecto por una velocidad excesiva y altos coeficientes de fricción, lo que se traduce entonces en un incremento de la temperatura del lingote. Estas fallas pueden no ser aparentes, manifestándose ya en uso de la barra ó perfil, ó al efectuar algún tratamiento térmico al material [1].

Rayas

Se pueden deber a un mal acabado del dado, a lubricación inadecuada o a una excesiva velocidad del proceso. Se caracterizan por ser paralelas a la dirección de extrusión [1].

Ampollas

Son aquellas sopladuras que aparecen en el perfil y cuyo origen está en los gases adquiridos por el metal en su proceso de fusión, o también en las porosidades del lingote ó las adquiridas por imperfecciones y grasas presentes en el contenedor al momento de estar en el proceso de extrusión en la cámara de alojamiento del contenedor de la prensa y se van en el producto dependiendo de su localización y el flujo del metal en el proceso de conformación de la barra. [1]

Lubricación de dados de extrusión

La lubricación es importante en la extrusión en caliente, anteriormente se utilizaban grasas fabricadas con base de polvos de vidrio, el cual es un lubricante excelente para los aceros, aceros inoxidable, metales y aleaciones para alta temperatura. En un proceso desarrollado en la década de 1940, llamado "Proceso Séjournet", se coloca una placa circular de vidrio en la entrada del dado, en la cámara. El lingote caliente transfiere el calor a la placa de vidrio, que al fundirse actúa lubricando la interface del dado a medida que avanza la extrusión. Antes de poner los lingotes en la cámara, se recubre su superficie cilíndrica con una capa de vidrio en polvo para proporcionar el lubricante en la interface entre él y la cámara [2, 22].

Para metales con tendencia a pegarse a la cámara y al dado, el lingote se puede encerrar en un recipiente de pared delgada hecho de un metal más suave y de menor resistencia, como cobre, bronce o acero suave. A este proceso se le llama enchaquetado o enlatado. Además de formar una interface con baja fricción, esta chaqueta evita la contaminación del lingote por el ambiente [2, 22].

Elementos fundamentales de una prensa de extrusión [1]

Los elementos básicos de cualquier prensa de extrusión (Figura 15) son:

- 1.- Cabezal fijo (Ram Principal)
- 2.- Contenedor o cámara de compresión
- 3.- Dado con sus elementos de soporte
- 4.- Pistón con ariete para ejercer la presión sobre el lingote
- 5.- Sistema hidráulico con sus bombas y acumuladores y
- 6.- Sistema de control

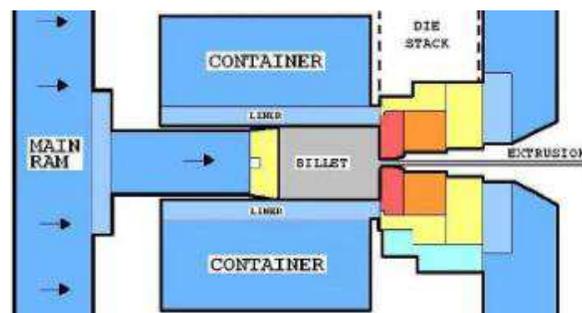


Figura 15. Componentes de la prensa de extrusión [1]

Un elemento de relevancia son los dados de extrusión y estirado, desde el punto de vista de la deformación, el dado es la pieza más importante, éste es sometido a grandes cargas de compresión, así como a desgaste, choque térmico y oxidación. Su precisión y acabado son determinantes en la calidad dimensional del producto fabricado [1].

Los dados o matrices de extrusión se pueden fabricar como:

Dado plano

Dado en las que el semi ángulo de entrada es de 90° (Figura 16). El metal al fluir a través del dado forma una zona muerta, dando lugar así a su propio ángulo de entrada.

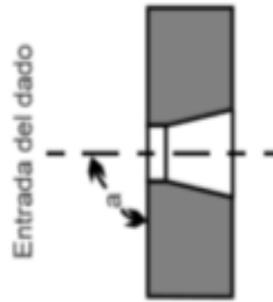


Figura 16. Dado plano [1]

Dado con entrada cónica

Se maneja este dado cuando se requiere una buena lubricación. Contar con un ángulo de entrada se logra una mayor homogeneidad en la deformación, además de que se reduce la presión de extrusión. Normalmente dicho ángulo varía entre los 45° y 60° (Figura 17) [1].

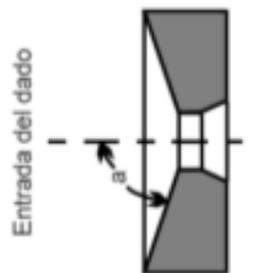


Figura 17. Dado entrada cónica [1]

Estirado

El estirado es el proceso que permite mayor flexibilidad en la manufactura de barras, perfiles y soleras, ya que parte de éstas con la forma predefinida y la holgura necesaria para que a través de pasarlo por un dado de estirado en frío y un proceso de

lubricación, pueda ser jalado y realizar el estirado, reduciendo dimensionalmente el material y ésta en función del porcentaje de reducción efectuado a través de un dado de carburo ó diamante, se obtiene su medida final. (Ver Figura 18).

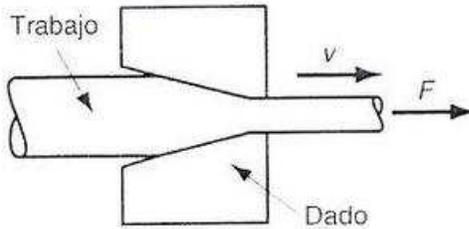


Figura 18. Proceso de estirado de barras [2]

Este tipo de proceso, genera productos con mayor resistencia mecánica, ya que la conformación del tamaño de grano es más reducida respecto a manipulación en caliente, este tamaño de grano como se mencionó anteriormente dependerá del grado de reducción requerida entre la barra extruida y la reducción aplicada.

En el estirado o trefilado, la sección transversal de una barra o alambre se reducen o cambian jalándolos a través de un dado o matriz. Las variables principales en el estirado se parecen a las de la extrusión: reducción de área transversal, ángulo del dado, fricción a lo largo de la interface dado – pieza y velocidad de estirado. El ángulo del dado influye sobre la fuerza de estirado y la calidad del producto [2].

Dependiendo de las características físico-mecánicas que se requieran de la barra ó solera sean estas, la resistencia a la tensión, elongación, dureza y tamaño de grano, se debe de manejar diferentes valores de reducción en el proceso de estirado.

Mayor % reducción en diámetro → mayor resistencia a la tensión → Menor elongación

Lubricación de dados de estirado

Es esencial la lubricación adecuada en el estirado para mejorar la vida del dado, ésta reduce las fuerzas y la temperatura en el proceso, así como mejora el acabado superficial.

Las clases básicas de lubricación son las siguientes:

Estirado en húmedo: Los dados y la varilla se sumergen por completo en el lubricante, que normalmente está formado por aceites y emulsiones con aditivos grasos y clorados y se complementa con diversos compuestos químicos.

Estirado en seco: La superficie de la solera o barra por estirar se recubre con un lubricante, como por ejemplo jabón, haciéndola pasar por una caja llena de éste, la cual se denomina como caja de aditivos.

Recubrimiento: Las barras, soleras ó alambres se cubren con un metal suave que funciona como lubricante sólido. Por ejemplo, el cobre o el estaño se pueden depositar químicamente sobre la superficie del metal para darle suavidad al proceso de estirado.

Vibración ultrasónica: Esta técnica se ha usado con éxito para reducir la fricción al estirar secciones sólidas o huecas, así como en otros procesos de trabajo con metales. Cuando aplica debidamente, éstas reducen el esfuerzo mecánico, mejora el acabado superficial y la vida del dado, permiten mayor reducción por pasada y no genera fallas.

Defectos en las soleras y esfuerzos residuales

Los defectos que se presentan en el producto, tanto en extrusión como en estirado son variados, se han mencionado los que presentan mayor incidencia, pero tenemos otros como:

- Agrietamientos en el centro de las piezas
- Traslapes (desprendimientos laminares de tipo longitudinal)
- Rayas y marcas por mal pulido ó fisuras de los dados empleados
- Burbujas o reventamientos derivados de parámetros de extrusión, estirado ó falta de lubricación

Como los productos estirados en frío sufren deformación no uniforme durante el estirado, suelen tener esfuerzos residuales. Cuando las reducciones son pequeñas, los esfuerzos superficiales longitudinales residuales son de compresión, mientras que el centro está en tensión; de este modo se mejora la vida de fatiga. Caso contrario,

cuando las reducciones son mayores, inducen esfuerzos superficiales de tensión mientras que el núcleo está en compresión.

Estos esfuerzos residuales, generan agrietamiento en la pieza y también al paso del tiempo causan que los materiales se tuerzan, teniendo que aplicar procesos subsecuentes para enderezar, alinear ó lograr la pieza dentro de dimensiones.

Colado y rolado o laminado en caliente de barras y soleras de cobre

El proceso de colado es similar al proceso anteriormente descrito, ya que la fusión se realiza en hornos eléctricos con bobina externa sin centro o con bobina central inferior y ranura de circulación de material.

El rolado o laminado en caliente usualmente se efectúa entre 900°C y 950°C, que es la temperatura ideal para que el planchón tenga las propiedades de maleabilidad o plasticidad y, sea fácil de manipular, pasa a través de rodillos y se somete el material a una fuerte presión, el material va fluyendo a lo largo de moldes o guías para ir conformando las barras, perfiles y/o soleras deseadas [11] (Figura 19).

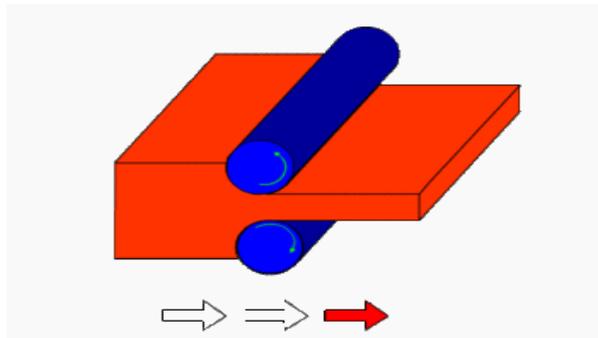


Figura 19. Proceso rolado y/o laminado en caliente [11]

El trabajo en caliente genera tamaños de grano grandes, teniendo materiales con menor dureza, su manipulación mecánica es menos complicada, y si se requiere terminar el material con mayor resistencia, deberá realizarse un estirado o conformación final de la pieza, ya con un proceso de estirado en frío, con esto se logra una mejor re cristalización de los granos del material. El rolado en caliente por su

naturaleza no requiere utilizar procesos de recocido para eliminar tensiones en el material procesado.

Las etapas del laminado o rolado en caliente son:

- Materias primas
- Fusión de metal
- Análisis químico de baño metálico
- Colado de barra o planchón de cobre
- Laminado/prensado de planchón "n" veces hasta obtener el espesor deseado
- Corte al ancho y longitud deseada del producto
- Perfilado de orillas requerido por producto
- Limpieza e Inspección del producto y
- Empaque e identificación de la barra o soleras

Extrusión continua en caliente de perfiles y soleras de cobre

Este proceso es lo más eficiente y productivo que se tiene actualmente para la fabricación de soleras, ya que parte del principio de realizar una extrusión a partir de una barra o alambón del mismo material, la cual se somete a una alta presión en una cámara de rodillos de acero, la cual presiona y la presión interna que se genera en la cámara de compresión, eleva la temperatura del metal hasta unos 800 a 850 °C y va desplazando el material para salir por el otro extremo del equipo a través de una boquilla con la dimensión y forma final para el caso de materiales suaves ó, la medida previa para soleras con requerimientos de mayor dureza. (Figura 20).

El equipo que actualmente realiza este proceso es el denominado "Conform", que viene del término conformado de material.

Este proceso da al producto final las propiedades similares a las del proceso de rolado en caliente, ya que el procesamiento previo y final se maneja una alta temperatura de formado que permite dar las características de maleabilidad más adecuadas al producto.

Etapas del proceso

- Fusión de metal en hornos de colada continua de alambrón, preferentemente libre de oxígeno, ya que este material tiene porosidad mínima, evitando que en la compresión el material genere burbujas y laminación
- Enfriamiento y enderezado de barra o alambrón
- Extrusión a presión en caliente a través de equipo Conform
- Enfriamiento de perfil o solera de cobre y limpieza de oxidación del material
- Enrollado de producto terminado en medida final o pre-final
- Estirado y/o corte a medida final requerida para soleras con requerimientos de mayor resistencia ó dureza
- Empaque e identificación de soleras

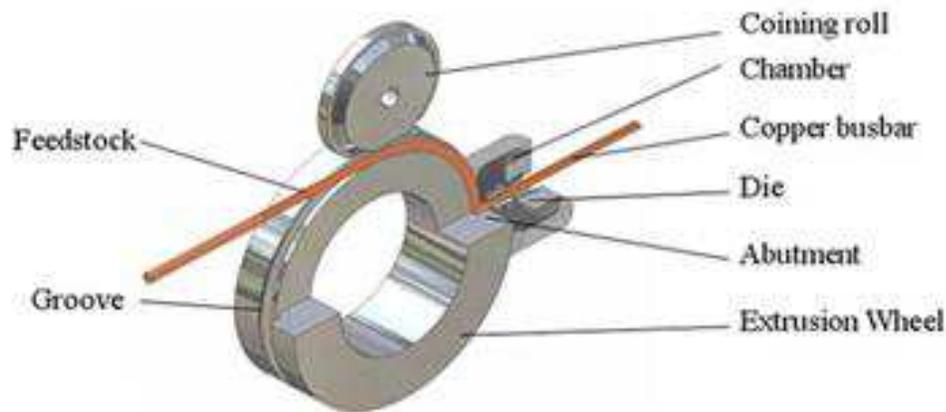


Figura 20. Sistema extrusión continua de cobre [12].

2.3. RENDIMIENTO DE METAL

Rendimiento de metal está definido como la proporción o porcentaje que obtenemos de producto terminado en función de la cantidad inicial ingresadas de material inicial en un proceso de fusión y transformación.

En términos prácticos:

Si empleo 100 kgs. de material de manera inicial, al final del proceso, cuantos kilos de metal procesado como producto terminado, obtengo, pasando los procesos, sin agregar materiales adicionales a la receta predefinida, en cualquier sistema de fabricación.

El rendimiento del proceso metalúrgico de nuestro estudio está asociado de diferentes factores que influyen en todas las etapas de éste, los cuales se pueden enumerar a continuación:

1. Porosidades en los lingotes
2. Contenidos de oxígeno en el producto
3. Impurezas o contaminación contenida (níquel, fierro, aluminio, estaño, etc.)
4. Inclusiones metálicas y no metálicas
5. Tamaño (diámetro y longitud) del material procesado
6. Condiciones de extrusión (Temperatura de precalentamiento lingotes, presión aplicada y velocidad de extrusión)
7. Dimensiones de materiales solicitados
8. Diseño de los productos requeridos
9. Porcentajes de reducción aplicados en el estirado de material
10. Lubricación del material en los procesos de extrusión y estirado
11. Datos herramienta empleadas en extrusión y estirado, diseño, limpieza y pulido de éstos
12. Limpieza y otras herramientas empleadas en todo el proceso de fabricación desde la extrusión, hasta el corte, limpieza de todas las áreas del proceso hasta el empaque del producto terminado

Existen diferentes análisis de rendimiento de metales, pero los más comunes dentro de la metalurgia, se enfocan a solo medir la pérdida de metal en el proceso de fusión ó baño metálico, lo que se le conoce como pérdida metalúrgica.

Esta es el resultado del proceso químico de fusión y los niveles de separación de cobre de otros aleantes, sus puntos de fusión y la propia óxido-reducción del metal, que es la transferencia atómica de electrones en la composición química del cobre mezclado, que a través de una reacción química permite la transferencia de electrones. [6]

Este valor de pérdida de metal, es sólo un pequeño eslabón de lo que significa el término global de rendimiento de metal bueno (RMB), y se enmarca en términos de porcentaje, como un valor determinado a partir de la cantidad de metal manejada desde el inicio del proceso hasta tener el producto resultante, a través del cual se lleva

la cuantificación del control de desperdicios, e ir evaluando lo que va generándose paso a paso durante el proceso; al final este resultado nos permite a todo proceso poder determinar un valor de materia prima inicial requerida, para obtener "x" producto terminado en el proceso en estudio.[7]

El rendimiento de metal también está influenciado por los materiales que empleamos, las propiedades físico-mecánicas de los lingotes como producto primario y la diversidad de productos que fabricamos como barras y soleras.

Lo anterior implica que las condiciones de los procesos que se emplean para su manufactura, las cantidades de cada uno de estos, así como las dimensiones de la sección transversal de cada producto, nos hacen que el requerimiento neto de metal sea diferente y por consiguiente los desperdicios sean variables.

Entre más variabilidad de medidas sean requeridas en todo proceso, mas diversidad de cantidades de remanentes, puntas y colas tendremos en los procesos de extrusión, estirado y acabado, éstos disminuyen el volumen neto a obtener de fabricación, afectando el rendimiento total del proceso, sin embargo esto es un valor controlable después de haber puesto en marcha la determinación de manejar en la fabricación diferentes longitudes de lingotes para optimizar el uso del metal que se emplea en cada medida de producto terminado.

Otro factor determinante en el comportamiento del producto y que afecta el rendimiento es la composición química, cada uno de los metales empleados en la aleación, aunque estén todos dentro de una normatividad ASTM, la cual específica para cada aleación los rangos específicos de cada elemento químico para cada una, estos al procesarse primero como lingote y posteriormente como barras, soleras ó perfiles, el uso específico de cada producto hace que la composición de cada aleación y en este caso la que nos enfocamos en este estudio C-11000, debamos identificar los parámetros más cerrados posibles de los rangos de la normativa y que estos nos ayuden a mejorar el desempeño del material y que en la procesabilidad del producto, tengamos la maximización de uso del metal.

Cada compuesto ó aleante químico genera como lo hemos mencionado anteriormente, diferentes características de dureza, resistencia a la tensión, maleabilidad, dureza y elongación al producto y esto debe ser bien identificado para que las hojas de proceso de cada lingote sean acordes a los requerimientos finales a ser procesados.

Después de varios ejercicios y pruebas de composición y determinación de tamaño de grano, hemos logrado tener una mejor delimitación de los valores a manejar en una receta de fabricación de lingotes y parámetros de operación tanto en extrusión como en estirado del material, para que los productos tengan el mejor comportamiento al ser sometidos a deformaciones, maquinados, dobleces, esfuerzos y otro tipo de manejos físico-mecánicos que sean requeridos para ser parte de un producto final.

Lo anteriormente expuesto más las condiciones de operación nos llevan al siguiente factor que se somete más adelante a pruebas, como lo es la conformación de la estructura del metal y principalmente en lo que denominamos el tamaño de grano y lograr que éste sea isotrópico, ya que la dirección del mismo (longitudinal ó transversal), nos genera variaciones en el manejo del material. Más adelante se muestran los resultados de diferentes escenarios de composición, temperaturas y conformación del grano en la estructura.

El manejo de las especificaciones y la normatividad de materiales es el resultado de pruebas de funcionalidad de los diferentes materiales y productos para los que está destinado cada uno, por lo que una vez concluido este estudio, sobre la base de cumplir la reglamentación de materiales respectiva, tenemos valores específicos de algunos materiales y estructura ya resultantes, que permiten poder dejar establecido parámetros de tamaño de grano, composición química, contaminantes y parámetros de proceso, para poder tener un producto final con mayor aprovechamiento de materiales y que a nivel manufactura, su comportamiento en los procesos de estirado, forjado o laminación, sean los más adecuados a las propiedades finales que debe tener el producto.

Se menciona de manera sencilla, pero encontrar la correlación de factores entre procesos empleados y las características de composición química en las aleaciones, es un tema que debe analizarse de manera cuidadosa para tener el mejor resultado.

2.4. MÉTODO DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para el análisis de la información se manejó el levantamiento de información a base de datos reales directos de los procesos involucrados, con los cuales se estuvo trabajando para obtener patrones de comportamiento y mediante la experiencia del proceso identificar que valores nos generaban las variaciones en el proceso.

Desarrollo de las pruebas y ensayos

Se realizó el levantamiento de Información con datos de:

- En la fabricación de los lingotes de cobre C-11000, con variables controladas de composición química, nivel de oxígeno, % de fierro y conductividad obtenida en el mismo.
- En los requerimientos de Soleras, barras y perfiles, se realizó el análisis de sección transversal de cada medida solicitada para determinar el peso promedio por pieza y en base a este estimar los pesos totales a piezas completas requeridas para completar 1 lingote y las dimensiones que mas representatividad presentaban para definir nuevas dimensiones de éste, el cual nos generará menor desperdicio.
- En la extrusión de las soleras de cobre se realizó la clasificación de los diferentes defectos de calidad por los cuales se rechaza el producto y que afectan el rendimiento.
- Se analizaron las variables del proceso de extrusión que implica la temperatura de calentamiento de lingotes, la velocidad de extrusión y la temperatura de enfriamiento de las soleras extruidas.

3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

3.1. REVISIÓN INICIAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

El desarrollo de este estudio está enfocado a realizar la generación de información relativa al proceso de fabricación en estudio y con datos de fabricación de los 3 últimos años (2016, 2017 y 2018), sobre los diferentes factores que son causantes de bajo rendimiento de metal y cubriendo datos de las diferentes etapas del proceso de fabricación, estos análisis involucran a la planta fabricante de los lingotes y el proceso de la planta que procesa el producto terminado.

Los reportes realizados con la generación de la información mencionada son los siguientes:

1.- Planta proveedora de lingotes de cobre (materia prima principal del proceso de soleras)

1.1.- Mezclas de cargas de metal en horno holding

1.2.- Composición química de vaciadas de cobre

1.3.- PPM de oxígeno en las vaciadas de cobre

2.- Planta fabricante de soleras, perfiles y barras de cobre

2.1.- Producción mensual generada,

2.2.- Defectos de calidad de las soleras y perfiles,

2.3.- Rendimiento mensual de planta y específico por aleación.

Actualmente todas las corridas de producción de lingotes que se realizan en la planta proveedora de lingotes no son fabricaciones de línea, se realizan a razón de 6 a 9 corridas de producción cada mes, que equivale a 3 a 5 días de fabricación por mes, ya que por día se fabrican 2 coladas de producto de manera usual.

Esta forma de operar nos genera que no tengamos capacidad de generar muchas series de datos de análisis y solo con muestras de estos reportes podemos empezar a generar observaciones, definiciones preliminares y comentarios sobre las posibles causantes de baja eficiencia de los procesos.

Con la revisión preliminar de cada uno de los reportes siguientes, podremos de manera siguiente obtener resultados iniciales de la investigación:

1.1 - Análisis de mezclas de cargas de metal en horno holding

Esta primera recolección de información se hizo directamente en la fundición de Colada Continua de lingotes de cobre en diámetro de 10" cada uno:

Se integró información de la mezcla o preparación de materiales, teniendo como premisa fundamental que a mayor % de utilización de metal virgen, podemos tener lingotes con menor porcentaje de problemas de contaminaciones metálicas y variabilidad en la composición de éstos, lo que permitirá manejar un proceso más estable en cuanto a la variabilidad que pueda presentar en la transformación de los lingotes y como estos se desempeñan en los procesos siguientes de extrusión y estirado.

Con las siguientes tablas de información del 2016 al año 2018, podremos iniciar a realizar los primeros análisis de fabricación:

Se busca relacionar como afecta el rendimiento del metal en función de la cantidad de material reciclado empleado en la fabricación de los lingotes, con el que se revisará si hay alguna correlación en estos valores.

Tabla 2. Mezclas de cargas en horno holding 2016

2016	FECHA	# YACIADA	COBRE CATODO	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	% Mezclas Reciclad	% Total Mensual (Reciclad)
ENERO	6	1		17,537		1,280	7%	10%
	7	2		18,307			0%	
	7	3		17,398		1,150	6%	
	12	11		13,835		4,510	25%	
	22	28		17,957		850	5%	
FEBRERO	22	29		18,694			0%	6%
	9	41		17,788		850	5%	
	15	51		18,229		650	3%	
	15	52		17,010		1,810	10%	
	16	53		18,853			0%	
MARZO	18	57		16,764		2,107	11%	11%
	4	65		16,150		2,839	15%	
	4	66		18,166		630	3%	
	5	67		18,895			0%	
	9	70		18,747			0%	
	15	77		16,773		1,876	10%	
	16	78		18,770			0%	
	16	79		18,650			0%	
	17	80		17,452		1,310	7%	
	21	83		7,844	8,473	2,303	23%	
ABRIL	21	84		6,369		12,050	65%	6%
	22	85		18,457			0%	
	3	92		18,333			0%	
	4	93		13,287		5,330	29%	
	5	94		16,940		1,492	8%	
	14	98		16,590		2,134	11%	
	14	99		17,867		821	4%	
	19	104		16,733		1,158	6%	
	19	105		18,874			0%	
	20	106		17,854		585	3%	
MAYO	20	107		18,267		584	3%	11%
	21	109		18,326		334	2%	
	22	110		18,020		615	3%	
	5	121		18,900			0%	
	6	122		16,124		2,610	14%	
	6	123		19,158			0%	
	13	140		15,231		3,163	17%	
	14	141		17,070			0%	
	19	149		11,770		6,274	35%	
	19	150		17,210			0%	
JUNIO	24	161		16,890		1,110	6%	8%
	25	162		11,186		7,632	41%	
	25	163		18,415			0%	
	5	175		15,239		3,152	17%	
	6	176		18,873			0%	
	6	177		18,414			0%	
	7	178		18,744			0%	
	14	194		15,865		2,800	15%	
	19	204		18,038		930	5%	
	20	205		13,413		3,944	23%	
JULIO	21	206		17,275			0%	8%
	21	207		17,347			0%	
	26	218		7,780	7,745	2,890	27%	
	26	219		14,228	4,680		0%	
	27	220		16,223		2,804	15%	
	2	222		17,312		1,120	6%	
	3	223		18,614			0%	
	16	242		18,676		442	2%	
16	243		18,206		861	5%		
18	244		19,010			0%		
26	262		10,695		8,702	45%		
26	263		19,085			0%		

Tabla 3. Mezclas de cargas en horno holding 2016 - continuación

2016	FECHA	# VACIADA	COBRE CATODO	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	% Mezclas Reciclad	% Total Mensual (Reciclad)
AGOSTO	4	278		18,043		579	3%	3%
	4	279		15,827	1,666	1,290	8%	
	11	294		17,724		493	3%	
	19	299		19,255			0%	
	19	300		16,659	2,496		0%	
SEPTIEMBRE	4	311		19071			0%	5%
	4	312		13280		6054	31%	
	7	319		19470			0%	
	12	328		19501			0%	
	22	339		19582			0%	
	22	340		19716			0%	
	23	341		17963		1820	9%	
28	352		19424			0%		
OCTUBRE	1	357		19191		404	2%	10%
	8	367		19581		463	2%	
	8	368		19937			0%	
	14	381		19705			0%	
	15	382		19623			0%	
	15	383		19164		459	2%	
	22	395		18813		870	4%	
	22	396		19518		397	2%	
	27	403		18279		1625	8%	
	28	405		14335		5589	28%	
	29	406		15515		4630	23%	
31	407		11236		9043	45%		
31	408		6986	11617	1523	18%		
NOVIEMBRE	8	419		20205			0%	12%
	8	420		20314			0%	
	13	427		20020		426	2%	
	13	428		15268		5204	25%	
	21	444		20538			0%	
	21	445		15176		5399	26%	
	22	446		14115		6414	31%	
DICIEMBRE	5	461		20788			0%	17%
	9	462		20210		597	3%	
	10	471		20283		850	4%	
	13	474		21172			0%	
	19	488		17937		2900	14%	
	20	489		11496		9579	45%	
	21	490		6503	9110	5350	45%	
	21	491		16064		5115	24%	
	22	492		16105		4793	23%	
22	493		19043		2110	10%		

En la siguiente tabla se maneja la información de cargas del año 2017 en tablas 4 y 5.

Tabla 4. Mezclas de cargas en horno holding 2017

2017	FECHA	# YACIADA	COBRE CATODO	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	% Mezclas Reciclado	% Total Mensual (Reciclados)
ENERO	11	17		16,114		3,848	19%	9%
	12	18		20,060			0%	
	12	19		15,355		4,740	24%	
	19	34		19,229			0%	
	19	35		19,436			0%	
	25	45		19,152			0%	
	25	46		18,786			0%	
	26	47		18,746			0%	
FEBRERO	27	50		10,836		8,521	44%	12%
	28	51		18,861			0%	
	5	67		19,399			0%	
	5	68		19,131			0%	
MARZO	13	83		9,187		10,570	54%	3%
	13	84		18,749		742	4%	
	14	85		18,675		574	3%	
	*	*	*	*	*	*		
ABRIL	10	182		15,150		431	3%	5%
	20	194		12,213		6,634	35%	
	20	195		16,765		2,245	12%	
	21	196		17,365		378	2%	
	21	197		19,277			0%	
	25	205		19,150			0%	
	26	206		18,402			0%	
	26	207		17,222			0%	
	27	208		18,289			0%	
MAYO	27	209		17,788			0%	5%
	5	225		14,498	3,393	1,720	11%	
	5	226		20,126			0%	
	15	240		20,937			0%	
	16	241		21,450			0%	
	16	242		19,905		1,710	8%	
	25	257		17,976		1,263	7%	
	26	259		20,960		450	2%	
JUNIO	30	265		17,840		3,322	16%	5%
	30	266		20,720		1,150	5%	
	31	267		19,111			0%	
	7	276		13,008		8,521	40%	
	7	277		19,727			0%	
JULIO	15	291		19,890			0%	13%
	15	292		21,967			0%	
	16	293		21,392		853	4%	
	24	308		20,062			0%	
	25	309		19,605			0%	
	25	310		19,977			0%	
	5	319		20,666			0%	
5	320		15,119		1,720	10%		
10	329		18,188		536	3%		
10	330		17,040			0%		
14	337		21,067			0%		
14	338		15,230		4,475	23%		
25	358		20,399			0%		
31	370		6,895		15,284	69%		

Tabla 5. Mezclas de cargas en horno holding 2017 - continuación

2017	FECHA	# VACIADA	COBRE CATODO	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	% Mezclas Reciclado	% Total Mensual (Reciclados)		
AGOSTO	1	371		13 197		9 018	41%	5%		
	1	372		8 695		5 688	40%			
	2	373		21 606		430	2%			
	2	374		19 204			0%			
	6	382		20 279			0%			
	10	389		22 129			0%			
	11	390		22 206			0%			
	11	391		21 829			0%			
	12	392		16 738			0%			
	12	393		21 912			0%			
	17	403		19 030		3 386	15%			
	18	404		22 530			0%			
	18	405		19 434			0%			
	19	406		21 671			0%			
	19	407		18 099			0%			
	20	408		19 039			0%			
	23	414		20 536			0%			
	27	422		22 760			0%			
	27	423		20 745			0%			
	28	424		20 669			0%			
	SEPTIEMBRE	2	432		14 337		6 300		31%	4%
		2	433		19 045				0%	
		6	440		20 003	2 799			0%	
		7	441		23 219				0%	
		11	449		22 906				0%	
		11	450		20 309				0%	
		12	451		23 198				0%	
	OCTUBRE	23	466		21 857				0%	2%
2		474		16 851	3 716		0%			
2		475		16 440		5 142	24%			
7		484		20 349			0%			
8		485		19 989			0%			
13		496		23 086			0%			
14		497		23 310			0%			
14		498		20 636			0%			
20		509		15 463	7 896		0%			
20		510		22 506			0%			
NOVIEMBRE	26	517		21 173			0%	1%		
	10	526		23 284		1 024	4%			
	10	527		19 644			0%			
	11	528		24 138			0%			
	12	529		20 974			0%			
	21	546		24 435			0%			
DICIEMBRE	21	547		21 997			0%	10%		
	3	567		24 032			0%			
	8	575		36 701		5 434	13%			
	9	576		40 890		3 147	7%			
	14	582		27 117		9 030	25%			
	14	583		24 117			0%			
	15	584		30 634		3 844	11%			
	18	589		25 307		8 616	25%			
	20	593		32 986		1 439	4%			
	21	594		30 523		487	2%			

Y los valores recabados del comportamiento del año 2018.

Tabla 6. Mezclas de cargas en horno holding 2018

2018	FECHA	# VACIADA	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	BRIQUETAS	% Mezclas Reciclad	% Total Mensual (Reciclad)
ENERO	2	1	18,229				0%	22%
	2	2	8,028		6,760		46%	
	13	20	20,261		9,524		32%	
	14	21	28,651		1,940		6%	
	21	31	28,473			750	0%	
	28	41	14,939		13,160		47%	
FEBRERO	2	49	22,689		5,319		19%	5%
	2	50	26,837		1,740		6%	
	8	59	27,947				0%	
	13	67	29,539				0%	
	14	68	34,101		3,302		9%	
	23	83	27,429		835		3%	
	24	84	18,746				0%	
	26	86	6,840			1,554	0%	
MARZO	5	97	27,644				0%	6%
	10	106	20,815	9,728			0%	
	11	107	24,431	5,831			0%	
	14	114	19,155		12,639		40%	
	22	124	28,133				0%	
	22	125	31,644				0%	
	23	126	10,398				0%	
ABRIL	2	133	30,168				0%	5%
	2	134	19,802		546		3%	
	6	141	29,405		444		1%	
	17	152	30,711				0%	
	17	153	20,946				0%	
	23	163	25,745		3,755		13%	
MAYO	24	164	16,585		3,237		16%	3%
	1	171	28,065				0%	
	2	172	20,946		9,092		30%	
	2	173	28,860				0%	
	9	184	27,632				0%	
	9	185	27,975				0%	
	17	192	29,870				0%	
	18	193	31,043				0%	
JUNIO	23	201	30,213				0%	12%
	23	202	30,739				0%	
	1	208	14,888		11,137		43%	
	3	211	21,010				0%	
	8	220	29,916				0%	
	9	221	28,252				0%	
	15	229	29,498				0%	
JULIO	15	230	37,248				0%	0%
	25	242	18,724		13,154		41%	
	5	251	27,543				0%	
	6	252	20,098				0%	
	14	264	27,401	1,569			0%	
AGOSTO	16	265	16,265	14,572			0%	10.28%
	23	274	31,322				0%	
	3	287	30,617				0%	
	7	290	30,777				0%	
	8	291	29,557				0%	
	15	299	27,143				0%	
	15	300	27,100				0%	
	17	303	30,754				0%	
	20	304	30,468				0%	
	23	309	20,649		8351		28.80%	
23	310	27,660		1268		4.38%		
27	312	9,458		21657		69.60%		

Tabla 7. Mezclas de cargas en horno holding 2018 - continuación

2018	FECHA	# VACIADA	CHATARRA DE IRA.	COBRE LIMPIO	COBRE RECICLADO	BRIQUETAS	% Mezclas Reciclado	% Total Mensual (Reciclados)
SEPTIEMBRE	3	319	31,116		562		1.77%	8.61%
	9	329	19,308	3990	5726		22.87%	
	10	330	28,270				0%	
	10	331	25,481		6495		20.31%	
	11	332	31,469				0%	
	21	348	23,806		5633		19.13%	
	22	349	28,942				0%	
OCTUBRE	24	350	29,303		1463		4.76%	5.86%
	2	356	28,466		1179		3.98%	
	2	357	30,507				0%	
	11	372	6,386		9793		60.53%	
	12	373	29,834				0%	
	12	374	26,246				0%	
	13	376	29,695				0%	
	19	386	30,865				0%	
	20	387	24,495				0%	
	20	388	19,584				0%	
NOVIEMBRE	24	395	30,386				0%	7.55%
	25	396	29,733				0%	
	1	404	16,771		3932		19%	
	1	405	24,570		3359		12%	
	10	418	24,756		2274		8%	
	11	419	29,363				0%	
	11	420	29,346				0%	
	16	429	23,899		6290		21%	
	17	430	30,198				0%	
DICIEMBRE	23	440	27,025				0%	5.92%
	25	444	29,832				0%	
	26	445	27,072	2671			0%	
	26	446	15,588		4611		23%	
	1	454	31,741				0%	
	1	455	30,905				0%	
	2	456	25,267		3695		13%	
11	471	30,391				0%		
12	472	29,258				0%		
18	482	25,896				0%		
18	483	28,494		1462		5%		
22	490	14,887	3457	8242		36%		
23	491	2,785	15042			0%		

Con los datos procesados estamos buscando identificar que posibles variaciones tenemos en el proceso que pueda ser relevante para la pérdida de materiales y tomar acciones sobre éstas.

1.2 - Composición química de vaciadas de cobre

Con registros de datos extraídos de las bitácoras de producción diaria de la fundición de cobre de la planta de fundición donde se fabrican los lingotes para la prensa de extrusión de soleras, la información integrada muestra la composición química de cada una de las vaciadas y en la cual se revisará el contenido del componente principal y los demás químicos que se manejan como contaminaciones de la aleación principal C-11000.

En las tablas 8, 9 y 10 se visualizan los concentrados de promedios mensuales obtenidos para los años 2016, 2017 y 2018, se tiene el desglose a nivel vaciada por vaciada, de tal forma que podamos revisar el comportamiento específico de cada vaciada vs rechazos de producción del mes y rendimiento del metal respectivamente.

Los datos colectados también nos presentan los contenidos de oxígeno que tiene cada una de las vaciadas entregadas mes por mes durante los años mencionados.

Tabla 8. Composición química de lingotes C-11000 – año 2016

Composición Química Promedio C-11000 Promedio Mensual - 2016											
Mes	% Zn	%Sn	%Pb	%Fe	%Ni	%Al	%P	%Si	%Te	PPM OXIGENO	% Cu
Enero	0.00060	0.00350	0.00070	0.00102	0.00020	0.00010	0.00000	0.00027	0.00010	209	99.99093
Febrero	0.00060	0.00288	0.00070	0.00098	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	206	99.99284
Marzo	0.00060	0.00408	0.00070	0.00083	0.00020	0.00010	0.00000	0.00015	0.00010	338	99.99161
Abril	0.00055	0.00601	0.00101	0.00079	0.00018	0.00009	0.00000	0.00009	0.00009	254	99.99135
Mayo	0.00060	0.00596	0.00070	0.00094	0.00024	0.00010	0.00003	0.00010	0.00022	232	99.98997
Junio	0.00060	0.00423	0.00070	0.00073	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	301	99.98458
Julio	0.00051	0.00410	0.00086	0.00086	0.00017	0.00009	0.00000	0.00009	0.00009	289	99.99004
Agosto	0.00048	0.00448	0.00156	0.00096	0.00016	0.00008	0.00000	0.00008	0.00008	309	99.99184
Septiembre	0.00060	0.00393	0.00070	0.00091	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	282	99.99151
Octubre	0.00060	0.00338	0.00070	0.00136	0.00021	0.00010	0.00013	0.00010	0.00023	290	99.99114
Noviembre	0.00053	0.00366	0.00154	0.00091	0.00024	0.00008	0.00535	0.00008	0.00010	194	99.98937
Diciembre	0.00060	0.00890	0.00070	0.00200	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	193	99.98513
TOTAL	0.00057	0.00459	0.00088	0.00102	0.00020	0.00009	0.00046	0.00011	0.00012	258	99.99003

Tabla 9. Composición química de lingotes C-11000 – año 2017

Composición Química Promedio C-11000 Promedio Mensual - 2017											
Mes	% Zn	%Sn	%Pb	%Fe	%Ni	%Al	%P	%Si	%Te	PPM OXIGENO	% Cu
Enero	0.00112	0.00411	0.00148	0.00065	0.00016	0.00008	0.00139	0.00008	0.00046	224	99.9884
Febrero	0.00165	0.00325	0.00145	0.00063	0.00073	0.00008	0.00122	0.00008	0.00008	240	99.9878
Marzo											
Abril	0.00060	0.00373	0.00133	0.00152	0.00020	0.00011	0.00002	0.00010	0.00122	209	99.9903
Mayo	0.00076	0.00287	0.00070	0.00091	0.00021	0.00010	0.00293	0.00010	0.00022	183	99.9887
Junio	0.00060	0.00415	0.00070	0.00101	0.00020	0.00010	0.00195	0.00010	0.00010	194	99.9883
Julio	0.00103	0.00361	0.00070	0.00087	0.00056	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	291	99.9902
Agosto	0.00060	0.00446	0.00117	0.00164	0.00043	0.00010	0.00021	0.00010	0.00085	219	99.9873
Septiembre	0.00060	0.00718	0.00085	0.00083	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00041	172	99.9873
Octubre	0.00060	0.00594	0.00070	0.00281	0.00030	0.00081	0.00119	0.00010	0.00056	120	99.9847
Noviembre	0.00060	0.00468	0.00070	0.00072	0.00088	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	265	99.9881
Diciembre	0.00060	0.00266	0.00070	0.00256	0.00019	0.00010	0.00140	0.00010	0.00014	222	99.9881
TOTAL	0.00080	0.00424	0.00095	0.00129	0.00037	0.00016	0.00094	0.00010	0.00039	213	99.9881

Tabla 10. Composición química de lingotes C-11000 – año 2018

Composición Química Promedio C-11000 Promedio Mensual - 2018												
Mes	% Zn	%Sn	%Pb	%Fe	%Ni	%Al	%P	%Si	%Te	% Conductividad	PPM OXIGENO	% Cu
Enero	0.00060	0.00362	0.00070	0.00182	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00008	99.58	243	99.9894
Febrero	0.00060	0.00465	0.00186	0.00121	0.00044	0.00010	0.00099	0.00010	0.00110	99.29	188	99.9845
Marzo	0.00060	0.00253	0.00070	0.00061	0.00024	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	99.41	224	99.9927
Abril	0.00060	0.00344	0.00070	0.00186	0.00111	0.00011	0.00161	0.00010	0.00101	97.72	222	99.9870
Mayo	0.00060	0.00431	0.00070	0.00123	0.00020	0.00010	0.00004	0.00010	0.00010	99.45	245	99.9894
Junio	0.00060	0.00477	0.00070	0.00153	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	99.25	312	99.9883
Julio	0.00060	0.00198	0.00070	0.00236	0.00020	0.00010	0.00020	0.00010	0.00010	99.55	206	99.9903
Agosto	0.00060	0.00301	0.00070	0.00337	0.00020	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	99.10	185	99.9898
Septiembre	0.00060	0.00345	0.00070	0.00180	0.00133	0.00010	0.00000	0.00010	0.00010	98.93	156	99.9886
Octubre	0.00060	0.00375	0.00085	0.00158	0.00020	0.00010	0.00183	0.00010	0.00010	107.49	149	99.9879
Noviembre	0.00060	0.00222	0.00070	0.00135	0.00020	0.00010	0.00005	0.00010	0.00010	100.88	170	99.9911
Diciembre	0.00060	0.00246	0.00096	0.00164	0.00020	0.00010	0.00111	0.00010	0.00010	100.35	154	99.9899
TOTAL	0.00060	0.00335	0.00083	0.00170	0.00039	0.00010	0.00049	0.00010	0.00026	100.08	204	99.9891

1.3 - PPM de oxígeno en las vaciadas de cobre

Como mencioné anteriormente las tablas 8, 9 y 10, también está registrada la información de las ppm (partes por millón de oxígeno), las cuales nos da un parámetro de la potencial porosidad o micro porosidad interna que se presenta en los lingotes fabricados y esto genera problemas con el producto como hemos comentado inicialmente, en las pruebas físico-mecánicas y los dobleces del producto.

Con esta serie de información tenemos otra causa de defectos, que, evaluando los lingotes entregados, logramos determinar el nivel de aceptación de oxígeno en los lingotes, ya que afecta de manera importante el proceso de fabricación.

A partir de este estudio y posterior a la realización y resultados obtenidos de las pruebas, se han establecido controles de proceso más apegados en los contenidos de fierro y oxígeno, lo cual ha generado menor cantidad de rechazos y en función de temperaturas y enfriamiento de los productos se ha mejorado sustancialmente en las propiedades y conformación del tamaño de grano.

2.1 - Producción mensual generada

Esta recolección de datos fue utilizada para realizar los diferentes análisis de información, determinación y clasificación de los desperdicios, los cuales afectan de manera directa el rendimiento del metal, el cual los valores obtenidos se asocian a la fabricación y volumen total de la producción de la planta.

Para efectos de valorar los resultados solo se consideran los productos que corresponden a la aleación C-11000.

2.2 - Defectos de calidad de las soleras y perfiles

El proceso de compilación de datos fue tomado directamente de la información diaria-mensual generada en piso, por personal de producción y calidad de la planta fabricante.

El período de recolección realizado comprende los años de 2016, 2017 y 2018.

Se analizó y clasificaron los rechazos por cada defecto presentado y evaluar la mayor incidencia obtenida de la documentación.

En la tabla 12 y las gráficas de las figuras 21 y 22, podemos encontrar los datos en resumen del primer año (2016).

En esta colección de datos se visualiza la cantidad de defectos generados y la frecuencia de cada uno, y el acumulado de éstos para los períodos de análisis.

Tabla 11. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2016

MES - 2016	DESPRENDIMIENTO (Kg)	CHUECAS (Kg)	FALTA DE LLENADO (Kg)	RAYADA (Kg)	SOBRANTE (Kg)	GOLPEADA (Kg)	MANCHADA (Kg)	TOTAL POR MES (Kg)
Enero	3,212	1,109	-	749	1,297	-	-	6,367
Febrero	1,039	850	21	198	393	-	69	2,570
Marzo	2,682	1,728	271	713	294	-	-	5,688
Abril	3,278	972	-	1,804	1,584	509	262	8,409
Mayo	1,255	1,988	515	1,982	664	2,963	295	9,662
Junio	1,320	170	-	1,073	327	696	322	3,908
Julio	1,679	246	11	1,259	837	-	-	4,032
Agosto	1,986	674	21	822	1,123	-	69	4,695
Septiembre	1,629	343	240	1,921	64	900	-	5,097
Octubre	2,342	-	-	3,432	78	514	-	6,366
Noviembre	2,703	-	-	3,469	246	599	-	7,017
Diciembre	978	138	-	403	-	237	-	1,756
Total /defecto	24,103	8,218	1,079	17,825	6,907	6,418	1,017	65,567

El detalle del año 2016, muestra de manera preliminar que los defectos más relevantes en ese período son el desprendimiento y piezas rayadas.

Estos dos defectos en primera instancia se pueden tener los causales siguientes:

Desprendimiento

Generación potencial por porosidades internas, laminación, inclusiones ausentes, inclusiones metálicas y no metálicas, variaciones de temperatura y fluidez del material a través de la herramienta como lo más importante.

Piezas rayadas

Este defecto puede deberse a causales como herramientas sucias, herramientas con fisuras, dados de extrusión o estirado sin pulir, mal manejo de materiales en el proceso y roce con otros metales de mayor dureza en su manejo a lo largo del proceso (cobre manipulado con herramientas de hierro).

El resumen mes a mes de estos defectos se muestra a continuación:

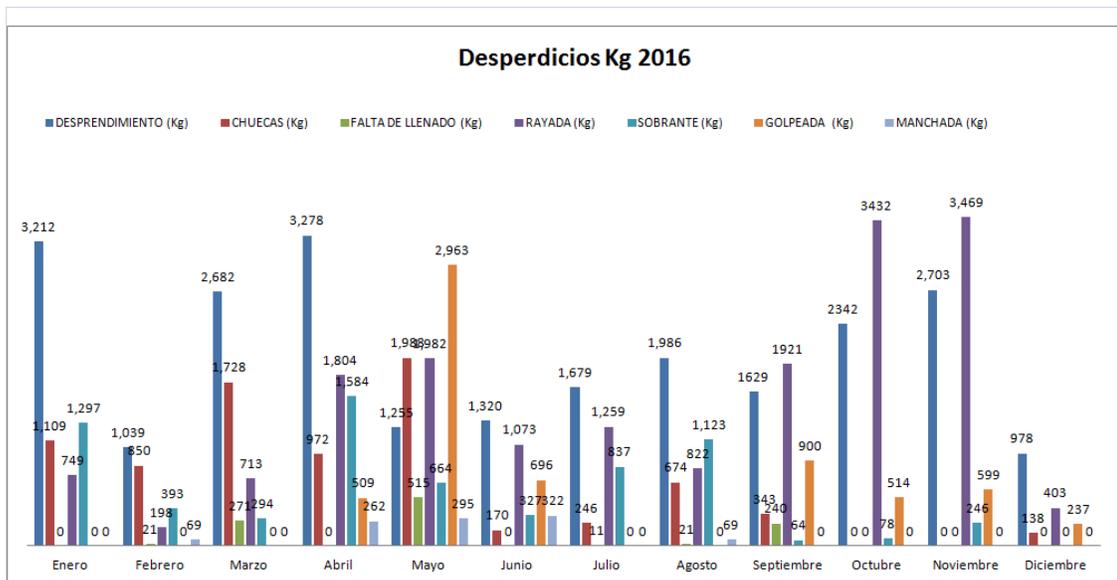


Figura 21. Defecto de calidad por mes - 2016

Y de manera agrupada a lo largo del año se puede apreciar que tenemos una tendencia a tener estos problemas como defectos principales.

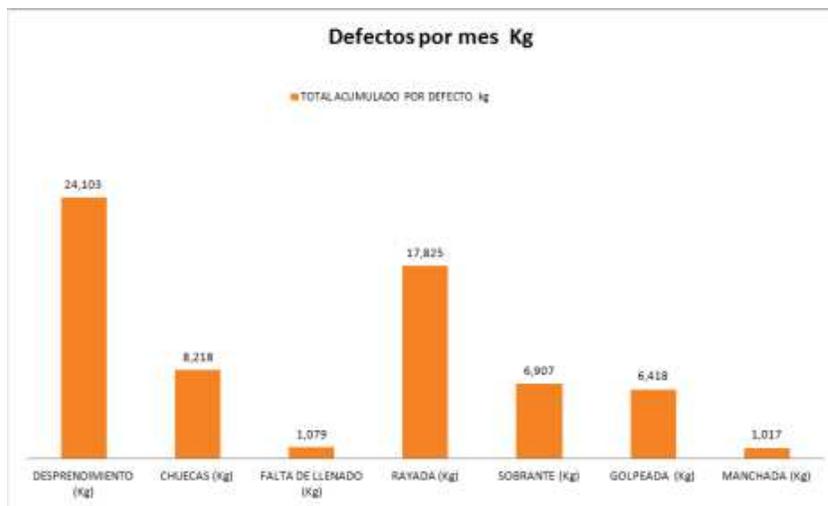


Figura 22. Defectos de calidad acumulada por causa - 2016

En la revisión del año 2017 tenemos la siguiente información recolectada:

Tabla 12. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2017

MES - AÑO 2017	TOTAL POR MES 2016 (Kg)	DESPRENDIMIENTO (Kg)	CHUECAS (Kg)	FALTA DE LLENADO (Kg)	RAYADA (Kg)	GOLPEADA (Kg)	SOBRANTE (Kg)	MANCHADA (Kg)	TOTAL POR MES 2017 (Kg)
Enero	6,367	570	1,513	664	61	-	510	158	3,476
Febrero	2,570	1,178	454	403	-	-	237	-	2,272
Marzo	5,688	5,151	-	174	178	-	284	-	5,787
Abril	8,409	1,432	268	-	1,432	869	47	237	4,285
Mayo	9,662	3,865	64	94	4,418	182	165	48	8,836
Junio	3,908	1,551	27	-	1,931	190	144	96	3,939
Julio	4,032	1,309	808	48	1,080	172	127	-	3,544
Agosto	4,695	2,211	393	1,349	2,365	2,190	1,711	241	10,459
Septiembre	5,097	4,251	740	312	2,791	1,723	-	130	9,947
Octubre	6,366	2,554	821	769	1,474	714	304	85	6,721
Noviembre	7,017	338	296	123	562	1,020	-	285	2,624
Diciembre	1,756	237	914	223	1,133	746	-	137	3,390
Total /defecto	65,567	24,647	6,298	4,158	17,425	7,806	3,529	1,417	65,280

Este año mostró que la tendencia sigue similar al año 2016, el defecto de DESPRENDIMIENTO sigue latente y se posiciona como principal causa de rechazos.

A diferencia de los datos del 2016, en este año las piezas RAYADAS siguen como segunda causa y las GOLPEADAS presentan buen nivel de incidencia.

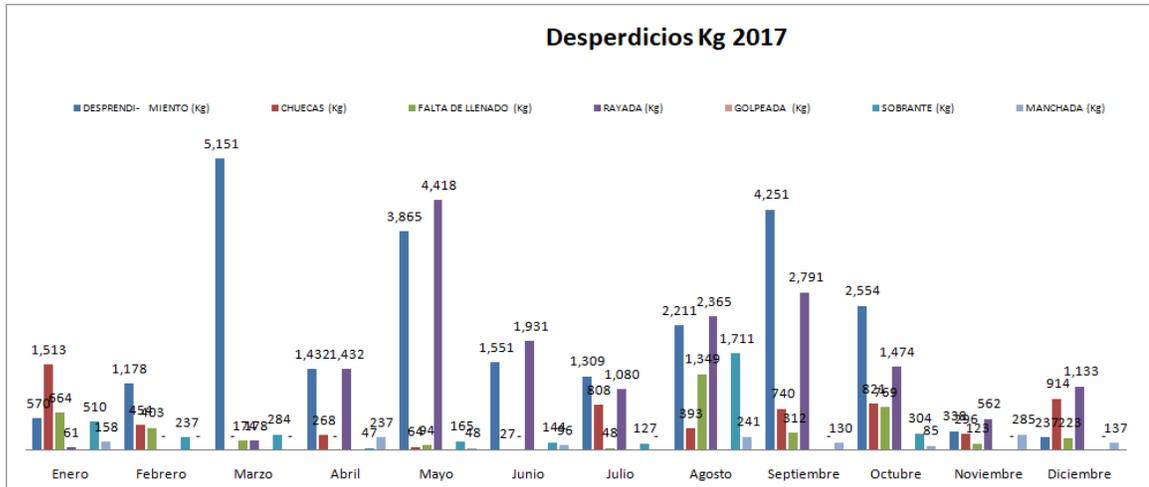


Figura 23. Defectos de calidad por mes – 2017

El acumulado del año 2017 se puede visualizar a continuación.

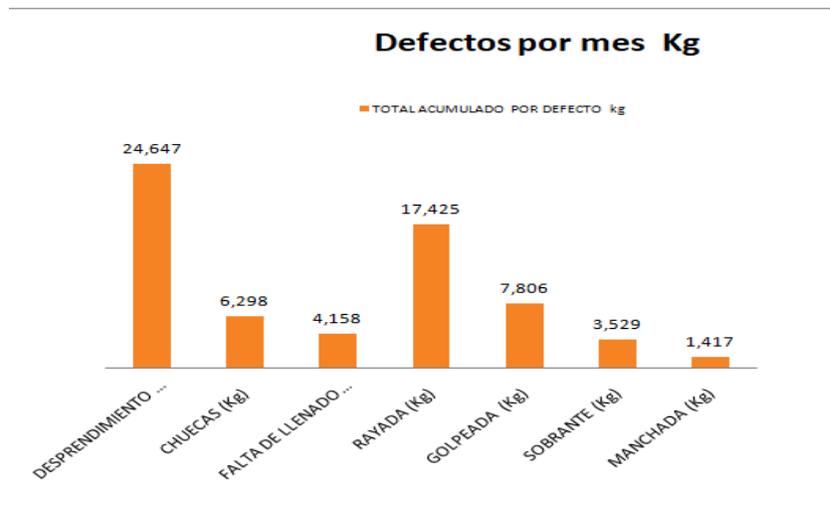


Figura 24. Defectos de calidad acumulada por causa – 2017

Para el año 2018, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13. Defectos de calidad en soleras, barras y perfiles de cobre 2018

MES - AÑO 2018	TOTAL POR MES 2017 (Kg)	DESPRENDIMIENTO (Kg)	CHUECAS (Kg)	FALTA DE LLENADO (Kg)	RAYADA (Kg)	GOLPEADA (Kg)	SOBRANTE (Kg)	MANCHADA (Kg)	TOTAL POR MES 2018 (Kg)
Enero	3,476	1,236	840	236	1,194	567	482	-	4,556
Febrero	2,272	1,873	616	275	2,148	737	-	240	5,889
Marzo	5,787	1,706	648	580	1,095	465	-	68	4,562
Abril	4,285	1,736	375	-	1,841	683	70	-	4,704
Mayo	8,836	2,857	528	-	2,121	442	-	270	6,217
Junio	3,939	2,229	42	-	1,483	192	-	164	4,110
Julio	3,544	1,820	118	211	1,677	-	-	-	3,826
Agosto	10,459	2,773	460	408	1,452	149	-	157	5,398
Septiembre	9,947	2,357	684	93	1,238	216	-	-	4,589
Octubre	6,721	1,504	294	95	1,710	846	-	-	4,449
Noviembre	2,624	1,448	998	-	2,371	686	62	250	5,815
Diciembre	3,390	809	255	-	533	89	106	89	1,881
Total /defecto	65,280	22,348	5,857	1,898	18,863	5,071	720	1,238	55,996

Adicionalmente en el año 2018, los defectos secundarios fueron piezas CHUECAS y GOLPEADAS, lo cual obedece a manejo de materiales dentro de la operación.

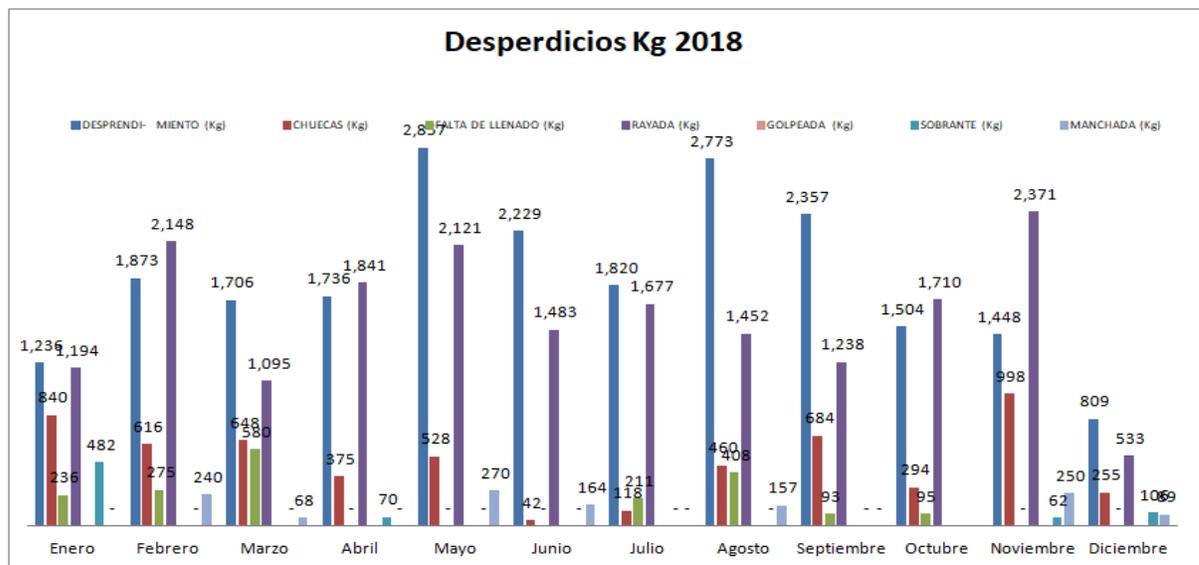


Figura 25. Defectos de calidad por mes – 2018

Y el grafico acumulado por defecto tenemos el comportamiento siguiente:

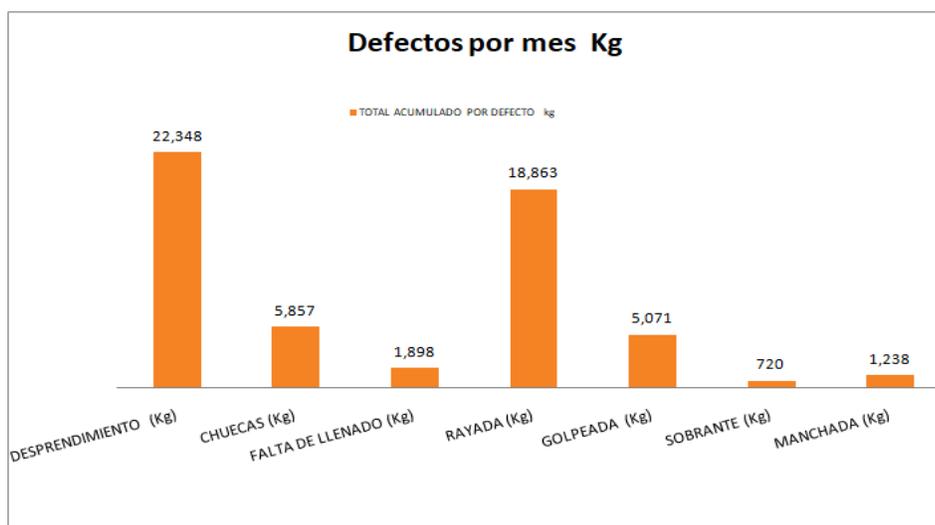


Figura 26. Defectos de calidad acumulada por causa – 2018

2.3.- Rendimiento mensual de planta y específico por aleación

La siguiente integración de datos es la referente al concentrado del rendimiento de metal que se tuvo en el proceso de la fabricación de soleras, barras y perfiles en la prensa analizada.

El análisis está particularmente enfocado en la aleación que más se fabrica en esta área productiva, siendo ésta la C-11000, sin olvidar que en el mismo equipo de producción, se realizan otras aleaciones con menor % de participación, por lo que su influencia en el rendimiento es menos representativa.

Las tablas siguientes presentan los valores obtenidos en los períodos 2016, 2017 y 2018.

Tabla 14. Rendimiento de metal mensual por aleación – 2016

% Yield Mensual 2016												
Aleación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
11000	66%	69%	79%	67%	68%	69%	67%	68%	71%	70%	73%	69%
46400												
12000	78%	77%	75%	67%	78%	76%	74%	80%	78%	78%	79%	78%
14700	46%		59%	60%	69%	26%		56%	68%	56%	39%	51%
36000								83%	69%		70%	
SAE-40												
14500	50%	56%	58%	58%	50%	55%	64%	48%	58%	59%	50%	69%

Con la información del 2016 podemos detectar que marzo y noviembre del 2016 fueron 2 meses con muy buen desempeño en el manejo del metal, de manera anual se obtuvo como promedio de rendimiento el 69%.

Tabla 15. Rendimiento de metal mensual por aleación - 2017

% Yield Mensual 2017												
Aleacion	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
11000	76%	72%	68%	70%	73%	73%	72%	73%	71%	73%	75%	73%
46400												
12000	78%		75%	76%		77%		80%		77%	79%	76%
14700	56%		62%	68%	69%	48%	67%		63%	70%	66%	63%
36000	73%	87%			76%	93%	75%	73%		66%	81%	72%
SAE-40												
14500	71%	65%		71%	51%	59%	61%		53%	59%	71%	

El detalle del 2017 muestra un buen rendimiento de metal en enero y de mayo a diciembre, donde algunas de las propuestas de mejora y control se empezaron a realizar, generando que el promedio general de rendimiento se elevara a 72.0%

Y los resultados del año 2018, son los siguientes:

Tabla 16. Rendimiento de metal mensual por aleación - 2018

% Yield Mensual 2018												
Aleacion	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
11000	71%	71%	79%	69%	72%	73%	73%	73%	76%	73%	77%	76%
46400												
12000			67%	76%				77%		77%	82%	75%
14700	38%		50%	92%	65%	61%	63%		39%	70%	50%	50%
36000	79%				77%	73%	83%		79%	66%	56%	
SAE-40												
14500		63%	62%	52%	64%	62%			55%	59%	55%	

Este año 2018 el valor de rendimiento promedio llegó al 74% manteniendo la aplicación de las mejoras realizadas en los procesos tanto administrativos como en producción.

A raíz de los valores obtenidos el año 2016, nace el proyecto de mejora del rendimiento de las soleras de cobre, pero se enfoca en el rendimiento de la prensa fabricante de soleras y otros productos de esta área productiva.

En 2017 iniciamos con la recomendación de la justificación teórica y determinación de porcentajes de reducción de desperdicios basándolos en la determinación de los volúmenes teóricos para que éste tuviera una mejora en scrap y, los residuales de los lingotes se optimizaran con el beneficio de tirar menos material sobrante por estar con sobrepeso y no poder fabricar alguna pieza completa.

Se realizó un análisis particular de todas las vaciadas realizadas desde el 2016 a la fecha del 2019 y para efectos de evaluar los resultados se generó unos gráficos de comportamiento y cumplimiento de las especificaciones esperadas en cuanto a

doblez, tamaño de grano y mejora del rendimiento, considerando los % de cargas de reciclados con metal virgen, su composición química y la aplicación de las propuestas que se han ido implantando a lo largo del desarrollo de este estudio, obteniendo una valoración de las coladas como vaciadas totales, buenas y malas, en función del resultado.

Las siguientes figuras, muestran el resultado de los años 2017, 2018 y se aprecia la mejora posterior a la fecha en que se aplicaron las acciones y recomendaciones al proceso, validando al final el comportamiento en las vaciadas al corte del año 2019.

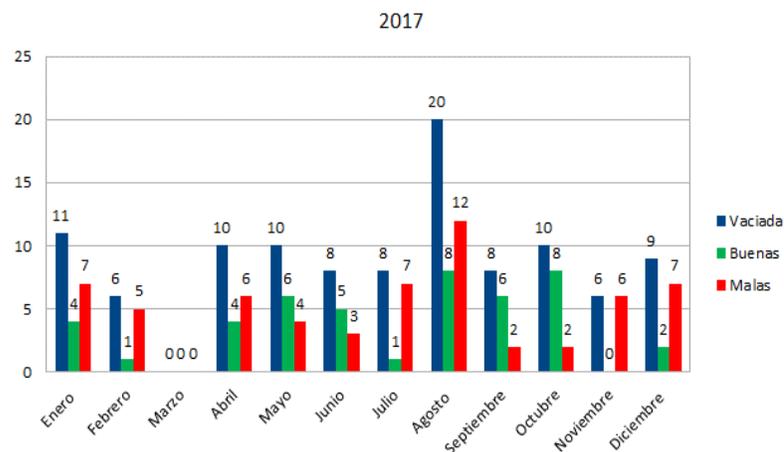


Figura 27. Comportamiento de vaciadas del año 2017

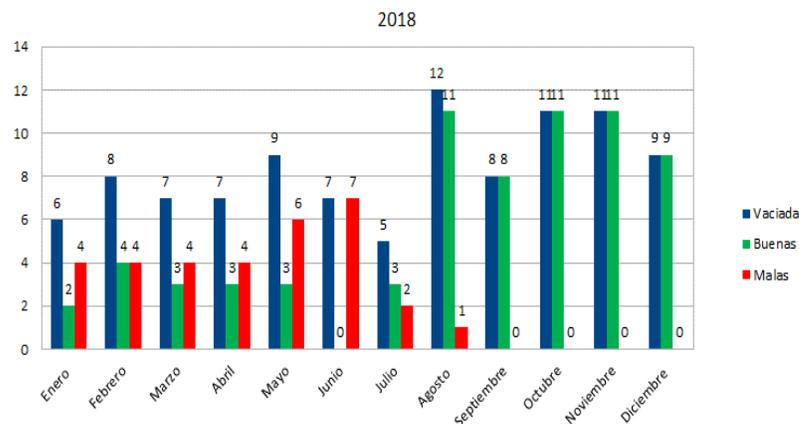


Figura 28. Comportamiento de vaciadas del año 2018

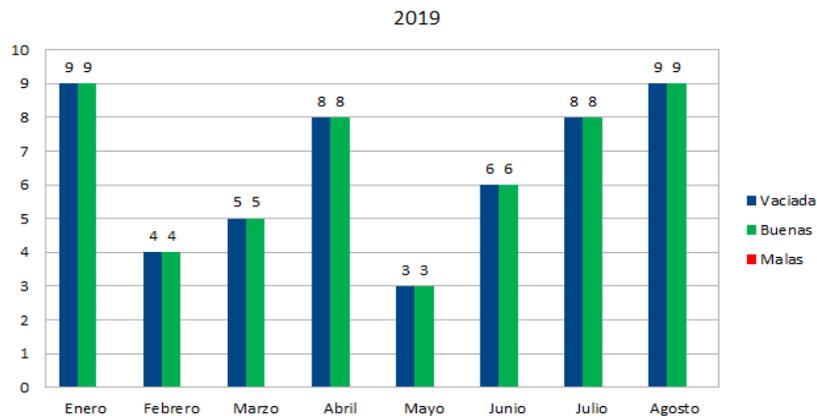


Figura 29. Ratificación de resultados con vaciadas del 2019 al corte

Con los trabajos realizados y las recomendaciones que emanan de los análisis hemos logrado mejorar el rendimiento y del año 2017 vs. en 2016 se tuvo una mejora de 3% en rendimiento, del 2018 vs 2017 también se logró obtener mejora y el valor creció en 2%, lo que nos da una mejora en rendimiento del 5% acumulado en 2 años de aplicación de trabajos y recomendaciones.

3.2. ANÁLISIS DETALLADO DE CAUSALES DE BAJO RENDIMIENTO

En base al análisis realizado en la sección anterior, podemos determinar que tenemos 2 causas relevantes e importantes que afectan el rendimiento de las soleras, estas son:

A.- Piezas con desprendimiento y

B.- Piezas rayadas

Además de esta causa que genera desperdicios tenemos también por otro lado el tipo de defecto que se presenta en el producto que está también generando poco aprovechamiento del producto y lo podemos denominar:

C.- Cáscara ó piel de naranja

Estos causales los podemos resumir en la siguiente figura:

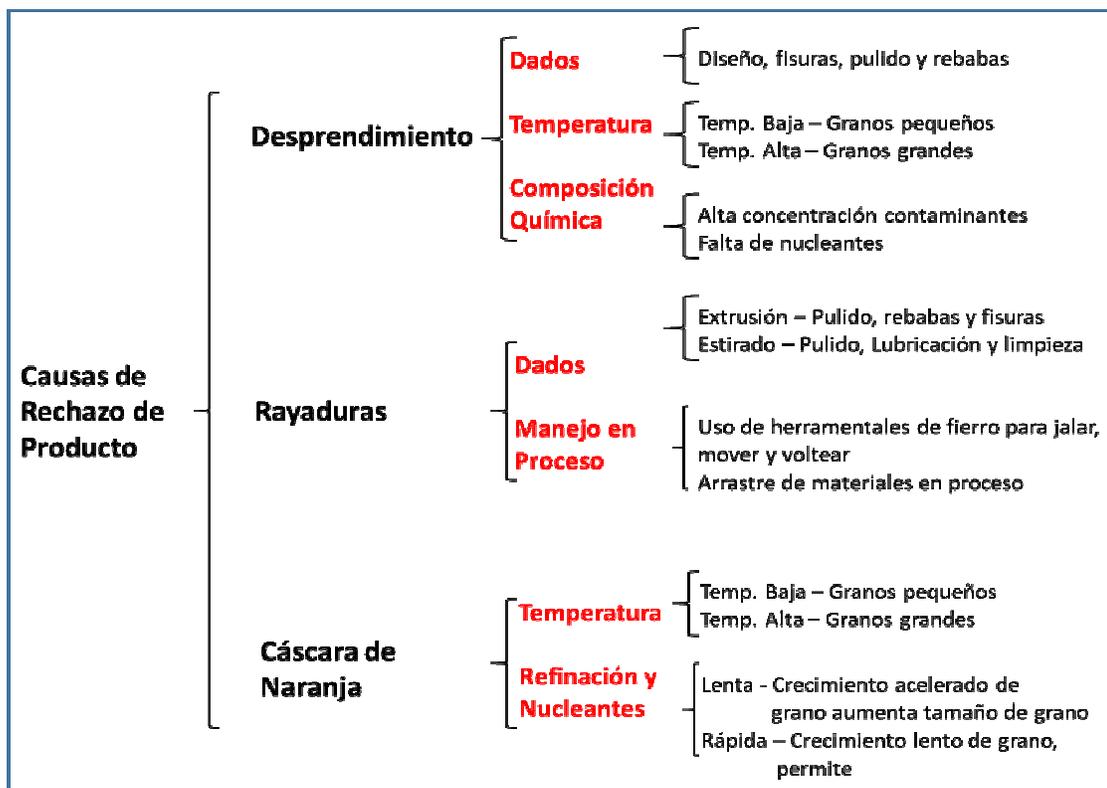


Figura 30. Defectos causantes de bajo rendimiento del metal

3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS

Para buscar disminuir y/o eliminar las causantes del desprendimiento, las rayas en el producto y mejorar el tamaño de grano que ayude a no presentar el defecto de piel de naranja, se realizaron pruebas de proceso con tres enfoques de procesamiento:

- 1.- Pruebas de velocidad de extrusión y temperaturas de los lingotes empleados
- 2.- Pruebas de composición química de la aleación, valoración de porcentajes de fierro y nivel de oxígeno obtenido en los lingotes y
- 3.- Pruebas de enfriamiento y revisión del tamaño de grano que se obtiene con diferentes temperaturas y verificar el comportamiento en las pruebas de dobles

Compuestos relevantes como son el fierro y el oxígeno en la fusión del producto principal, fueron considerados para su análisis en el proceso de estirado y validar los beneficios potenciales de cada prueba.

Pruebas de velocidad de extrusión y temperaturas de los lingotes

1. Prensa hidráulica horizontal de extrusión directa.

El proceso de extrusión se realiza mediante una prensa hidráulica (Ver Figura 31), con capacidad de 3,000 toneladas, y realiza la extrusión de lingotes de cobre de 10" y longitudes variables, fabricando barras, soleras y perfiles.



Figura 31. Prensa de extrusión de soleras de cobre

Esta prensa consta de una Sierra de corte de lingotes con capacidad de corte de 20" a 30" de largo para ser utilizada en el dimensionamiento y maximizar la utilización del metal en la fabricación de los productos, consta de un horno eléctrico de inducción de alta frecuencia para el calentamiento de lingotes, los cuales son sometidos a un calentamiento llevándolos hasta 850°C y sometidos en la prensa a compresión.

En la figura 32 se presenta el tipo de lingotes de cobre que son utilizado en la prensa para la fabricación de los productos mencionados.



Figura 32. Lingotes de cobre

La prensa consta de un sistema de extrusión con el uso de 2 dados de acero, uno para dar la dimensión de extrusión al producto y un segundo dado en la prensa que realiza la formación de la punta en el producto y realizar el proceso siguiente.

Al concluir la extrusión, el producto pasa por una cámara inerte a base de nitrógeno que evita que el producto al contacto con el aire se oxide y posterior a salir de la extrusión, pasa por una tina de enfriamiento a base de agua.

El siguiente paso es validar el despunte de la pieza, para poder realizar el proceso de estirado del perfil, solera ó barra, el cual emplea un dado con pastilla de carburo de tungsteno con la forma y dimensión final del producto, el cual está a la entrada de un banco de estirado de 100,000 Lbs. de fuerza en su sistema de jalón, con una longitud de carrera de 41 pies.

Posteriormente se pasa a través de un banco acumulador a un equipo de enderezado, el cual se basa en un proceso de tensionado, el cual releva esfuerzos y alinea cualquier curvatura de las soleras, finalmente pasa por la sierra de corte, donde se le dan las diferentes longitudes de producto según sea requerido por los clientes.

En el proceso de extrusión se deben considerar dos aspectos importantes, el primero la temperatura del lingote a ser extruido y asegurar su elasticidad del material, para posteriormente cuidar la velocidad de extrusión, ya que esta relación velocidad – temperatura, asegura el acabado superficial de la pieza al salir de esta primer etapa.

La velocidad requerida la tomará la prensa en función del bombeo de aceite hidráulico que pasa a través de la tubería y un pistón principal que hace que el ram (stem ó pistón de empuje), vaya presionando el lingote hacia la parte frontal, (Ver Figura 33).

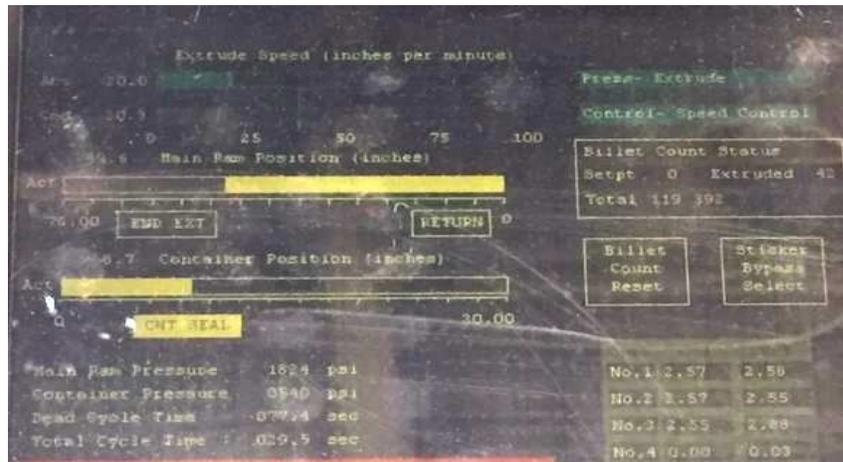


Figura 33. Velocidad del ram

A medida que el ram (pistón de empuje) va avanzando, la prensa va elevando la presión, hasta llegar al término de la extrusión, sin rebasar el 80% de la presión total de la prensa, por seguridad del equipo y los elementos integrantes del sistema (bombas hidráulicas, tubería, válvulas y motores eléctricos).

Para determinar la Velocidad de extrusión, primeramente se tuvieron que revisar las instrucciones de operación de la prensa, inicialmente se manejaba solo una dimensión de lingote (10" diámetro x 69" longitud), con este tamaño de lingote se procesaban todas las medidas en la prensa, definitivamente esto nos generaba muy variados valores de Rendimiento, ya que teniendo un universo de soleras muy amplio como fabricación (3/8" x 2" la más pequeña, hasta las más grande 2" x 6"), valorados en su área de sección transversal (0.75 inch² y 12 inch² respectivamente), el operador iba moviendo el avance del ram y para eliminar la sobrepresión ó elevación ésta, se daba a la tarea de ir aumentando el tiempo de ciclo de la extrusión, haciendo ineficiente el proceso.

Una recomendación inicial que hoy día ya se ha traducido en práctica de fabricación, fue el evaluar varias longitudes de lingotes y valorar el rendimiento obtenido, inicialmente a nivel teórico mediante una hoja de cálculo y posteriormente ya en la práctica.

La definición final se concretó en manejar 4 longitudes de lingotes que en los ejercicios documentados nos genera el menor desperdicio de material que se retornaba al proceso de fundición.

De la misma manera se sugirieron tres velocidades generales, tomando inicialmente como referencia la longitud del lingote y la medida a fabricar, primero a nivel teórico y luego aplicado en el equipo, esto es:

Se definió un rango de geometrías pequeñas, con una velocidad predefinida de 5 inch/min; y para geometrías intermedias se asignó una velocidad de avance de 7 a 9 inch/min, como valores óptimos que nos aseguran que los materiales no presenten los defectos de apariencia y desprendimiento que se analizaron como causales de desperdicio.

Para el caso de medidas con una geometría mayor, se ajustó la velocidad en el panel de control a 20 inch/min a 25 inch/min, y esta será la velocidad del ram. (Ver Figura 34).

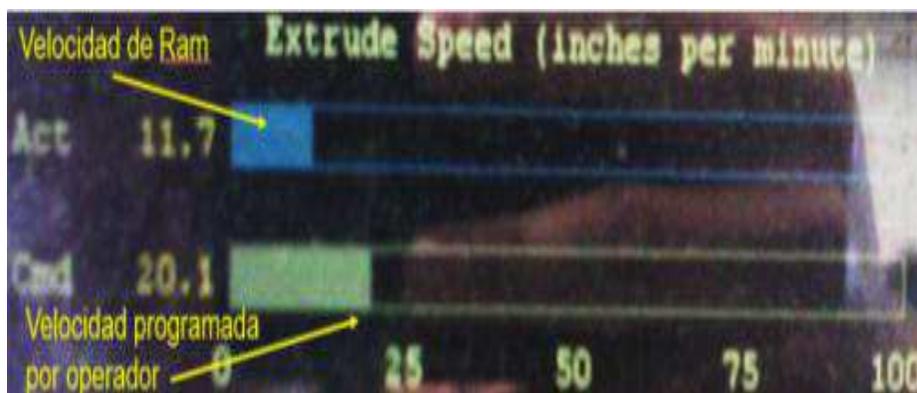


Figura 34. Parámetros de velocidad

En la siguiente tabla #17 se tienen ya establecidas las velocidades de trabajo en función de las dimensiones del lingote:

Tabla 17. Medida de producto terminado vs. velocidad de extrusión

MEDIDA DE LINGOTE	MEDIDA	VELOCIDAD
51 cm	3/8" x 2" a 3/8" x 3"	5 inch/min
	1/4" x 2" a 1/4" x 6"	
	1/2" x 2" a 1/2" x 4"	
61 cm	1/2" x 4" a 1/2" x 10"	7 inch/min a 9 inch/min
69 cm 76 cm	3" Cuadrada	20 inch/min a 25 inch/min
	3" Redonda	
	4" Cuadrada	
	5" Redonda	
	1" x 3" a 1" x 6"	
	1-1/2" x 2" a 1-1/2" x 4-3/8"	
	1-3/4" x 4" a 1-3/4" x 6"	
2" x 3" a 2" x 6"		

La presión que adquiere la prensa al realizar la fuerza de compresión sobre el lingote, depende directamente del flujo volumétrico que otorgan las bombas al sistema hidráulico (Figura 35), es decir, con la calibración (demanda de presión y/o volumen de aceite hidráulico) con la que cuentan las válvulas es suficiente para realizar el proceso de extrusión, teniendo en los registros una presión máxima de trabajo alcanzada de 2,000 psi a 2,500 psi y una mínima registrada de 1,000 psi a 1,500 psi (libras por pulgada cuadrada ó lbs./in²).

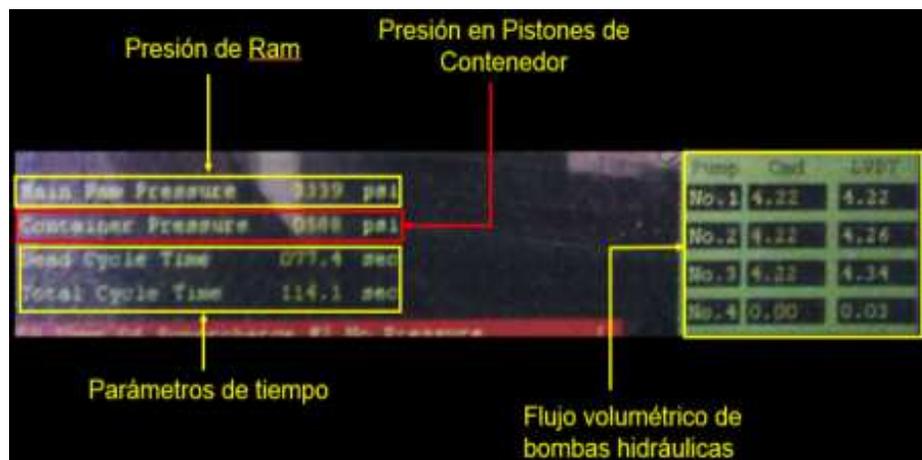


Figura 35. Presión y flujo volumétrico

1. Calentamiento de lingote

El proceso de fabricación de barras, soleras y/o perfiles de cobre que se lleva a cabo en la planta, como se mencionó anteriormente se realiza con la utilización de lingotes, para esto se definieron 4 medidas típicas para optimizar los rendimientos de metal empelado, la cual se aprecia en la tabla siguiente:

Tabla 18. Medidas de lingote

Lingote	Diámetro	Longitud
1	10 "	51 cm
2		61 cm
3		69 cm
4		76 cm

Como se mencionó anteriormente, los primeros análisis se enfocaron en optimizar la longitud de los lingotes para determinar como la longitud influía en el aumento del rendimiento de cobre, el valorar las áreas de sección transversal de los productos y generar gamas de longitudes de lingote apropiado para cada una de las medidas, nos ayuda a tener el mejor aprovechamiento del total de kilos que se tienen como lingote, una vez descontados los remanentes de la extrusión, las puntas y colas de los procesos de estirado respectivos.

En base a la programación de medidas se van solicitando los lingotes dimensionados para asegurar el menor desperdicio teórico.

De acuerdo al tamaño del lingote, el operador del horno de calentamiento de lingotes, realizar el procedimiento de calentamiento en función de la aleación a trabajar, la medida de lingote a calentar y determinar los grados de temperatura máxima permisible sin llegar a fundirse, esto es dejarlo en el punto de ser un lingote con la plasticidad necesaria para modificar su estructura cilíndrica, tomando como referencia además de temperatura y avance, la pérdida de calor que los lingotes van perdiendo en el tiempo que va transcurriendo la extrusión.

Con base en este análisis se definieron las temperaturas de calentamiento para los 4 tipos de lingote.

Tabla 19. Temperaturas de calentamiento de lingotes

LINGOTES DE 51 cm y 61 cm	LINGOTES DE 69 cm y 76 cm
Temperatura máxima de calentamiento 954°C (1,750 °F)	Temperatura máxima de calentamiento 927°C (1,700 °F)
La temperatura puede oscilar entre los 927°C y 954°C (1,700 °F a 1,750 °F)	La temperatura puede oscilar entre los 899°C a 927°C (1,650°F a 1,700°F)
El tiempo de calentamiento es menor (10 min aproximadamente)	El tiempo de calentamiento es mayor (15 min aproximadamente)
El horno de inducción, dimensionalmente recibe 2 lingotes para su calentamiento	En el horno solo puede ser colocado 1 lingote y medio.

Los hornos de Inducción donde se calientan los lingotes de cobre, son hornos eléctricos que utilizan una bobina eléctrica en forma de espiral cilíndrica a través de la cual se maneja un consumo de energía de 120kW a un voltaje de 440V, para poder generar el proceso magnético que calienta el metal que pasa a través de éste.

Para el caso de los lingotes de 51 cm y 61 cm el esquema (Figura 36), muestra la cantidad de lingotes que pueden ser colocados dentro del Horno que tiene instalado la prensa en estudio.

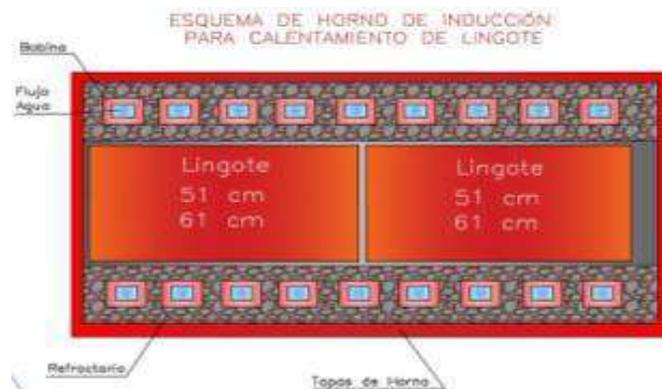


Figura 36. Horno para capacidad de 2 lingotes

El siguiente esquema muestra el posicionamiento de los lingotes con longitud de 69 cm y 76 cm, respectivamente (Figura 37). Donde solo puede ser colocado 1 lingote y parte del otro.

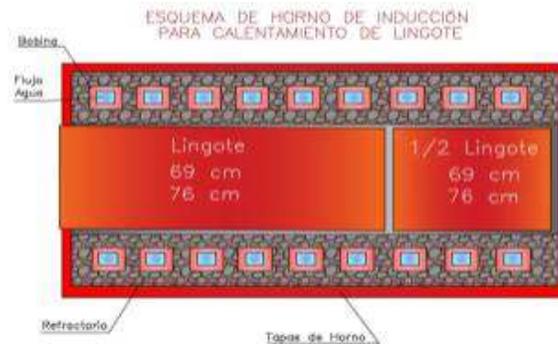


Figura 37. Horno para capacidad de 1.5 lingotes

2. Determinación de la velocidad y presión de la extrusión [1]

En base a la extensa gama de piezas de cobre fabricadas en planta se toman diversas consideraciones para el proceso de extrusión, primeramente se considera la relación entre el área del lingote y la medida a extruir, a esta proporción se le conoce como "Relación de extrusión".

$$R = \frac{A_0}{A_f}$$

Donde:

$A_0 =$ Sección transversal del lingote [cm^2, in^2]

$A_f =$ Sección transversal extruida [cm^2, in^2]

Lo anterior es de utilidad para realizar un análisis de la reducción del área del lingote contra la medida a extruir, además de ser un valor necesario para establecer de manera teórica la velocidad de extrusión, a partir de la siguiente expresión.

$$v_e = v_p \cdot R$$

Donde:

$$v_e = \text{Velocidad de extrusión} \left(\frac{m}{s}, \frac{in}{s} \right)$$

$$v_p = \text{Velocidad del pison} (m/s.in/s)$$

Con la relación de extrusión es posible determinar la presión necesaria para deformar el lingote, para ello se hace uso de la siguiente formula:

$$P = \sigma_0 \cdot \ln|R|$$

Donde:

$$\sigma_0 = \text{Esfuerzo de cedencia promedio}$$

Para el Cobre la cedencia promedio es de 28 MPa

Pruebas de composición química de la aleación

(Porcentajes de hierro y contenido de oxígeno) en los lingotes

Esta serie de pruebas fueron las que se llevaron a cabo en un mayor tiempo, debido a la disponibilidad de las diferentes corridas de producción dentro de la planta sometida al análisis de este documento, todas las corridas realizadas se enfocaron a revisar y mejorar la composición química y su comportamiento de la aleación en el proceso de enfriamiento y el tamaño de grano de las soleras, las cuales fueron sometidas al final a una prueba de doblez para evaluar el comportamiento mecánico de las mismas, a través de la aparición de un aspecto de piel ó cáscara de naranja en la superficie del producto, ya que esta prueba nos da visualmente la aceptación ó rechazo del mismo, ya que es parte del mecanismo de evaluación de la calidad de las Soleras.

Teniendo como objetivo el buscar la reducción y eliminación de los desprendimientos, el análisis de los contenidos de oxígeno, buscar que otros componentes químicos pueden ayudar a la conformación de un mejor tamaño de grano y complementarlo con el proceso de enfriamiento del producto, esto se realizaron diversos experimentos

con soleras similares y condiciones con variaciones de los aspectos anteriores y se evaluó el resultado.

Las diversas corridas de evaluación de las coladas ó vaciadas se tomaron directamente al final de proceso de estirado y corte, pero la configuración de la pieza se genera prácticamente a la salida de la prensa de extrusión, toda vez que al término de la operación, el metal ya conformado como "X" producto, pasa a una cámara de vacío generado con nitrógeno para evitar la oxidación e inmediatamente pasa a la tina de enfriamiento, y éste dentro de la solución acuosa, es enfriada en un 95% vs su temperatura inicial al tener contacto con el agua.

Se tomaron diferentes probetas de cada solera tomada como muestra a diferentes escenarios de enfriamiento y posteriormente se evaluó el tamaño de grano y su comportamiento mecánico al tomarse 2 muestras por barra y ser sujetas a un dobléz de 90° y la siguiente pieza a 120° y evaluar visualmente las áreas de deformación de las soleras.

A un mayor tamaño de grano en pruebas de dobles, el material presenta rasgos de desgarre, apariencia rugosa y en algunos casos aparecen reventamientos de grano que visualmente se ven líneas de fisuras a lo largo del producto.

Las pruebas consistieron en 5 coladas ó vaciadas de producción con características similares en composición y cambiando como elemento químico el contenido de fierro que da rigidez a la pieza y potencial reductor de tamaño de grano, el control del % de oxígeno en la colada y en función de esto ver como la temperatura de la emulsión de enfriamiento realizaba la conformación de la estructura del metal ya como pieza fabricada.

Teniendo como escenario un proceso de extrusión ya controlado con las velocidades de procesamiento definidas y con el uso de lingotes en las longitudes predefinidas para asegurar el menos desperdicio posible.

El detalle de esto se aborda en el capítulo siguiente.

4. RESULTADOS

4.1. VACIADAS O COLADAS

El proceso de muestreo de las soleras de cobre para las medidas que se consideraron ($\frac{1}{4}$ " x 3, $\frac{1}{4}$ " x 4" CV, $\frac{1}{4}$ " x 5" y $\frac{3}{8}$ " x 6") , todas éstas con los valores controlados de fierro, como se mencionó anteriormente, ya en su manejo en el proceso de extrusión y, mediante un proceso de enfriamiento específico, logró mejorar de manera relevante la conformación de grano en éstas.

Uno de los aspectos importantes es el enfriamiento del producto.

Analizando el proceso respectivo se detectó que solo se contaba con un sistema único de tratamiento de agua y con un solo circuito cerrado, el cual como también realizaba el enfriamiento del aceite del sistema hidráulico y, no tenía la capacidad de enfriar por un lado la emulsión lubricante de la tina de enfriamiento y el aceite del sistema.

Se recomendó y realizó la reparación de los sistemas de enfriamiento (enfriamiento del aceite del sistema hidráulico de la prensa y enfriamiento del producto terminado en la tina), así como la instalación de un intercambiador de calor nuevo para mejorar la capacidad de enfriamiento.

4.2. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO UTILIZADO

Las pruebas con las muestras se realizaron con 3 horarios diferentes para evaluar el comportamiento en una temperatura de fría, otra en un horario intermedio con mayor temperatura y, otra por las tardes con temperatura alta debido al intercambio de calor que se da por la naturaleza misma del contacto de las extrusiones a alta temperatura con el agua fría que durante el día va incrementándose de manera importante.

La primera sin haber puesto en marcha el sistema de enfriamiento y recirculación del lubricante soluble base agua (Ver figura 38).

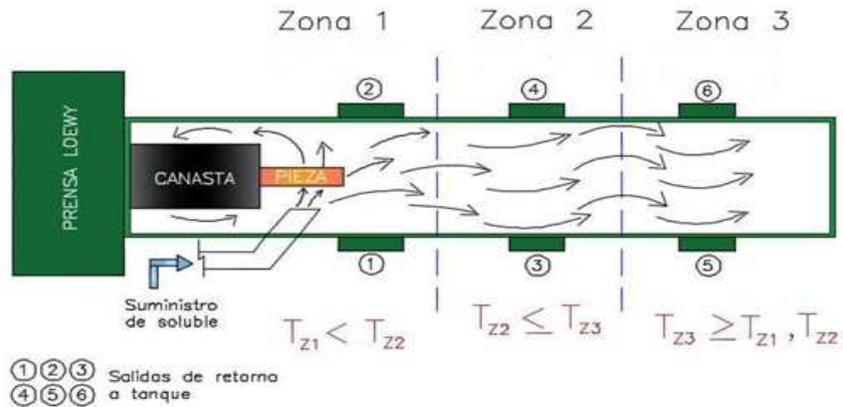


Figura 38. Tina de enfriamiento y zonas que lo conforman

La prensa de extrusión empleada, a la salida del producto está conformada por una canasta la cual esa área tiene un sistema de vacío el cual se logra con el uso de nitrógeno y posteriormente ya sale limpia la pieza, sin oxidación y entre en contacto con el lubricante de enfriamiento en la tina, la cual tiene 3 secciones y conforme va avanzando el producto, la solución va aumentando su temperatura y la misma es retornada al sistema de enfriamiento.

4.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS

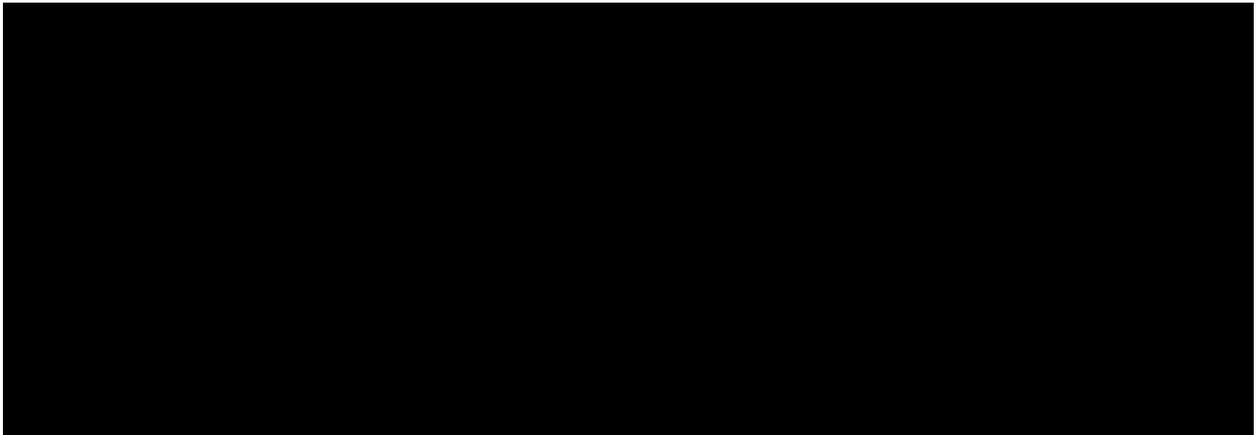
A fin de identificar que sucede con la micro estructura del material mientras es enfriado en los 3 periodos del día evaluados, se tomaron las muestras y enviaron a analizar al laboratorio fisicoquímico de la división de Cobre y Aleaciones mediante el uso de un microscopio metalográfico marca Zeiss, con el debido procedimiento de preparación de muestras.



Figura 39. Muestra de las probetas empleadas para los análisis

Con las muestras analizadas por el laboratorio y los resultados de las diferentes pruebas se logró obtener la información que se presenta de manera concentrada solo 2 de las 3 muestras realizadas por colada en la siguiente tabla:

Tabla 20 . Resultados de tamaño de grano vs. temperatura de enfriamiento



El resultado inicial observado de las pruebas de tamaño de grano bajo las condiciones de enfriamiento nos permite generar las siguientes conclusiones preliminares del proceso realizado:

a.- La temperatura baja, nos genera de manera fiable una conformación de tamaño de grano reducido, siempre que los valores de contenido de oxígeno no esté en valores elevados, esto es en un rango menor de 200 ppm., ya que comparadas contra las muestras de la colada A, muestra 1, tiene un comportamiento aceptable vs. la muestra de la colada B, muestra 1, que a razón de mismas temperaturas de enfriamiento, el parámetro de oxígeno no permite que se conformen granos reducidos, tendiendo a ser de tamaño mediano y grande.

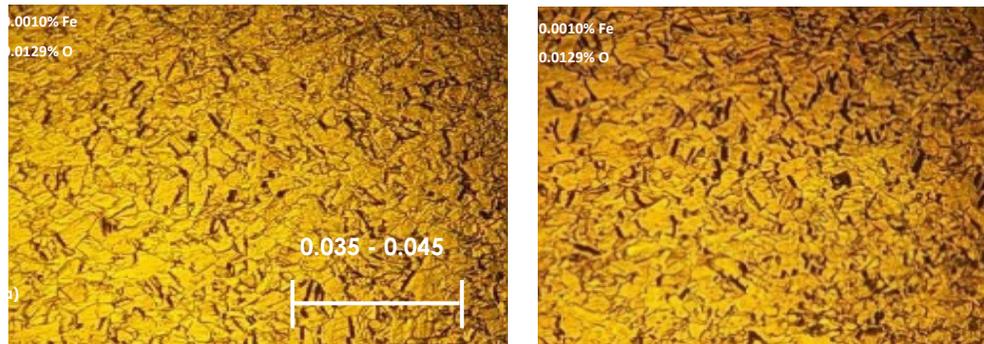
b.- La resultante mencionada en el inciso anterior, se ve replicado en C, D y E con sus respectivas muestras a baja temperatura de enfriamiento, por lo que este factor es muy relevante para asegurar la conformación de granos reducidos.

c.- Por el contrario, con media y/o alta temperatura y mayores porcentajes de oxígeno la conformación del tamaño de grano es grande.

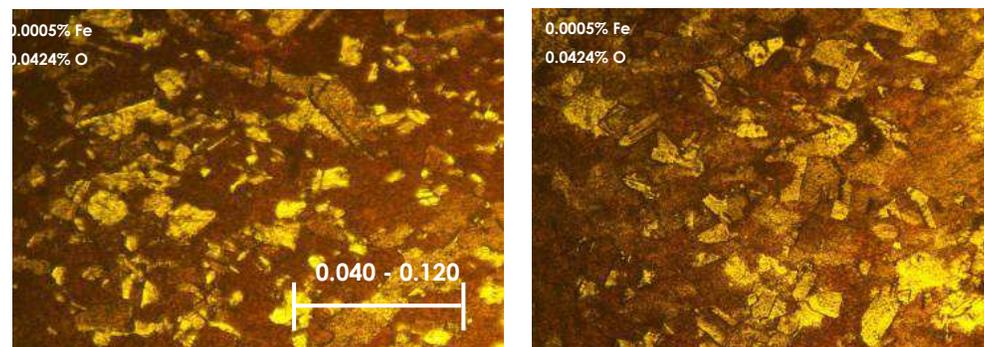
d.- Otra resultante es el hecho de que el porcentaje de oxígeno en valores intermedios de 100 a 200 ppm, también influye en la conformación del grano, permitiendo que con temperatura intermedia el grano no tenga una dimensión mayor.

Abajo en las Figuras 40 y 41, se pueden observar diferentes fotografías de las diferentes muestras tomadas con las conformaciones de grano respectivas de la tabla previamente mostrada.

Micro estructura a 14°C (temperatura de enfriamiento).



Micro estructura a 29°C (temperatura de enfriamiento).



Micro estructura a 27°C temperatura de enfriamiento.

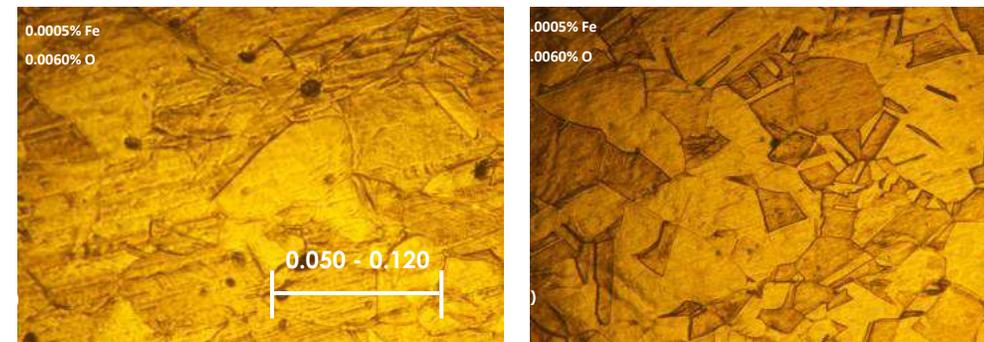
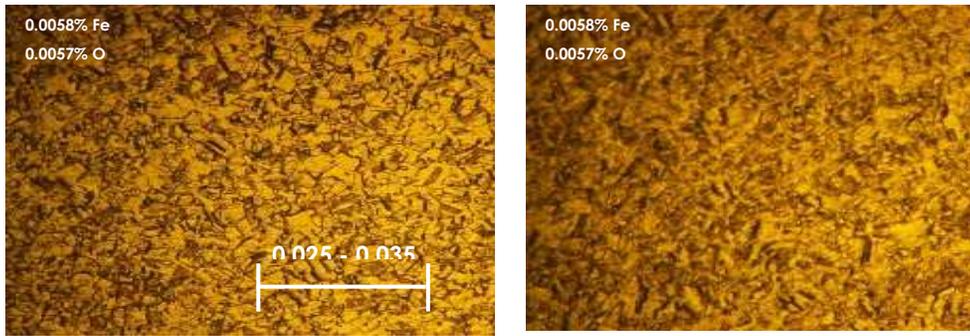


Figura 40. Tamaño de grano presentado a diferentes razones de enfriamiento (A)

Micro estructura a 5°C (temperatura de enfriamiento) con O₂ controlado



Micro estructura a 28°C (emperatura de enfriamiento) con O₂ controlado

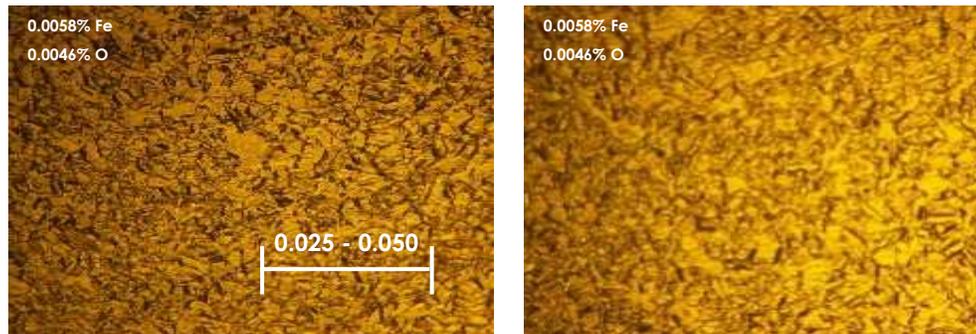


Figura 41. Tamaño de grano presentado a diferentes razones de enfriamiento (B)

4.4. PRUEBA DE DOBLES

El proceso de fabricación de soleras concluye en la inspección por el laboratorio de análisis fisicoquímico a fin de ser liberado y certificado como producto de calidad, Para el caso de las soleras se realiza una prueba adicional de dobles, para evaluar el comportamiento y apariencia de la pieza en la sección manipulada.

Los dobleces son realizados son a 90° y 120°, según la especificación de la norma ASTM B187 o la que el cliente determine en su especificación propia.

En las pruebas de doblez se verifica que la sección afectada no presente apariencia de piel de naranja (rugosidad superficial), y se generan los resultados siguientes que muestran una imagen de la rugosidad obtenida:

La tabla siguiente # 21, muestra las fotografías de parte de las pruebas realizadas los cuales el resultado se mostró en la tabla # 21, pero en la siguiente tabla se presentan gráficamente el resultado de una muestra con rugosidad y otra sin ésta.

Tabla 21. Resultado de prueba de dobles en soleras

Solera ¼" x 4" CR (Sin rugosidad)	Solera ¼" x 3" CR (Con rugosidad)
<p data-bbox="459 474 646 506">DOBLES A 90°</p> 	<p data-bbox="987 474 1174 506">DOBLES A 90°</p> 
<p data-bbox="472 1066 678 1098">DOBLES A 120°</p> 	<p data-bbox="979 1066 1182 1098">DOBLES A 120°</p> 

4.5. ANÁLISIS DE COLADAS CON CONTENIDO DE FIERRO

Los resultados obtenidos de las pruebas en cada una de las vaciadas (#A a la #E) de la aleación (C-11000) con distintos contenidos de Hierro (0.0005, 0.0010, 0.0058), porcentajes de oxígeno y sometidas a diferentes temperaturas ya mencionadas en los

ensayos anteriores, arrojan datos muy específicos en cada uno, debido a que el comportamiento del metal es muy distinto tanto en las pruebas mecánicas como en la revisión de su micro estructura.

Es importante mencionar que los % finales de oxígeno en las muestras sufrieron variaciones, inicialmente se tuvo un valor como lingote y después de procesarse el valor disminuyó casi un 50 % su contenido, esto ayudó a que se tuviera una buena funcionalidad de las pruebas y las porosidades no fueran evidentes en los estudios de microscopía.

De hecho, al entrar en el proceso de extrusión mucha de la porosidad que tenga internamente el lingote, éste se comprime y es expulsada al momento de la extrusión.

En la Tabla 22 y el gráfico siguiente (Figura 42), se muestran los valores iniciales y finales del contenido de oxígeno.

Tabla 22. Contenido de oxígeno en muestras por vaciada

CONTENIDO DE OXÍGENO			
Vaciada	Lingote	% en Lingote	% en PT
A	1	0.0175	0.0129
	2	0.0247	0.0129
B	3	0.0558	0.0535
	4	0.0522	0.0424
C	5	0.0086	0.0043
	6	0.0134	0.0060
D	7	0.0136	0.0057
	8	0.0101	0.0046
E	9	0.0135	0.0097
	10	0.0163	0.0118

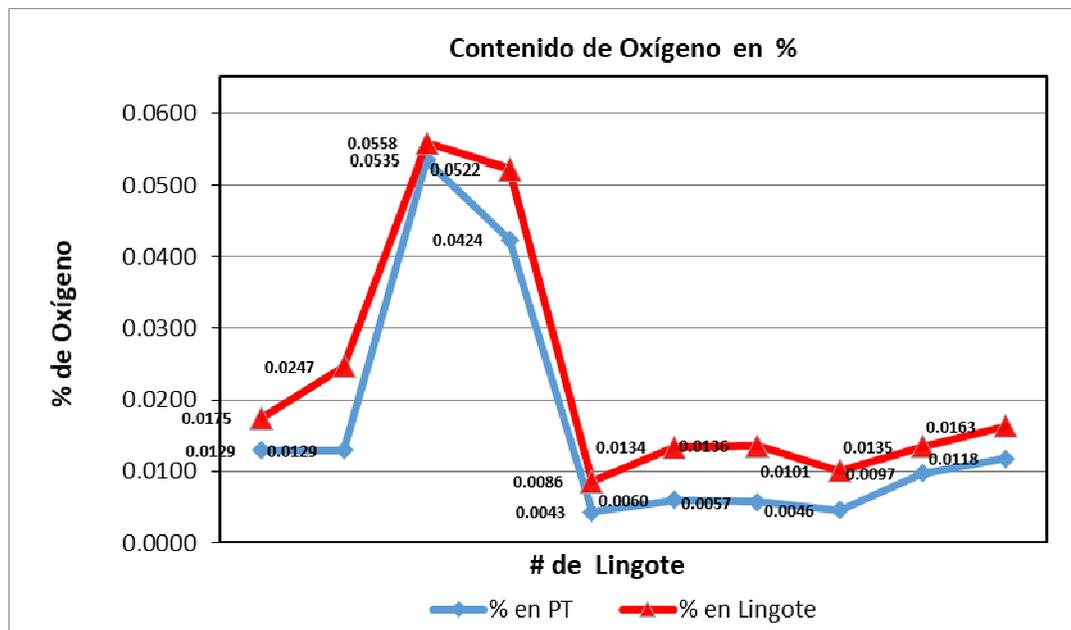


Figura 42. Contenido de oxígeno inicial y final

En el gráfico se observa el notable decremento de los porcentajes de oxígeno en las pruebas realizadas en cada una de las vaciadas corroborando una pérdida de este elemento durante el proceso de fabricación.

En cuanto al análisis a nivel micro estructural los resultados se muestran en la tabla 28 en la cual se tiene las micro estructuras del primer par de muestras de la **vaciada A** con 0.0010% Fe, obteniendo tres muestras (orilla1, centro, orilla2), el tamaño de grano se presenta más homogéneo con la temperatura menor a diferencia de la Tabla 16, donde se observa un aumento de temperatura y un cambio significativo de tamaño de grano más grande y uniforme además de la presencia de porosidades en la orilla de la pieza.

Para el segundo par de muestras de la **vaciada B** con 0.0005% Fe, el tamaño de grano presente en toda el área analizada es demasiado uniforme con presencia de granos columnares en el centro de la pieza.

Estudiando minuciosamente el tercer par de muestras de la **vaciada C** se encuentra también que los tamaños de grano incrementaron de forma abrupta en comparación con los anteriores análisis, estos son granos bimodales, es decir, granos de tamaño

grande y pocos granos pequeños en medio de estos. pero existe diferencia con los enfriados a mayor temperatura, donde el crecimiento de estos granos es demasiado acelerado y aquí es casi nula la presencia de granos pequeños con lo que se observa una micro estructura desordenada, heterogénea además de la presencia de porosidades en la parte central y orillas de la pieza, para este análisis la temperatura está estrictamente relacionada con el aumento exagerado de este tamaño de grano.

Para el análisis del cuarto par de muestras de la **vaciada D** se observa en la tabla que los granos están más equiaxiales, homogéneos y constantes, el tamaño es relativamente más pequeño, aunque a pesar de esta disminución comparada con la siguiente prueba, el grano presenta un ligero aumento del tamaño de grano en la parte central de la pieza esto se debe a un aumento de temperatura, pero no se presenta ningún problema.

En el quinto análisis realizado de la **vaciada E** se observa en la tabla, la tendencia de compactación de estos cristales el enlace más fuerte que se ha formado entre los límites, tiene como resultado esta homogeneidad además de una disminución del tamaño es importante resaltar que el grano se está comportando de manera más estable, pese a la variación de temperaturas a las que fueron sometidas cada una de las muestras, la medida entre estas es muy similar y el crecimiento es más controlado.

Los resultados de la medición del tamaño de grano en las distintas vaciadas se muestran en la tabla 23, y su gráfica correspondiente (figura 43).

Tabla 23. Tamaño de grano por vaciada y muestra

% Fe	Vaciada	Orilla 1	Centro	Orilla 2	Promedio
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0.0010%	A	0.035-0.045	0.035-0.045	0.035-0.045	0.040
		0.045-0.060	0.045-0.060	0.045-0.060	0.053
0.0005%	B	0.035-0.060	0.035-0.060	0.035-0.060	0.048
		0.040-0.120	0.040-0.120	0.040-0.120	0.080
0.0005%	C	0.035-0.070	0.035-0.070	0.035-0.070	0.053
		0.050-0.120	0.050-0.120	0.050-0.120	0.085
0.0058%	D	0.025-0.035	0.025-0.035	0.025-0.035	0.030
		0.025-0.050	0.025-0.050	0.025-0.050	0.038
0.0030%	E	0.025-0.035	0.025-0.035	0.025-0.035	0.030
		0.026-0.037	0.026-0.037	0.026-0.037	0.032

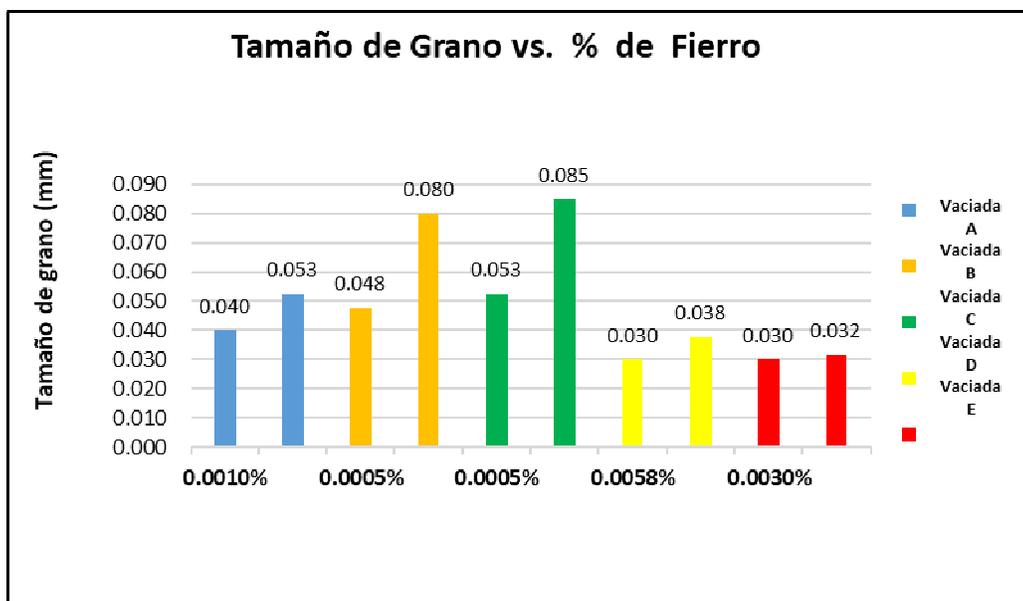


Figura 43. Tamaño de grano vs. contenido de hierro

En la gráfica anterior se observa la variación que existe entre los porcentajes de (Fe-hierro) agregado en las distintas pruebas, a menores porcentajes el crecimiento de grano se eleva a cristales de mayor dimensión y demasiado heterogéneos, a diferencia de los altos contenidos en los cuales se presenta un tipo de grano más conformado, homogéneo y compacto (aunque el Fe presente en mayores porcentajes ocasionan una inestabilidad en la estructura).

Durante todo el estudio se pudo constatar la dependencia del tamaño de grano en base a la temperatura.

Tabla 24. Tamaño de grano vs temperatura de enfriamiento

Vaciada	Temperatura °C	# Muestra	Promedio
			(mm)
A	14	1	0.040
	30	2	0.053
B	17	3	0.048
	31	4	0.080
C	15	5	0.053
	27	6	0.085
D	5	7	0.030
	28	8	0.038
E	10	9	0.030
	31	10	0.032

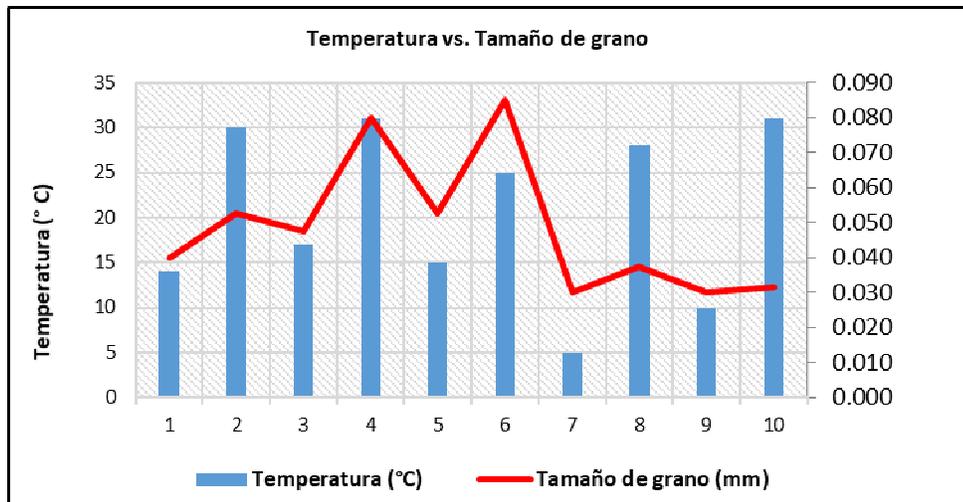


Figura 44. Tamaño de grano vs. temperatura de enfriamiento

En el gráfico se observa la influyente variación del tamaño de grano en base a la temperatura de enfriamiento de acuerdo con los resultados obtenidos el tamaño de los cristales se vuelve más homogéneos a menor gradiente de temperatura a diferencia de las muestras con mayor temperatura estas tienden a crecer exageradamente y provocar alteraciones internas en el material y con ello generar

defectos que son percatados al momento de realizar el doble de la pieza.

En base a los resultados obtenidos en cada una de las vaciadas se observa la reducción de este problema con el agregado en más porcentaje de (Fe) y los resultados.

En la vaciada D mejoran considerablemente a comparación de los anteriores con bajo contenido de este refinador.

Esta apariencia causa distintos problemas como lo son interferencia de conductividad eléctrica en toda el área de la pieza además de ocasionar sobrecalentamientos en los sistemas donde son instalados.

En resumen del proceso de pruebas es el siguiente:

Los porcentajes de oxígeno que se obtuvieron en las muestras nos indican que, en un intervalo redondeado de 0.0100% a 0.0150%, tenemos una mejor conformación de granos reducidos vs. contenidos mayores de 0.0400% a 0.0600%. Por lo tanto, el grano es uniforme, pero de mayor tamaño.

La especificación para barras, soleras, perfiles y alambres de cobre para aplicaciones eléctricas (americana ASTM B-187/B187M - 11 y europea BS EN 1360), establece una conductividad mínima de 98.3 IACS; por lo tanto, se determinaron valores eléctricos de porcentaje de Fe máximo aplicable a las soleras, que es de 0.0060%, el cual nos asegura una conductividad mínima de 98.5 IACS. [21,22]

Con base en este valor permitido, las muestras se delimitaron dentro del manejo de este nivel máximo de Fe.

Por lo tanto, se concluye que:

El intervalo de porcentaje de hierro, que permite lograr un grano reducido y una microestructura homogénea, debe manejarse entre 0.0030 y 0.0060%. En estos niveles, el hierro se comporta como refinador e inhibidor de crecimiento del tamaño de grano.

4.6. ANÁLISIS DE DESPRENDIMIENTO

En revisión a detalle del proceso y enfocados solo en los procesos de extrusión y estirado, los causales de desprendimiento, se expresan en el siguiente diagrama Ishikawa.

En base a este análisis ya se han tomado acciones para atacar los desprendimientos y las rayas.



Figura 45. Diagrama Ishikawa de desprendimiento

Y así mismo de los causales de estos defectos más representativos, se inició a trabajar en las acciones que encaminen a mejorar el rendimiento.

ANÁLISIS DE LOS 5 PORQUÉ														
Descripción del problema	Causas potenciales								4 "M"	Acciones				
	Por qué (1)	Control	Por qué (2)	Control	Por qué (3)	Control	Por qué (4)	Control		Por qué (5)	Control	ACCIÓN PREVENTIVA	ACCIÓN CORRECTIVA	
DESPRENDIMIENTO en las barras y soleras de cobre afectan el rendimiento del metal.	Marcas en la pieza generadas en la tina de enfriamiento.	N/G	Contacto de la pieza con los rodillos de desplazamiento en tina.	N/G	Distancia amplia entre un rodillo y otro						Maquinaria	Acondicionar los rodillos a fin de evitar el maltrato en la pieza y en su defecto instalar más de estos elementos		
	Mal manejo de material al momento de halar la barra en la extrusión.	N/G	La actividad se realiza de manera empírica	N/G	No se tiene un procedimiento documentado para realizar dicha actividad.						Mano de Obra	Procurar levantar la pieza y realizar el tiro lo mas uniforme posible	Realizar LUP (Lección de Un Punto) para establecer la metodología a implementar en el halaje de piezas durante una extrusión.	
	Altas temperaturas en soluble de tina de enfriamiento	N/G	El intercambio de calor en el sistema es bajo	N/G	El sistema de enfriamiento no funciona adecuadamente	N/G	Se operará de manera irregular o el mantenimiento no es adecuado.					M. Ambiente	Verificar el funcionamiento de las bombas y de torre de enfriamiento así como la circulación de fluidos en tuberías	Realizar un plan de mantenimiento regular a sistemas de enfriamiento
	No existen especificaciones de extrusión (presión, velocidad).	N/G	Se realiza en base a la experiencia de trabajo	N/G	No se han documentado y definido parámetros.							Método	Generar y documentar especificaciones de presiones y velocidades de extrusión en la prensa	
	Falta de parámetros específicos de temperaturas para el calentamiento del lingote de acuerdo a las diferentes medidas de la piezas	N/G	Se maneja un rango de temperatura general para todas las medidas de producto terminado.	N/G	No se considera que para cada rango de medida se requiere de temperaturas diferentes.							Método	Generar y documentar especificaciones para el calentamiento de lingote de acuerdo al rango de medidas producidas en planta	
	No se realiza limpieza de dados de extrusión y estrado después de cada proceso.	N/G	No consideran que sea una actividad necesaria	N/G	No se tiene documentado como una actividad preventiva para el desprendimiento.							Método	Elaborar LUP (Lección de Un Punto) donde se describan las actividades de limpieza de dado de estrado después de cada corrida	
	Fabricación de producto con funcionalidad del equipo deficiente	N/G	Planeación de mantenimiento a equipos poco efectiva	N/G	No se asegura la disponibilidad funcional del equipo	N/G	No existe mantenimiento planeado para ningún área de la planta.					Método	Los tiempos de trabajo de mantenimiento y producción se realizan a la par	Establecer, generar y efectuar planes de mantenimiento adecuados en planta así como tiempos de trabajo propios.
	Contenido de oxígeno fuera del rango especificado.	N/G	Acuerdos deficientes entre proveedor (M.P) y cliente (productor).	N/G	Las investigaciones realizadas no generaron acuerdos (especificaciones).	N/G	Falta de evidencia documentada					Materia prima	Generar y documentar la especificación para el contenido de oxígeno en el lingote y difundirla a las plantas involucradas	

Figura 46. Análisis de causas de desprendimiento (5 Por Qué)

4.7. ANÁLISIS DE RAYAS EN EL PRODUCTO

El análisis específico de las rayas también se revisó de manera particular a lo largo del proceso de fabricación, generándose en el siguiente diagrama de Ishikawa.

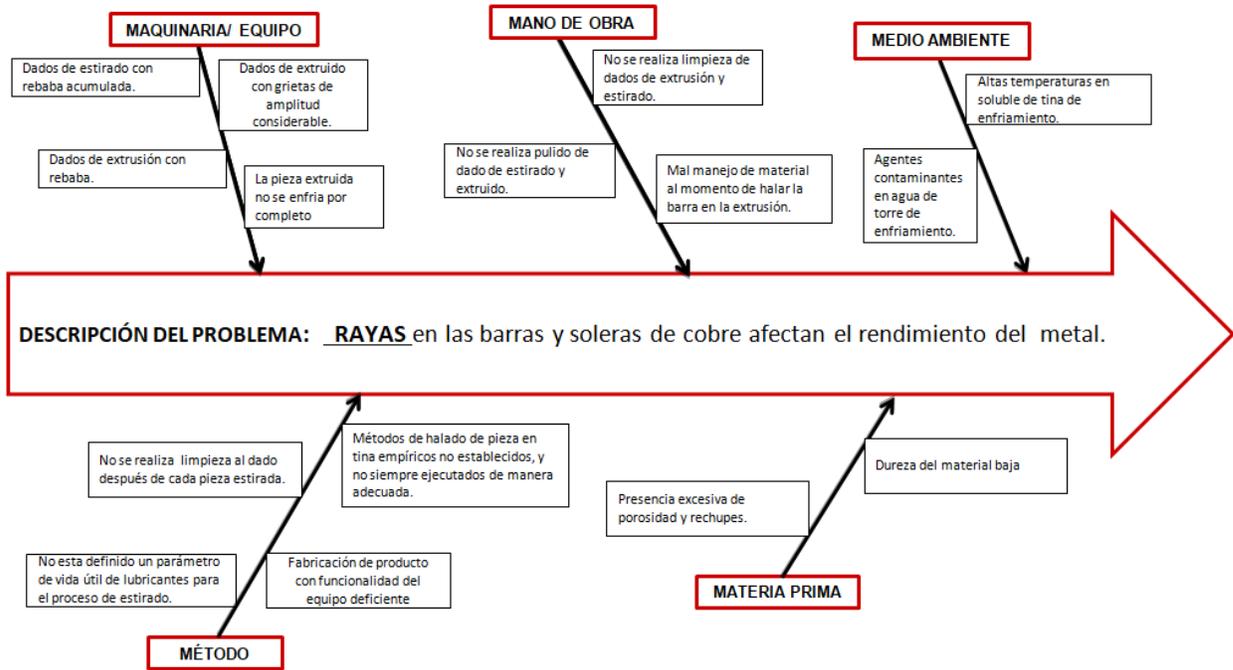


Figura 47. Diagrama Ishikawa de rayas en el producto

Posterior a este análisis se tuvo una reunión con el personal de planta para revisar que actividades deberían ser puestas en marcha para atacar las diferentes causas que provocan las rayas en el producto, entre las que tenemos:

ANÁLISIS DE LOS 5 POR QUÉ														
Descripción del problema	Causas potenciales								4"M"	Acciones				
	Por qué (1)	Control	Por qué (2)	Control	Por qué (3)	Control	Por qué (4)	Control		Por qué (5)	Control	ACCIÓN PREVENTIVA	ACCIÓN CORRECTIVA	
RAYAS en las barras y soleras de cobre afectan el rendimiento del metal.	Dados de extruido y estirado con rebaba acumulada.	NIG	No se efectúa limpieza a los dados después de cada pieza procesada	NIG	No consideran que sea una actividad necesaria	NIG	No se tiene documentado como una actividad preventiva para las rayas.				Maquinaria	Generar LUP (Lección de Un Punto) para implementar el procedimiento de limpieza en los dados después de cada estirado y/o extruido.		
	La pieza extruida no se enfria por completo		El intercambio de calor en el sistema es bajo	NIG	El sistema de entramiento no funciona adecuadamente	NIG	Se operá de manera irregular o el mantenimiento no es adecuado.				Maquinaria	Verificar el funcionamiento del las bombas y de torre de enfriamiento así como la circulación de fluidos en tuberías	Realizar un plan de mantenimiento regular a sistemas de enfriamiento	
	Altas temperaturas en soluble de tina de enfriamiento	NIG									M. Ambiente			
	Mal manejo de material al momento de halar la barra en la extrusión.	NIG	La actividad se realiza de manera empírica	NIG	No se tiene un procedimiento documentado para realizar dicha actividad.							Mano de obra	Procurar levantar la pieza y realizar el tiro lo mas uniforme posible	Realizar LUP (Lección de Un Punto) para establecer la metodología a implementar en el halaje de piezas durante una extrusión.
	Fabricación de producto con funcionalidad del equipo deficiente	NIG	Planeación de mantenimiento a equipos poco efectiva	NIG	No se asegura la disponibilidad funcional del equipo	NIG	No existe mantenimiento planeado para ningún área de la planta.	NIG	Los tiempos de trabajo de mantenimiento y producción se realizan a la par			Método	Establecer, generar y efectuar planes de mantenimiento adecuados en planta así como tiempos de trabajo propios.	

Figura 48. Análisis de causas de rayas en el producto (5 Por Qué)

CONCLUSIONES

Después de realizar los diferentes ejercicios de variación de parámetros de operación en la fabricación de las soleras de cobre y determinar de manera estadística los resultados, los cuales una vez establecidos estos, nos genera la optimización del proceso de fabricación y se logró comprobar la hipótesis que fue planteada inicialmente para mejorar el nivel de utilización de cobre empleado en la producción.

Este trabajo nos establece que las siguientes acciones descritas a continuación deben realizarse de manera sistemática:

1.- Manejo de lingotes de 10" de diámetro con longitud pre-determinada.

En el plan de fabricación de la planta se estableció la relación de las nuevas medidas a manejar siendo 4 las longitudes determinadas (51, 61, 69 y 76 cm.), cada medida de los productos terminados se asoció a una longitud específica, en función del área de sección transversal de cada producto, la densidad y el volumen de material requerido por producto con la mejor utilización de material.

Esta definición por producto aseguró mayor uso del metal en la producción.

La actualización de esta información debe actualizarse quincenalmente con las nuevas medidas que vayan agregándose al catálogo de productos, al momento de hacer los requerimientos, se asegura menor desperdicio de metal.

2.- Composición química e impurezas:

Asegurarse de cumplir a cabalidad la composición química de la producción de la fundición de cobre donde es fabricado el lingote, validar que los parámetros de fierro, oxígeno y fósforo que se han sometido al análisis planteado en este documento, se controles y formen parte de la fabricación de los lingotes aleación C-11000.

Cumplimiento de la normativa ASTM para la Aleación C-11000, con los valores controlados siguientes:

Fierro – 30 a 60 ppm

Fósforo – 0 a 5 ppm

Oxígeno – 100 a 150 ppm

3.- Reducción de desprendimientos y laminaciones:

La reducción de desprendimientos y laminaciones en el producto se logró mediante las siguientes acciones:

- Asegurar en el proceso de fabricación de los lingotes que la desoxigenación sea correcta mediante el uso de los oxiquemadores y el fosforo de cobre, para evitar la formación de porosidades en el lingote,
La cantidad a emplear por tonelada de fusión en los hornos es de 2 Kgs/tonelada para tener la mejor extracción de oxígeno.
Asegurar esta característica dará más homogeneidad al lingote, mejor apariencia superficial tanto longitudinalmente como en los cortes, donde visualmente no se observarán poros y rechupes.
- Las temperaturas de calentamiento de los lingotes que debe manejarse como práctica cotidiana para cumplir el objetivo de mejora son:
Para los lingotes de 51 y 61 cm ésta debe estar en el rango de 927°C a 954°C con un tiempo de calentamiento promedio de 10 minutos y, para los lingotes de 69 y 76 cm, se debe manejar entre 899°C y 927°C, con un tiempo promedio de calentamiento de 15 minutos.
- La velocidad de extrusión determinada por tamaño de lingote es la siguiente:
 - a.- Lingote de 51 cm, realizar proceso a una velocidad de empuje de 5 pulgadas / minuto.
 - b.- Lingote de 61 cm, realizar proceso a una velocidad de empuje de 7 a 9 pulgadas / minuto, la variación será el ancho de solera a fabricar (menor ancho menor velocidad).
 - c.- Lingote de 69 y 76 cm, realizar proceso a una velocidad de 20 a 25 pulgadas por minuto, con la misma consideración de ancho de solera, menor ancho menor velocidad.

4.- Mejora del tamaño de grano y componentes en la aleación.

La uniformidad de la estructura granular del cobre está ligada a los puntos vistos anteriormente y particularmente a las condiciones de extrusión y estirado.

En el proceso de extrusión, se establecieron las temperaturas de enfriamiento y los horarios de fabricación del producto en función de su aleación y sección de área transversal. Este seguimiento nos aseguró obtener una conformación del grano en tamaño reducido. Mientras se mantenga una temperatura de enfriamiento de las barras y soleras con valores menor a 20° C, se logró generar una estructura con grano pequeño que permitió asegurar la maleabilidad del producto para poder realizar operaciones de dobleces. El análisis bajo estos criterios nos dio por resultado un tamaño de grano de 0.025 a 0.045 mm y tener una conductividad mínima de 99 IACS.

5.- Disminución de rayas por manejo ó manipulación del producto:

Las rayas presentadas en las soleras, barras y perfiles son generadas por la presencia de partículas de fierro ó residuales de los procesos de extrusión, estirado y manejo del producto a lo largo del proceso, incluyendo los herramientas empleados. Se debe eliminar todo indicio de suciedad, ya que los arrastres del producto en el proceso que usualmente son partículas metálicas mayormente o, en su defecto no metálicas pero de consistencia dura, provocan rayas y defectos superficiales, inclusive llegan a quedarse adheridos en el producto. Para reducir la presencia de rayas en el producto, las llaves tipo stilson, palancas, barras de colocación, se eliminaron las de fierro dulce (cold rolled steel) y se cambiaron a manipuladores de madera ó llaves de cobre y/o latón.

6.- Mejora del uso del cobre

Todo lo expuesto en este análisis de datos e información nos ayudó a lograr mejorar el uso del metal, históricamente traíamos a nivel promedio un 69% promedio, validando esta cifra a partir del año 2016, establecido como dato inicial para este proceso de generación de información. Hoy el valor promedio está en 74% y continuando con el proceso de mejora y las recomendaciones, se establecen nuevas metas para llegar al 76%, siendo consistentes en lo anteriormente declarado.

APORTACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo establece pautas de operación en cada una de las etapas del proceso de fabricación comentado, las conclusiones mencionadas y su aplicación nos llevaron de manera paulatina a generar nuevos valores de control del proceso y mejorar la utilización del metal. Del período inicial de referencia (año 2016), los valores de utilización mensual de cobre estaban en mínimo 65-66 % y promedio de 69%, la aplicación de las recomendaciones nos llevó a crecer en el 2017 en el rendimiento al 72% y, en el año 2018 subió 2 puntos más llevando el promedio mensual al 74%, con picos más elevados hasta 76-77%.

Cuantificando lo anterior en valores de kilos y dinero tenemos:

1. Cada mejora en 1% nos representa un incremento promedio de 3 toneladas métricas más de fabricación mensual.
2. Este incremento a un valor de mercado de \$120.00 pesos por kilogramo, nos da una producción potencial de crecimiento de 36 toneladas métricas anuales y en dinero nos representa un valor de \$ 4,320,000.00 pesos.
3. Este valor es determinado para 1% de incremento en rendimiento por año. Si lo expresamos en los 2 años anteriores 2018 vs 2016, tuvimos un incremento de 5%. Habiendo mantenido este año 2018 la utilización del cobre, nos arroja que en ese año se tuvieron \$ 21,600,000.00 pesos más de venta de soleras de cobre (\$1,800,000.00 mensuales), generando una contribución marginal de \$234,000.00 pesos adicionales al resultado obtenido de manera regular en la operación. La contribución inicial era del 8% y al final del estudio incrementó al 13%.

Las aportaciones generales en términos de acciones son:

- A. Inicialmente la fabricación de los lingotes se rige bajo la norma ASTM-B-187, para la aleación C-11000, mejorando la composición de ppm en contenido de oxígeno y definir valores de hierro y fósforo como aleante, para mejorar el comportamiento en la conformación del grano que ayuda en procesos de dobles, corte y maquinado.
- B. La temperatura de calentamiento del lingote previo a la extrusión, la velocidad de empuje y, el enfriamiento del producto posterior a la extrusión, se han establecido para asegurar la homogenización de la estructura molecular y mejora de apariencia.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Derivado de la optimización del proceso objeto de este documento, los beneficios económicos citados, colocan a la planta productora de soleras con una mejora en los costos de fabricación, los cuales se traduce en tener la capacidad de poder fabricar una mayor cantidad de producto terminado y con esto tener una mayor participación de mercado, con pedidos de más clientes ó incrementos en los requerimientos de los actuales. El tener un crecimiento en volumen de producción, genera no solo a la compañía más estabilidad laboral, sino la posibilidad de que el personal de la empresa y de la planta en estudio en particular a tener una condición socio-económica más estable dentro de la planta de fabricación, dándoles estabilidad en su trabajo y la posibilidad de seguir contando con las prestaciones salariales y laborales que todo trabajador espera de su trabajo. La plantilla laboral inclusive tenderá a mejorar en cantidad y, se abren posibilidades de tener más oferta de trabajo para nuevos elementos y con esto incrementar el bienestar laboral y familiar de todos los que laboramos en esta planta. Hoy día el lograr el bienestar social ayuda toda empresa a cumplir con las reglamentaciones gubernamentales enfocadas a tener una disminución de los riesgos psico-sociales que afectan el comportamiento de los trabajadores en sus respectivos trabajos y con esto mejorar la calidad de vida de los mexicanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ORTIZ Prado Armando, RUIZ Cervantes Osvaldo y ORTIZ Valera Juan Armando, Modelado de Procesos de Manufactura, Cap. 6 Extrusión. 2013, UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/09-MPM-Cap6-Final.pdf?sequence=9>
2. KALPAKJIAN, Serope and SCHMID Steven, 2010-2001, *Manufacturing, Engineering and Technology*, Sixth Edition, Cap. 15 Metals Extrusion and Drawing Processes and Equipment, USA-México: Pearson - Prentice Hall.
3. CARPINTERI, Andrea de Freitas, SPAGNOLI, Andrea. 2003. Biaxial/Multi-axial Fatigue and Fracture. (Variability in fatigue lives: an effect of the elastic anisotropy of grains (Pommier Sylvie), Elsevier, France. https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpBMFF0001/cid:kt00BRTNF1/viewerType:khtml//root_slug:biaxial-multi-axial-fatigue/url_slug:spatial-distribution?b-q=anisotropy%20in%20copper&sort_on=default&b-group-by=true&page=1&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&include_synonyms=no&view=collapsed&zoom=1&q=anisotropy%20in%20copper
4. CARON, R. N. and ROBINSON, P. W. 2004. Copper alloys, wrought. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471238961.2318152102180505.a01.pub2>
5. CONRY, Rebecca R. 2011. Copper: inorganic and coordination chemistry. *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119951438.eibc0050>
6. YAKSIC, Andrew. (s.f.). Chemical reactions of copper and percent yield. Chemistry Lab Portal. Disponible en: <https://www.yaksic.com/crcpy6.html>
7. NAKAMURA, Shinichiro, NAKAJIMA, Kenichi, KONDO, Yasushi and NAGASAKA, Tetsuya. 2007. The waste input-output approach to materials flow analysis. *Journal of Industrial Ecology*. 11(4) p. 50-63. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1162/jiec.2007.1290>
8. RAMOS ESCOBEDO, Gema T; BUENO TOKUNAGA, Arturo y RENDÓN GARCÍA, Nallely M. 2007. Estudio de la recristalización secundaria en un acero de bajo carbono

- laminado a alta temperatura. En : *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 27(1), p. 59-67. Disponible en:
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522007000100007&lng=es&nrm=iso
9. DE GOROSTIZA, Fragapane. 2008. Bronces y latones, Pontificia Universidad Católica Argentina. Disponible en:
<https://estudioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/informe-bronces-y-latones.pdf>
 10. CARPIO Juan, 2014, Continental University of Sciences & Engineering, Course Hero, HYO Perú. Disponible en:
<https://www.coursehero.com/file/53499872/cobreysusaleaciones-141013113953-conversion-gate01pdf/>
 11. ANÓNIMO. (s.f.). Procesos de deformación volumétrica. Conformado de metales. Disponible en: <http://conformadodemetal.blogspot.com/p/laminado.html>
 12. DALIAN KONFORM TECHNICAL EQUIPMENT (s.f.). Disponible en:
<http://www.konform.cn>.
 13. American Society for Testing and Materials. 2019. ASTM B187/B187M Standard specification for copper, bus bar, rod, and shapes and general purpose rod, bar, and shapes. Disponible en: www.astm.org
 14. RAJENDER Singh, 2006. Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Tehcnology, Non Ferrous materials. New Age International Ltd. Publishers, India.
 15. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON, 2012, Ingeniería Mecánica, Tecnología Mecánica II, Cap. III. Disponible en: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecnologia/PDF/cap-323.pdf>
 16. SILVA Franco, Dagoberto. 2012. Laminación en caliente y en frío de aceros al silicio para aplicaciones eléctricas, (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3299/>
 17. ZEA, Elías, Universidad Tecnológica de Panamá, 2018, Ciencias de los materiales, 1. Defectos en las estructuras cristalinas, Disponible en:
<https://www.studocu.com/latam/document/universidad-tecnologica-de-panama/ciencia-de-los-materiales-i/otros/defectos-en-las-estructuras-cristalinas/3042209/view>

18. VILARINHO, C., DAVIM, J. P., SOARES, D., CASTRO, F. and BARBOSA, J. 2005. Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. *Journal of Materials Processing Technology*. 170(1), p. 441-447. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360500631X>
19. MAFFIA, Ernesto Gustavo. 2013. Cobre y sus aleaciones - estructura y propiedades de las aleaciones. Disponible en: https://www.academia.edu/9320946/ESTRUCTURA_Y_PROPIEDADES_DE_LAS_ALEACIONES
20. REYES R. Carlos Arturo. 2008. Propiedades mecánicas de la aleación SAE-788, propiedades mecánicas y tamaño de grano en el cobre, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Disponible en: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/8973/1/Tesis_Completa.pdf
21. American Society for Testing and Materials 2016. ASTM B187/B187M-11 Standard Specification for copper, bus bar, rod, and shapes and general purpose rod, bar, and shapes. Disponible en: www.astm.org
22. BSI Standards Publication. 2013. Norma Europea BS EN 13601 Copper & copper alloys for rod, bus bar, shapes and wires for general electrical purposes. ISBN 978-0-580-74203-3.