

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
EN METALURGIA EXTRACTIVA

**ANÁLISIS DE FALLAS PARA LA DISMINUCIÓN
DE DEFECTOS EN ÁNODOS OBTENIDOS EN
UNA FUNDICIÓN DE COBRE**

Sebastian Malagueño Villalobos

Profesor Guía:
Horacio Aros Meneses

2011

Agradecimientos

Hoy me siento afortunado de poder dar las gracias a todas las personas que estuvieron apoyándome durante estos años de universidad.

Quiero agradecer especialmente a mi madre Elizabeth Villalobos por apoyarme en todo momento, por su esfuerzo y trabajo. A mi tío Andrés Malagueño por ser un pilar fundamental en mi carrera y vida y por su continuo apoyo. A mi tía Joyce y mi tío Santiago por haber aportado de gran forma a alcanzar mí objetivo.

A mis hermanos.

A todas las personas que compartieron conmigo días y noches de estudio y de buenos momentos, a mi polola y a mis amigos que en conjunto hicieron estos años de universidad los mejores de mi vida.

A los Profesores de EIQ, profesores de ramos, revisores de mi memoria, comisión y especialmente al profesor Horacio Aros.

A la empresa Fundición Chagres por haberme dado la posibilidad de realizar este trabajo. A la gente de la Fundición, a Roberto Parada y especialmente a mi tutor Juan José Opazo por su apoyo para poder realizar este trabajo.

Y a todas aquellas personas que creyeron en mí y me apoyaron de una u otra manera.

Resumen

En el segundo semestre del año 2010 en la Fundición Chagres se presentó un problema donde las aprobaciones de cobre en los moldeos Codelco Ventanas llegaron a niveles de 70 u 80%, siendo estos niveles muy bajos para el cumplimiento de los objetivos de las Fundición Chagres. Esta disminución en la aprobación de cobre moldeado fue debido a una exigencia de aumento de calidad por parte del cliente Codelco Ventanas, ya que los ánodos presentaban grietas y una mala formación en la oreja que influían en la operación normal de su refinería.

Con el objetivo de eliminar estas fallas y llegar a una aprobación del 97% se realizó un análisis de falla para encontrar la solución a estos dos grupos presentes (grietas y mala formación en la oreja denominada también doble capa y orejas deformes).

Las grietas se producen por elevadas diferencias de temperatura entre sectores del ánodo lo que genera una discontinuidad en la contracción generando puntos de stress que son motores de crecimiento de grietas. Para igualar las temperaturas se distribuyó de mejor forma el agua de refrigeración lo que se implementó en la operación normal, disminuyendo las grietas de un 10 % a 0,5% de la producción de los ánodos Codelco Ventanas.

La doble capa y orejas deforme se producen por una muy rápida solidificación del cobre en el sector de las orejas por lo que se incrementó la resistencia térmica en la interfase cobre-molde obteniendo buenos resultados. Se lograron disminuir las fallas de doble capa de 3,3% a 0,1 % de la producción de Codelco Ventanas y las orejas deformes disminuyeron de un 3,5% a 0,5% de la producción de Codelco Ventanas.

En el ámbito económico, en una primera instancia la Fundición Chagres tomó la alternativa del reproceso de ánodos rechazados. Al encontrar las soluciones a los problemas e implementar en el proceso las prácticas operacionales se mejoró el VAN

del reproceso en US\$ 361.421, por lo que queda justificado económicamente la implementación de estas nuevas prácticas operacionales.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Problema a Resolver.....	2
3. Descripción de objetivos.....	5
3.1 <i>Objetivo general.....</i>	5
3.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	5
4. Antecedentes generales de la empresa.....	6
4.1 <i>Fundición Chagres.....</i>	7
4.1.1 <i>Recepción y almacenamiento.....</i>	7
4.1.2 <i>Preparación de carga.....</i>	8
4.1.3 <i>Secado de la carga.....</i>	8
4.1.4 <i>Fusión.....</i>	8
4.1.5 <i>Caldera Recuperadora de Calor.....</i>	9
4.1.6 <i>Precipitador Electrostático.....</i>	10
4.1.7 <i>Conversión.....</i>	10
4.1.8 <i>Tratamientos de Escorias.....</i>	11
4.1.9 <i>Refinación.....</i>	11
4.1.10 <i>Moldeo.....</i>	12
4.1.11 <i>Planta de ácido.....</i>	12
4.1.12 <i>Etapas de conversión de gases.....</i>	13
4.1.13 <i>Etapas de absorción de gases.....</i>	13
4.1.14 <i>Planta de aguas.....</i>	13
5. Refino y moldeo.....	14
5.1 <i>Refinación.....</i>	14
5.1.1 <i>Preparación y carga.....</i>	14

5.1.2 Etapas de oxidación- reducción.....	16
5.2 Moldeo.....	28
5.3 Sistema de refrigeración.....	21
5.4 Causas de rechazo de ánodos.....	24
6. Aspectos teóricos.....	26
6.1 Solidificación.....	26
6.1.1 Nucleación.....	27
6.1.2 Crecimiento.....	30
6.2 Estructura de grano de un lingote.....	33
6.2.1 Zona templada.....	33
6.2.2 Zona columnar.....	33
6.2.3 Zona equiaxial.....	33
6.3 Contracción.....	34
6.4 Grietas en enfriamiento.....	36
6.5 Curvas de enfriamiento.....	37
6.6 Impurezas que afectan a las propiedades del cobre refinado.....	39
6.7 Análisis de las causas de que producen fallas.....	40
7. Balances de Masa y Energía.....	41
7.1 Balance de masa.....	41
7.2 Balance de energía.....	41
8. Transferencia de calor.....	43
8.1 Calor por radiación.....	44
8.2 Calor por conducción.....	45
8.3 Calor por Convección.....	46
8.4 Distribución de la transferencia de calor por mecanismo en la rueda de moldeo.....	48
9. Análisis de Grietas.....	50
9.1 Análisis Químico.....	50
9.1.1 Azufre.....	51
9.1.2 Oxígeno.....	52

9.1.3 Arsénico.....	52
9.1.4 Teluro.....	53
9.1.5 Bismuto.....	54
9.1.6 Selenio.....	55
9.1.7 Fósforo.....	56
9.1.8 Otras impurezas.....	57
9.2 Análisis térmico.....	57
9.2.1 Metodología.....	58
9.2.2 Refrigeración.....	61
9.2.3 Mediciones.....	61
9.3 Análisis Velocidad de enfriamiento.....	69
9.4 Efecto de la refrigeración.....	71
10. Análisis doble capa (laminación de la oreja).....	73
10.1 Velocidad del vaciado.....	74
10.2 Transferencia del calor en las orejas.....	75
10.2.1 Efecto del desmoldante.....	77
11. Resultados.....	82
11.1 Grietas.....	82
11.2 Doble capa.....	85
12. Análisis Económico.....	88
12.1 Primera Condición “Reproceso de ánodos”.....	88
12.2 Segunda Condición “Cambios Operacionales”.....	90
12.3 Análisis de Sensibilidad.....	93
13. Conclusiones.....	95
Bibliografía.....	98
Anexos.....	100

Índice de Figuras

Fig. N°1. Grietas bajo las orejas y en el cabezal.....	2
Fig. N°2. Orejas con doble capa.....	2
Fig. N°3. Ubicación geográfica División Chagres.....	6
Fig. N°4. Esquema general de La Fundición Chagres.....	7
Fig. N°5. Horno Flash.....	9
Fig. N°6. Vista general Convertidores Peirce Smith.....	11
Fig. N°7. Vista General de la Rueda de Moldeo de Ánodos.....	12
Fig. N°8. Ilustración de horno de Refino.....	15
Fig. N°9. Cuchara de moldeo.....	19
Fig. N°10. Dispensor del agua de refrigeración en la posición número 3 de la rueda de moldeo.....	22
Fig. N°11. Dispensor del agua de refrigeración en la posición número 7 y 8 de la rueda de moldeo.....	22
Fig. N°12. Ilustración del circuito del agua en la rueda de moldeo.....	24
Fig. N°13. Estructura cristalina del cobre siendo cúbica centrada en las caras.....	26
Fig. N°14. Interfase sólido-líquido.....	27
Fig. N°15. Partícula sólida representando el radio crítico.....	29
Fig. N°16. Formación de un sólido sobre una impureza.....	30
Fig. N°17. Crecimiento planar.....	31
Fig. N°18. a) Crecimiento dendrítico. B) Microfotografía electrónica de dendritas en el acero.....	32
Fig. N°19. Desarrollo de la macroestructura de una fundición durante la solidificación.....	34

Fig. N°20. Ilustración de las tres contracciones: en el líquido, durante la solidificación y en el sólido.....	36
Fig. N°21. Grieta en un ánodo de cobre.....	37
Fig. N°22. Curva de enfriamiento para la solidificación de un metal.....	38
Fig. N°23. Agujeros producidos por hidrógeno.....	39
Fig. N°24. Ilustración de los mecanismos de transferencia de calor presentes en el moldeo de ánodos.....	43
Fig. N°25. Molde de cobre.....	45
Fig. N°26. Vista general de la rueda de moldeo destacando el túnel de enfriamiento (a) y los estanques Bosh (b).....	47
Fig. N°27. Grietas.....	50
Fig. N°28. Termografía de un ánodo a la salida del túnel de enfriamiento.....	58
Fig. N°29. Ilustración mostrando cómo se secciono el ánodo para el análisis.....	59
Fig. N°30. Puntos de medición del ánodo.....	59
Fig. N°31. Puntos de medición en la rueda de moldeo.....	60
Fig. N°32. Distribución de la refrigeración en la rueda de moldeo.....	61
Fig. N°33. Ilustración de la doble capa donde se aprecia la doble solidificación y las orejas abierta.....	73
Fig. N°34. Secuencia de la formación de la doble capa.....	74
Fig. N°35. Lugar de análisis en el molde.....	76
Fig. N°36. Configuración térmica sistema molde - desmoldante.....	76
Fig. N°37. Ánodo rechazado por impregnación de desmoldante.....	81

Índice de Gráficos

Gráfico N°1. Aprobaciones mensuales de los últimos años.....	3
Gráfico N°2. Aprobaciones mensuales de los últimos años de los moldeos Codelco Ventanas.....	3
Gráfico N°3. La velocidad de trasmisión de calor por radiación en KJ/s de un m ² de cobre.....	44
Gráfico N°4 Evolución de la temperatura de un molde en un moldeo de 6 horas.....	46
Gráfico N°5. Distribución del calor cedido del cobre moldeado en la rueda de moldeo.....	48
Gráfico N°6. Distribución del calor transferido por el mecanismo de convección.....	49
Gráfico N°7. Gráfica de la concentración de azufre en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	51
Gráfico N°8. Gráfica de la concentración de oxígeno en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	52
Gráfico N°9. Gráfica de la concentración de arsénico en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	53
Gráfico N°10. Gráfica de la concentración de telurio en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	54
Gráfico N°11. Gráfica de la concentración de bismuto en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	55
Gráfico N°12. Gráfica de la concentración de selenio en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.....	56

Gráfico N°13. Gráfica de la concentración de fósforo en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010.....	57
Gráfico N°14. Curva de enfriamiento con refrigeración total.....	63
Gráfico N°15. Curva de enfriamiento con válvula P cerrada.....	64
Gráfico N°16. Curva de enfriamiento con válvulas P, R cerradas.....	66
Gráfico N°17. Curva de enfriamiento con válvulas P, R, S cerradas.....	67
Gráfico N°18. Curva de enfriamiento con válvulas P, R, S, Q cerradas.....	69
Gráfico N°19. Efecto de la refrigeración en la diferencia de temperatura entre cuerpo y cabezal. Efecto de la refrigeración en la diferencia de velocidad de enfriamiento entre cabezal y cuerpo.....	72
Gráfico N°20. Porosidad para cada densidad de pulpa.....	79
Gráfico N°21. Efecto de la porosidad en la transferencia de calor en la interfase.....	79
Gráfico N°22. Efecto de la porosidad en la transferencia de calor en la interfase y porosidad según densidad de pulpa.....	80
Gráfico N°23 Porcentaje de grietas producidas del total de ánodos Codelco Ventanas.....	84
Gráfico N°24. Producción mensual de ánodos Codelco Ventanas y cantidad de grietas producidas en toneladas.....	84
Gráfico N°25. Porcentaje de doble capa y orejas deformes producidas del total de ánodos Codelco Ventanas producidos.....	86
Gráfico N°26. Producción mensual de ánodos Codelco Ventanas, cantidad de doble capa y orejas deformes producidas en toneladas.....	86
Gráfico N°27. Evolución de las aprobaciones mensuales de los moldeos Codelco Ventanas.....	87
Gráfico N°28. Variación del TIR respecto a la inversión.....	94

Índice de Tablas.

Tabla N°1. Parámetros de operación y concentraciones comunes.....	21
Tabla N°2. Contenidos de azufre y oxígeno en las diferentes etapas del proceso.....	21
Tabla N°3. Valores para algunos materiales de temperatura de solidificación, calor latente de fusión, energía de superficie y subenfriamiento máximo observado para algunos materiales.....	28
Tabla N°4. Porcentaje de contracción o expansión de algunos metales.....	35
Tabla N°5. Mediciones en cabezal con refrigeración total.....	62
Tabla N°6. Mediciones en cuerpo con refrigeración total.....	62
Tabla N°7. Mediciones en cabezal con válvula P cerrada.....	63
Tabla N°8. Mediciones en cuerpo con válvula P cerrada.....	64
Tabla N°9. Mediciones en cabezal con válvulas P, R cerradas.....	65
Tabla N°10. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R cerradas.....	65
Tabla N°11. Mediciones en cabezal con válvulas P, R, S cerradas.....	66
Tabla N°12. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R, S cerradas.....	67
Tabla N°13. Mediciones en cabezal con válvulas P, R, S, Q cerradas.....	68
Tabla N°14. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R, S, Q cerradas.....	68
Tabla N°15. Análisis de velocidad de enfriamiento con refrigeración total.....	69
Tabla N°16. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvula P cerrada.....	70
Tabla N°17. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R cerradas....	70
Tabla N°18. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R, S cerradas.....	70
Tabla N°19. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R, S, Q cerradas.....	70

Tabla N°20. Datos de diferencia de temperatura entre cuerpo y cabezal y diferencia de velocidad de enfriamiento entre cuerpo y cabezal.....	71
Tabla N°21. Conductividades térmicas.....	78
Tabla N°22. Detalle de cantidad de ánodos producidos, rechazados y cantidades por causas de rechazo.....	83
Tabla N°23. Resumen de resultados.....	97
Tabla N°24. Producción, costo de reproceso y premio de ánodos Codelco Ventanas por año.....	89
Tabla N°25. Flujo de caja considerando reprocesar ánodos rechazados.....	89
Tabla N°26. Continuación Flujo de caja.....	90
Tabla N°27. Producción, el aumento del costo de proceso y premio de ánodos Codelco Ventanas por año.....	91
Tabla N°28. Flujo de caja considerando nuevas prácticas operacionales.....	92
Tabla N°29. Continuación Flujo de caja considerando nuevas prácticas operacionales.....	92
Tabla N°30. Variación del VAN y TIR con respecto a la inversión.....	93

Glosario de términos

- Vahos: Se reserva para referirse al agua evaporada desde el concentrado durante el proceso de secado.
- CPS: Convertidor Peirce Smith.
- FSF: Horno de Fusión Flash.
- HLE: Horno de Limpieza de Escoria.
- HA's: Hornos de Refino. Hornos de Ánodos.
- Placa de sangrado: Placa que se ubica en la parte inferior del horno de ánodos la cual contiene el orificio donde se ubica el tapón de greda.
- Tapón de greda: Tapón que retiene el cobre líquido del Horno de Refino.
- Taza receptora de cobre: Recipiente donde cae el cobre líquido desde el Horno de Refino.
- Canaleta: Lugar por el cual fluye el cobre desde la taza receptora hasta la cuchara intermedia.
- Cuchara intermedia: Recipiente que recibe el cobre desde la canaleta y lo entrega a la cuchara de moldeo.
- Cuchara de moldeo: Recipiente que entrega el cobre al molde la cual es controlada por una báscula.
- Lanza Oxiflame: Lanza que inyecta oxígeno.
- Sangrar: Romper el tapón de greda para que fluya el cobre, eje, escoria, etc.
- Pin: Instrumento de hierro para despegar los ánodos de los moldes.
- Estanque Bosh: Recipiente de enfriamiento de ánodos.
- Torres alpinas: Torres de enfriamiento de agua de refrigeración.
- Bomba Booster: Bomba de impulsión de agua hacia las challas.

- QOP: Quemadores de oxígeno-petróleo.
- QAP: Quemadores de aire-petróleo.
- Up-Take: La zona de salida de gases del Horno Flash.
- Challa: Dispensador de agua la cual refrigera los ánodos y moldes.
- Take-off: Tomador de ánodos el cual saca los ánodos de la rueda de moldeo y los deposita en el estanque Bosh.
- Compendio mensual: Muestra, la cual contiene varios ciclos de moldeo del mes la cual se envía a análisis químicos.
- SGS: *Société Générale de Surveillance*. Laboratorio Químico con servicios de inspección, verificación, ensayos y certificación.
- CIMM: Centro de investigación Minero Metalúrgico.
- Cumerio: Cliente de la Fundición Chagres ubicado en Bélgica.
- LG Nikko: Cliente de la Fundición Chagres ubicado en Corea del Sur.
- Cobre México: Cliente de la Fundición Chagres ubicado en México.
- Codelco Ventanas: Cliente de la Fundición Chagres Ubicado en Ventanas, Chile.

1. Introducción.

Las Fundiciones de cobre procesan el concentrado para obtener ánodos de cobre los cuales son dirigidos a las refinerías de cobre para obtener cátodos de cobre con un 99,99% de pureza.

Cualquier defecto producido en los ánodos puede afectar el proceso y la seguridad en las refinerías. Los ánodos formados en las fundiciones siempre presentan algunos defectos en una proporción normal del 2 o 3% del total de las piezas moldeadas, estas piezas son rechazadas en las fundiciones y algunas son vendidas como cobre con un valor menor o son reprocesadas.

La Fundición Chagres bajó sus aprobaciones de moldeo de manera abrupta llegando a ser de un 70 % en los moldeos de ánodos Codelco Ventanas debido a un ajuste en el control de calidad exigido por Codelco Ventanas. Las principales fallas por la que los ánodos eran rechazados con este nuevo control de calidad eran grietas y una laminación de la oreja la cual se denominó doble capa.

Las aprobaciones bajas de estos moldeos son realmente un gran problema, ya que se juntan muchos ánodos rechazados en los patios creando un gran inventario de cobre que debe ser reprocesado. Las cantidades de cobre comprometidas con los clientes mensualmente también se ven afectadas. Hay un costo económico y también de imagen de la División con el cliente. Debido a lo descrito, se realizará un análisis de las fallas asociadas para así encontrar la razón del porqué aparecen y la solución de éstas.

Se evaluarán los resultados y se revisarán los aspectos económicos involucrados.

2. Problema a resolver.

En el último tiempo a la Fundición Chagres se le ha exigido un aumento de calidad en los ánodos de Codelco Ventanas, ya que en estos ánodos estaban apareciendo dos grupos de fallas importantes descritos a continuación:

- **Grietas:** Éstas aparecen debajo de las orejas y en el cabezal como se observa en la Fig. N°1.
- **Doble capa:** Es una mala terminación de la oreja, ésta se lamina lo que provoca que se abra al transportarla. Ver Fig. N°2.



Fig. N°1. Grietas bajo las orejas y en el cabezal.

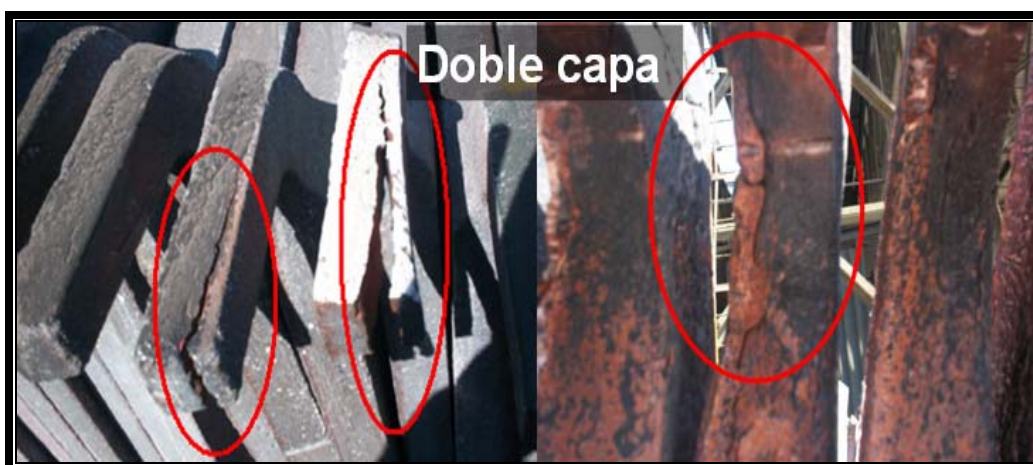


Fig. N°2. Orejas con doble capa.

Debido a estas exigencias, por parte del cliente, las aprobaciones en los próximos ciclos bajaron de manera drástica a porcentajes nunca vistos en moldeos históricos

de la Fundación Chagres. En el Grafico N°1 se aprecia el porcentaje de aprobación mensual de los últimos años y en el Gráfico N°2 se aprecia el porcentaje de aprobación mensual de los últimos años de los moldeos del cliente Codelco Ventanas. Los porcentajes de aprobación se estabilizaron alrededor de 70% y 80 %, porcentajes muy bajos comparados con los porcentajes de los años anteriores, alrededor de 97%.

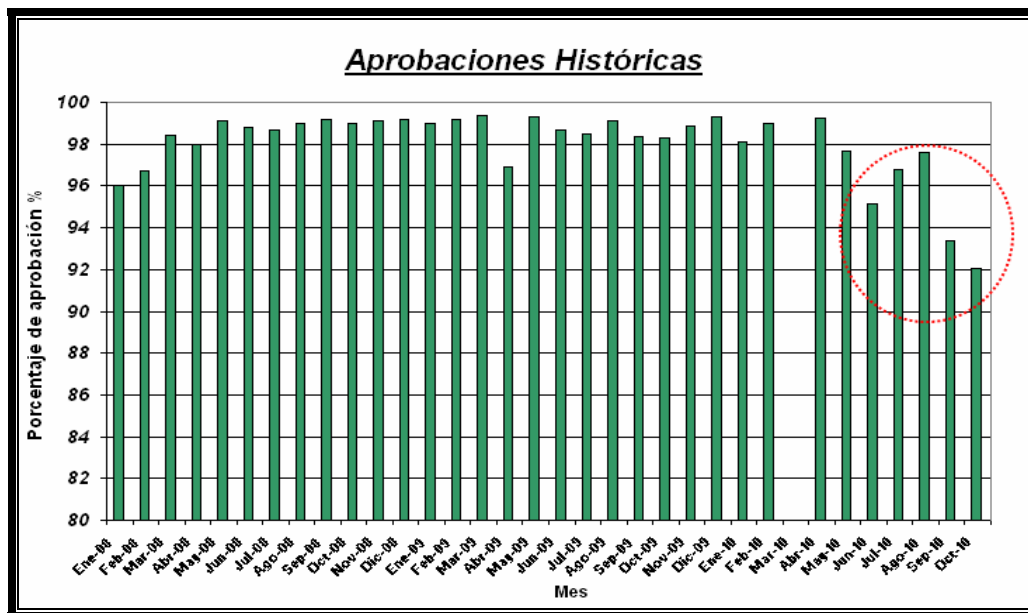


Gráfico N°1. Aprobaciones mensuales de los últimos años.¹

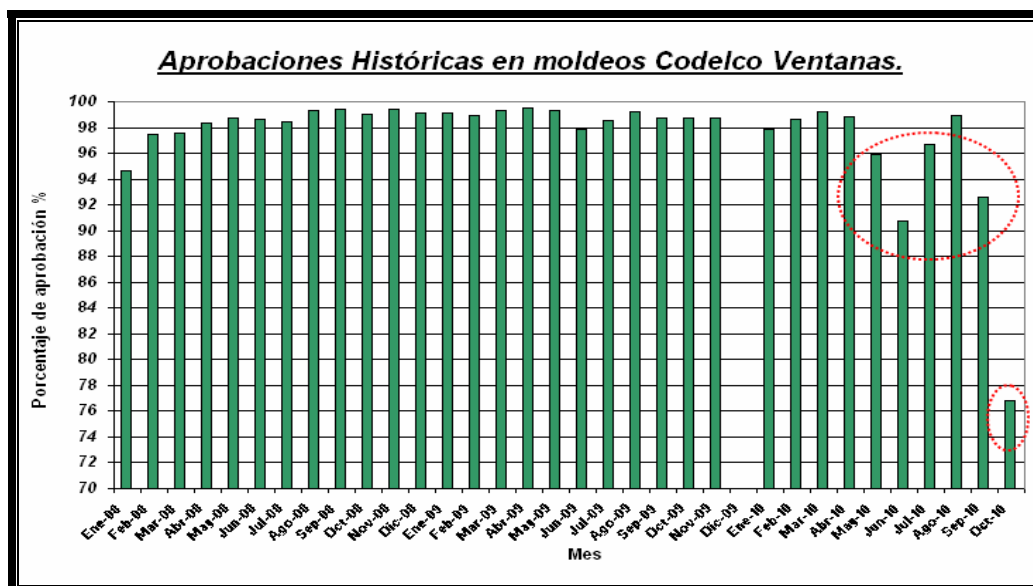


Gráfico N°2. Aprobaciones mensuales de los últimos años de los moldeos Codelco Ventanas.¹

Las grietas debajo de la oreja pueden provocar que las orejas de los ánodos se desprendan, haciendo caer los ánodos. Esto provoca que los ánodos caigan en el fondo de las celdas produciendo problemas operacionales y además es un gran riesgo, ya que los ánodos son transportados tomándolos de las orejas mediante grúas y si la grieta se propaga y la oreja del ánodo se desprende del cuerpo del ánodo este al puede causar un accidente.

La doble capa ocasiona que la oreja del ánodo se lamine en dos al ser transportado, lo que provoca que no se cumpla la geometría del ánodo.

Las grietas en los cabezales están aceptadas en un cierto rango y al ser demasiado grandes los ánodos son rechazados.

Los ánodos rechazados tienen dos vías para continuar su curso en el negocio minero:

- Son reprocesados en los Hornos de Refino provocando un aumento en los costos operacionales.
- Son vendidos como cobre Blister perdiendo valor agregado.

Estos problemas en las aprobaciones de los ánodos han impedido el cumplimiento con las metas de producción en la Fundición Chagres y también han comprometido el cumplimiento a los clientes en cuanto a la calidad de los ánodos y cantidad de cobre asociada.

3. Descripción de objetivos.

3.1 Objetivo general.

- Análisis de fallas con el propósito de disminuir los defectos en los ánodos obtenidos en la Fundición Chagres. Obtener aprobaciones de ánodos superiores a 97 % en los moldeos del cliente Codelco Ventanas.

3.2 Objetivos específicos.

- Determinar mediante revisión de bibliografía las posibles causas de los defectos presentes en los ánodos de Codelco Ventanas para establecer las bases del análisis de fallas.
- Establecer una estructura de análisis para determinar el efecto de las variables que producen defectos en los ánodos de Codelco Ventanas.
- Encontrar la causa real y la solución a los defectos presentes en los ánodos de Codelco Ventanas.
- Evaluar económicamente el efecto del aumento de las aprobaciones de ánodos en los moldeos Codelco Ventanas.

4. Antecedentes generales de la empresa.

Anglo American Chile, es una empresa minera que busca la excelencia en la producción de cobre. Desarrolla sus actividades en forma social y ambientalmente responsable, comprometida con los principios de desarrollo sustentable suscritos por su matriz Anglo American PLC, entregando productos de calidad consistente con los requerimientos y expectativas de sus clientes.

Anglo American Chile es dueña de las siguientes Divisiones que operan en el país:

- **Minera Collahuasi**
- **División Mantos Blancos**
- **División Manto Verde**
- **División El Soldado**
- **División Los Bronces**
- **División Chagres**



Fig. N°3. Ubicación geográfica División Chagres.

4.1 Fundición Chagres.

La Fundición se encuentra ubicada en la V Región en la provincia de San Felipe, camino a Catemu. La capacidad actual de producción es de 150.000 t/año de cobre. Esta fundición procesa concentrados de cobre con aproximadamente un 30% de cobre, provenientes de las minas Los Bronces y El Soldado.

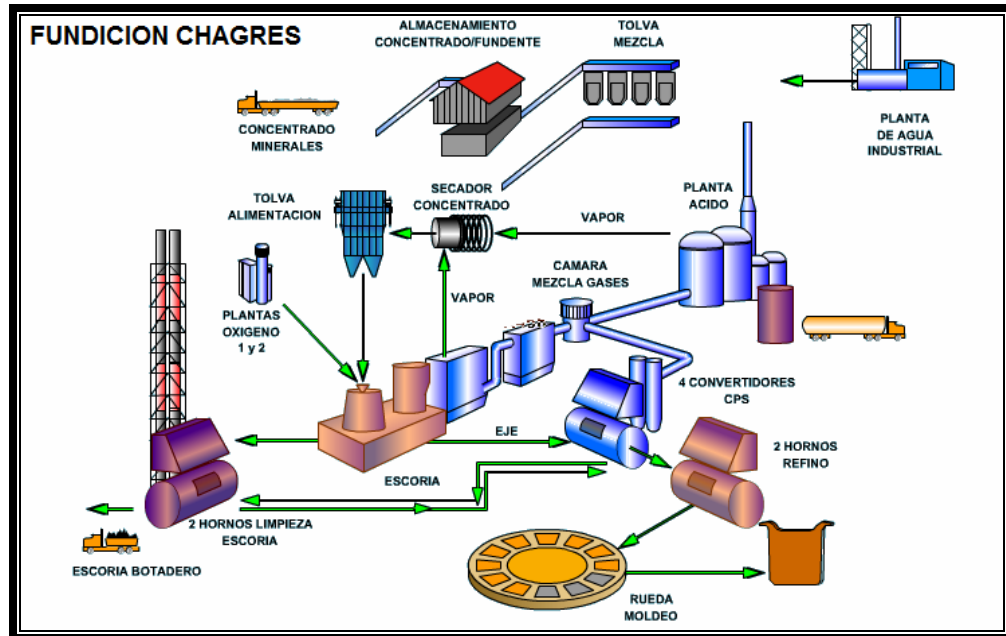


Fig. N°4. Esquema general de la Fundición Chagres.

Sus principales instalaciones se aprecian en la Fig. N°4. y se describen a continuación.

4.1.1 Recepción y almacenamiento.

Los concentrados llegan a la Fundición Chagres en camiones, luego de ser pesados, se descargan en la tolva de recepción de concentrado. Desde este lugar son transportados hasta el edificio de almacenamiento. Existe una capacidad de almacenamiento de concentrado de 15.000 toneladas. Un cargador frontal deposita el material (concentrado y sílice) en una correa transportadora de 120 t/h de capacidad que lo conduce hacia el edificio de almacenamiento de carga.

4.1.2 Preparación de carga.

Se encuentra ubicada en el edificio de mezclas, el cual posee en su interior 4 silos dosificadores, dos de ellos con una capacidad de 500 toneladas para el almacenamiento de concentrado, una tolva de 300 toneladas para el circulante de la fundición y una tolva de 175 toneladas para almacenamiento de sílice. Desde este punto el material es conducido a la etapa de secado por un sistema de tres correas transportadoras dispuestas secuencialmente.

4.1.3 Secado de la carga.

La carga húmeda es transportada hacia un sistema de secado en donde el exceso de humedad es retirado, logrando concentrados sólo con un 0,2% de humedad aproximadamente.

Este sistema posee dos líneas en paralelo, cada una de estas se compone por un secador a vapor de acción indirecta como equipo principal y un filtro de mangas, extractor de vahos y un harnero como equipos auxiliares. Cada secador descarga el concentrado sobre un harnero que permite retirar elementos extraños y el material que se haya aglomerado durante el proceso de secado. El material pasante de cada harnero converge en un sistema de transporte neumático (air lift), que lo conduce hacia una tolva de 400 toneladas de capacidad. Este equipo es el principal punto de acumulación de material entre el sistema de secado y el proceso de fusión.

4.1.4 Fusión.

El horno de fusión flash Outokumpu posee una torre de reacción que tiene la forma de cono truncado. Esta torre se refrigera con agua, que se distribuye desde un anillo ubicado en la parte superior, escurriendo un film sobre la cubierta de acero. El sedimentador o settler está conformado por un crisol, sobre el cual existe una bóveda suspendida. Esta bóveda está formada por ladrillos refractarios de cromo-magnesita y planchas de acero revestidas con ladrillos refractarios. Posee 6 placas refrigeradas de sangría de eje y 3 placas de sangría de escoria. La zona de salida de gases denominada Up-Take es la parte del horno por donde circulan los gases, para ser evacuados verticalmente a la caldera recuperadora de calor. Estructuralmente el Up-

Take, está formado de una carcasa de acero revestida interiormente de ladrillos refractarios.

El eje producido por este horno se retira en ollas de 4 m³ y se envía mediante el uso de grúas a los convertidores Peirce Smith. Por su parte, la escoria producida es derivada a los hornos de limpieza de escoria, mediante el empleo de canaletas, que conectan el FSF con los HLE.¹⁶

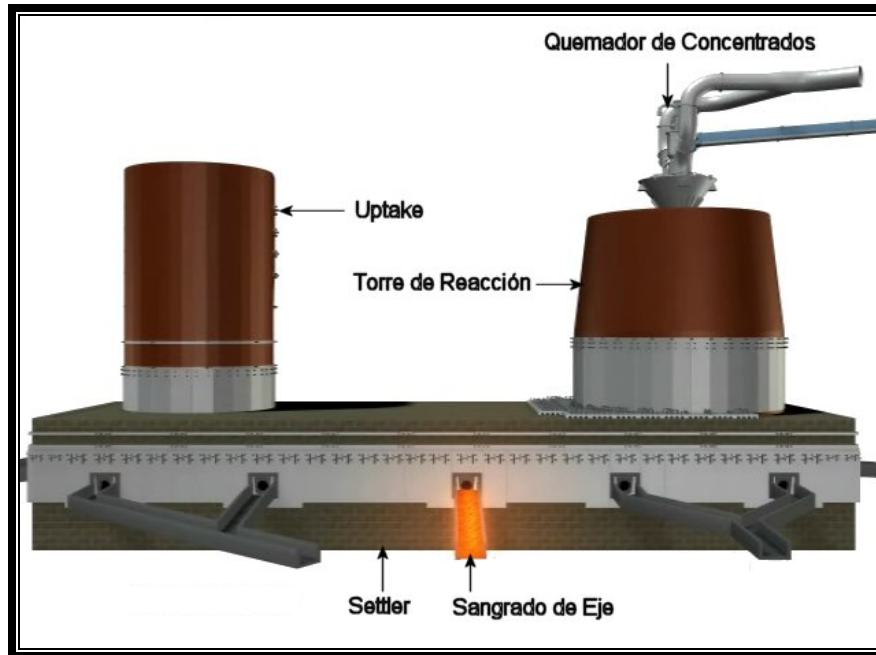


Fig. N°5. Horno Flash.

4.1.5 Caldera Recuperadora de Calor.

La caldera recuperadora de calor es uno de los principales equipos del proceso de tratamiento de gases producidos en el horno flash, desde el punto de vista energético genera vapor para secado concentrado, calentamiento de combustible Enap 6 y otros. En el proceso de producción de vapor se utilizan dos circuitos de agua: agua de alimentación y agua de circulación. La primera, es la encargada de mantener constante los niveles requeridos para una alimentación permanente del sistema; y la segunda, es la que circula constantemente a través de los tubos de la caldera. Ambas aguas entran al colector de vapor (domo), donde ocurre la separación del vapor saturado del agua mediante dispositivos mecánicos. La producción de vapor es de 25 t/h a una presión de 60 bar.

4.1.6 Precipitador Electrostático.

El precipitador de polvos tiene como misión separar los polvos en suspensión de la corriente gaseosa y recolectarlos para su recirculación hacia el proceso. Estos equipos operan mediante campos eléctricos de alto voltaje para la separación de partículas sólidas y en suspensión de los gases mediante el principio de ionización y precipitación de partículas en placas.

4.1.7 Conversión.

La Fundición Chagres cuenta con 4 equipos de conversión, operando siempre con un mínimo de 3 equipos en caliente.

Los convertidores reciben distintos materiales líquidos y sólidos, dependiendo de la etapa de soplado en que se encuentren. El proceso de conversión genera cuatro tipos de productos: una escoria fayalítica resultante de la primera etapa de conversión, con un contenido de cobre de un 6%; una escoria oxidada, rica en cobre, producto de la etapa de soplado al cobre, un cobre blister con un contenido de cobre entre un 97% (cobre sucio) y un 99,2% (cobre limpio) y los gases dirigidos hacia la planta de ácido.

Finalmente, el cobre blister producido por los CPS es descargado en ollas de 2,5 m³ (aproximadamente 12 toneladas de cobre) y transportado mediante el uso de las grúas hacia los hornos de refinación (HA's).¹⁰



Fig. N°6. Vista general Convertidores Peirce Smith.

4.1.8 Tratamientos de Escorias.

La Fundición cuenta con 2 HLE. Estos hornos reciben escoria del FSF y de los CPS, efectuando una reducción y sedimentación de la misma, para entregar un plateado con una ley aproximada de un 62% Cu y una escoria a botadero con un contenido máximo de cobre de 1,2%. Para la reducción se usa normalmente, como elemento reductor, petróleo Enap-6 y/o diesel.

El plateado producido por los HLE es retirado en ollas de 4 m³, las cuales son transportadas hacia los CPS mediante las grúas de la nave. En tanto, la escoria producida por los HLE es enviada al botadero en ollas de 14 m³, montadas sobre un camión Kress.

4.1.9 Refinación.

La Fundición Chagres cuenta con 2 Hornos de Refino, del tipo basculante, para la realización del proceso de refinación a fuego del cobre blister. Estos hornos reciben el cobre blister procedente de los CPS y lo someten al proceso de refinación a fuego, consistente en 2 etapas consecutivas: una, de oxidación en donde se inyecta aire comprimido al interior del horno durante el tiempo necesario para llevar los

contenidos de azufre a niveles de 40 ppm; y otra, de reducción que se realiza inyectando petróleo Enap-6 como reductor y aire comprimido como reformador para disminuir el oxígeno contenido en el cobre.

El cobre anódico producido en el proceso de refinación a fuego se descarga por canaleta a la rueda de moldeo, mientras que la escoria resultante de la etapa de oxidación es retornada a un CPS.

4.1.10 Moldeo.

La Fundición Chagres opera con una rueda de moldeo de 16 moldes, asegurando una tasa de moldeo instantánea de 40 t/h y de 35 t/h como promedio, con ánodos que varían entre 275 kg y 410 kg dependiendo de los requerimientos del cliente.



Fig. N°7. Vista General de la Rueda de Moldeo de Ánodos.

4.1.11 Planta de ácido.

En la operación normal los gases generados por el horno flash y los convertidos son impulsados hacia la cámara de mezcla por ventiladores.

El gas proveniente de la cámara de mezcla entra en la torre de humidificación donde es lavado por una ducha en contracorriente de ácido de lavado, eliminándose la mayoría de las impurezas; además, el gas se enfría producto de la evaporación del agua contenida en el ácido de lavado.

En la etapa de humidificación una fracción del gas SO_3 es transformado a H_2SO_4 y una parte del ácido formado es directamente absorbido por el agua del ácido de lavado, sin embargo, la mayor parte de este forma una neblina de ácido sulfúrico que sale de esta sección junto con los gases.

Una parte del ácido es recirculado en la torre sin enfriarlo, el resto representa el producto de este equipo denominado ácido grado C y es enviado a una piscina de decantación de especies sólidas.

Desde la torre de humidificación el gas se envía al Ventury Scrubber a una temperatura levemente inferior a los $80\text{ }^\circ\text{C}$. En él, se retiran casi la totalidad de las impurezas del gas tales como polvos, arsénico, etc.

Posteriormente el gas entra en la torre de enfriamiento con un gran contenido de humedad y temperatura.

La torre de enfriamiento consiste en un estanque con un relleno que permite una mejor distribución y contacto entre el líquido de enfriado y los gases. Los gases una vez enfriados son enviados hacia los precipitadores electrostáticos húmedos.¹⁷

4.1.12 Etapa de conversión de gases.

En esta etapa se realiza la conversión de SO_2 a SO_3 , que se lleva a cabo en un convertidor catalítico, el que contiene diferentes capas de catalizador, cuyo propósito es acelerar la reacción entre el SO_2 y el oxígeno para formar SO_3 . En este proceso el catalizador no es afectado o consumido.

4.1.13 Etapa de absorción de gases.

En esta etapa SO_2 convertido a SO_3 es absorbido por ácido sulfúrico y luego diluido con agua para formar ácido sulfúrico.

4.1.14 Planta de aguas.

La División cuenta con una planta de agua desmineralizada, la cual junto a las torres de enfriamiento, pozos de agua y sistemas de bombeos componen la llamada Planta de Aguas, que tal como su nombre lo indica forma parte de cada uno de los procesos de la División, por ser un sistema centralizado de enfriamiento.¹⁵

5. Refino y Moldeo.

El cobre blister es retirado desde el CPS y transferido a un horno de Refino, donde se realiza un proceso en dos etapas que consisten en eliminar las trazas de azufre remanente vía oxidación y eliminar el exceso de oxígeno adquirido en fase anterior, mediante una reducción con petróleo y/o Enap-6.

Al final de la segunda etapa, el horno de Refino contiene normalmente 180 toneladas de cobre, 99,6% de pureza, listas para ser vaciadas a la rueda de moldeo con capacidad nominal de 40 t/h.

La Fundición Chagres tiene 4 clientes los que exigen una forma, un peso y una composición química a los ánodos. Los clientes son:

- Cumerio: Ánodo de 410 kg.
- Lg Nikko: Ánodo de 410 kg.
- Cobre México: Ánodo de 320 kg.
- Codelco Ventanas: Ánodo de 275 kg.

La forma de cada ánodo se puede apreciar en el Anexo N°2.

5.1 Refinación.

5.1.1 Preparación y carga.

El proceso de refinación se inicia con el calentamiento del horno. El quemador de culata proporciona el calor necesario para mantenerlo a la temperatura adecuada de recepción de carga. La cantidad de calor necesario varía según sea la etapa de operación que se encuentre el horno, con el consiguiente ajuste de los flujos de petróleo y aire.

El horno de Refino se carga con 4 a 5 cargas o ciclos de conversión desde los convertidores Peirce Smith. La carga se hace a través de ollas de 4 m³.

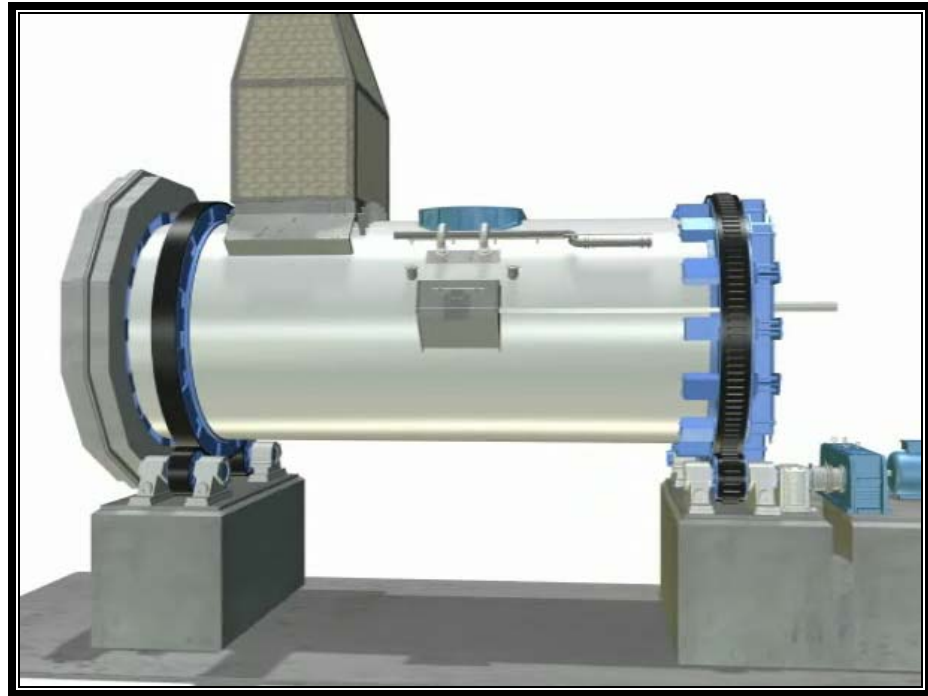


Fig. N°8. Ilustración de horno de Refino.

La oxidación se inicia con el carguío de 3 cargas en el horno de refino. Terminada la oxidación se sacan muestras de oxígeno y se mide la temperatura para luego descargar la escoria generada la cual es llevada hacia los convertidores (50-55% Cu), quedando el horno en espera de la cuarta carga de cobre blister, y así reiniciar la etapa de oxidación.

Ya terminada la etapa de oxidación se da inicio a la etapa de reducción. Al terminar la reducción se procede a sangrar el horno lo cual consiste en perforar el tapón de greda ubicado en la placa de sangrado, ubicada bajo la boca de carga en el manto del horno.

El cobre ya refinado es recibido en la taza receptora de cobre y dirigido a través de la canaleta hasta la cuchara intermedia y cuchara de moldeo, para posteriormente ser moldeado como ánodo en la rueda de moldeo.

Los gases generados en los hornos de Refino son captados por campanas ubicadas en el costado de cada horno y posteriormente mediante ductos conducidos hacia cada una de sus chimeneas para su evacuación.

5.1.2 Etapas de oxidación- reducción.

La oxidación-reducción es básicamente un método que aprovecha la selectividad que presentan ciertas impurezas contenidas en el cobre líquido para oxidarse. Para lograr esto es necesario introducir oxígeno a la fase metálica para oxidarlas. Esto implica una segunda etapa que consiste en reducir el oxígeno remanente que ha quedado contenido en el metal.

a) Oxidación: Remoción de azufre.

Es la etapa de eliminación de impurezas, principalmente azufre. Se inyecta (oxígeno) al cobre fundido a través de una tobera, con el fin de oxidar gran parte de las impurezas contenidas en el cobre Blister. La remoción de azufre se hace a través de la siguiente reacción:



Al mismo tiempo el oxígeno es disuelto en el cobre, existiendo un incremento notorio de oxígeno en el baño durante esta etapa, según la reacción:



El dióxido de azufre producido se evacua por el sistema de extracción de gases.

De esta manera se logra la disminución de azufre según los requerimientos de cada cliente. El tiempo requerido para esta etapa dependerá del contenido de azufre en el cobre blister.

b) Reducción: Remoción de oxígeno.

El propósito de la etapa de reducción es eliminar el contenido de oxígeno disuelto en el baño líquido fundido de cobre Blister, después de la eliminación de las impurezas en la etapa de oxidación en el horno de Refino.

Para lograr esta disminución, se suministra aire y petróleo (Enap-6) el que a través del cracking proporciona los agentes reductores monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), que son los agentes que reaccionarán en el seno del líquido fundido con el oxígeno disuelto y extrayendo éste a la forma de dióxido de carbono (CO₂) y agua.

El oxígeno en exceso disuelto durante la etapa de oxidación, es reducido en esta segunda etapa. La reducción es necesaria, ya que de no ocurrir, todo el oxígeno disuelto precipitaría en forma de Cu_2O sólido (óxido cuproso), generando las indeseadas ampollas.

La reducción se realiza mediante la inyección a través de la tobera del hidrocarburo apropiado, hasta que la concentración de oxígeno baje a un nivel menor de 1000 ppm.

Los agentes reductores efectivos son el hidrógeno y el monóxido de carbono. Estos reaccionan con el cobre líquido de acuerdo a lo siguiente:



Durante esta etapa se producen reacciones exotérmicas, que permiten eliminar el uso del quemador o usarlo parcialmente.

El volumen de gases generados produce una fuerte agitación en el baño, favoreciendo el contacto entre el cobre oxidado y el agente reductor cuyos productos escapan por la salida de los gases, en conjunto con el exceso de reductor que alcance a reaccionar.

c) Control de arsénico.

La impureza controlada durante el refinado es el arsénico, y especialmente cuando los contenidos de arsénico son mayores a 900 a 1000 ppm. El control se realiza mediante la adición de carbonato de sodio (NaCO_3) y carbonato de calcio (CaCO_3) cuyas proporciones actuales son 70% de CaCO_3 y 30% de NaCO_3 , siendo sus adiciones por boca y a granel.

Para extraer el arsénico del baño, se mantiene el nivel de oxidación inyectando aire por toberas, lo que permite generar trióxido de arsénico (As_2O_3), como se ve a continuación (es una reacción exotérmica):



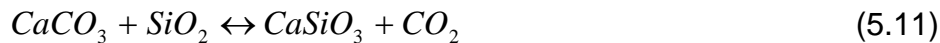
El óxido de sodio y calcio (Na_2O y CaO) provienen de la descomposición (calcinación) del carbonato de sodio y carbonato de calcio, respectivamente, siendo estas reacciones (reacción endotérmica dentro del baño), las siguientes:



Finalmente reacciona el trióxido de arsénico (As_2O_3) con óxido de sodio (Na_2O), para formar escoria alcalina de sodio (Na_3AsO_3) y arsenito de calcio ($\text{Ca}(\text{AsO}_3)_2$), de la siguiente manera (reacción exotérmica dentro del baño):



Además de estas reacciones ocurren las siguientes; el óxido de sodio reacciona con la sílice y forma NaSiO_3 (silicato de sodio), que baña el refractario. La misión del carbonato de calcio es reaccionar con la sílice para formar CaSiO_3 (silicato de calcio), que forma una película protectora a la acción del Na_2SiO_3 . Las reacciones (reacción exotérmica) son las siguientes:



Se espera que el contenido de arsénico (As) deba ser inferior a 1000 ppm.⁴

5.2 Moldeo.

Al terminar la etapa de reducción, el cobre está en condiciones de ser moldeado por lo que comienza el sangrado del horno perforando el tapón de greda ubicado en la placa de sangrado utilizando una lanza Oxiflame. Una vez abierto el pasaje, el horno es girado para que el cobre contenido en el horno se vierta en la canaleta y fluya hasta la rueda de moldeo. Durante el recorrido del cobre a través de la canaleta los quemadores a gas situados en el extremo de la canaleta, ubicados directamente sobre el flujo de cobre, proporcionan el calor necesario que permite que el baño de cobre líquido llegue a la rueda en condiciones de ser moldeado. La taza receptora, la canaleta, la cuchara intermedia y la cuchara de moldeo (ver Fig. N°9), están

recubiertas con una mampostería de cemento y concreto, y deben ser reacondicionadas para cada ciclo de moldeo debido al deterioro que sufren.



Fig. N°9. Cuchara de moldeo.

En ocasiones, antes de moldear el cobre refinado, es desviado hacia ollas aproximadamente de 5 toneladas cuyo destino es la fabricación de moldes. El sangrado finaliza una vez vaciado el horno.

Iniciado el sangrado comienza simultáneamente la etapa de moldeo.

La rueda de moldeo trabaja de forma continua girando sus 16 moldes para una operación cíclica donde cada molde es llenado, enfriado, inspeccionado, desmoldado y preparado nuevamente para empezar el llenado. Previo al llenado al molde se le agrega desmoldante (ceniza de hueso) el cual se adiciona desde la campana ubicada sobre un sector de la rueda reforzando con una mayor cantidad para evitar que se peguen los ánodos. Mediante la cuchara de moldeo el cobre se vierte en los moldes. La temperatura de moldeo es del orden de 1150°C a 1190°C, y una vez lleno los moldes, avanza la rueda de moldeo al sistema de enfriamiento por agua donde se solidifica. Los vapores producidos son llevados por ductos hacia un pozo

de acumulación para luego ser evacuados de la nave por chimenea. Luego del enfriamiento los ánodos son inspeccionados. Posteriormente, los ánodos son desprendidos y levantados por el pin para ser retirados por una máquina volteadora especial, que los toma de las orejas y los introduce en el estanque de enfriamiento o Bosh Tank. Finalmente, los ánodos son retirados del estanque Bosh con ayuda de horquillas en grupos de 4 a 6 ánodos para ser depositados en el tren de limpieza e inspección.

Los ánodos aceptados se llevan mediante grúas horquillas al pesaje, engüinchado y almacenado. Desde el área de almacenamiento son cargados a carros de ferrocarril por medio de grúa horquilla o grúa portal para ser transportados a destinos nacionales e internacionales

El rechazo en la rueda en una condición normal es aproximadamente un 3% debido principalmente al no cumplimiento de calidad física del ánodo. De los ánodos rechazados un porcentaje es reprocesado en los hornos de Refino y otro porcentaje es vendido como cobre blister moldeado, lo que se realiza según el cliente. Las principales causas de rechazos son: ánodos acuñados, orejas deformes, cuerpos deformes, protuberancias, impregnados con desmoldante, grietas y por peso. Los moldes son hechos con el mismo cobre anódico y pesan alrededor de 3 toneladas y su geometría cambia según el cliente. Estos moldes luego de cumplir una cantidad de ciclos de moldeo son reprocesados en los convertidores debido al deterioro de estos. Una matriz estampa la geometría del molde en el cobre líquido y al solidificarse queda el molde listo para ser perforado (para que pase el pin) y ser utilizado.⁴

En la tabla N°1 se presentan algunos parámetros de operación de la rueda de moldeo.

Tabla N°1. Parámetros de operación y concentraciones comunes.

Peso ánodo (kg)	275-410
Temperatura de inicio de moldeo (°C)	1150-1190
Temperaturas moldes (°C)	150-250
Peso moldes (kg)	3000
Oxígeno (ppm)	< 2000
Tasa de moldeo (t/h)	25-40
Arsénico promedio (ppm)	500
Azufre (ppm)	< 40
Velocidad de moldeo (Ánodos/h)	110

En la tabla N°2 se aprecian algunos contenidos de azufre y oxígeno en las diferentes etapas del proceso de refinó y moldeo.

Tabla N° 2. Contenidos de azufre y oxígeno en las diferentes etapas del proceso.

Etapá del proceso	ppm de Azufre	ppm de Oxígeno
Cobre Blister	200-800	2000-6000
Después de oxidación	10-40	6000-9000
Después de reducción	10-40	500-1800
Moldeo de ánodos	10-40	700-2000

5.3 Sistema de refrigeración.

El sistema de refrigeración de la rueda de moldeo consiste en un sistema de válvulas las cuales funcionan en automático y manual. Estas válvulas son activadas desde la consola de control de refrigeración. Las válvulas están distribuidas en la rueda de moldeo en la zona de refrigeración que comprende desde la posición número 3 a la posición número 8 (ver Anexo N°2). Las válvulas están distribuidas para dar refrigeración en diferentes puntos del ánodo y el molde, donde el modo de dispersión del agua es de challa. Ver Fig. N°10 y 11.



Fig. N°10. Dispersor del agua de refrigeración en la posición número 3 de la rueda de moldeo.

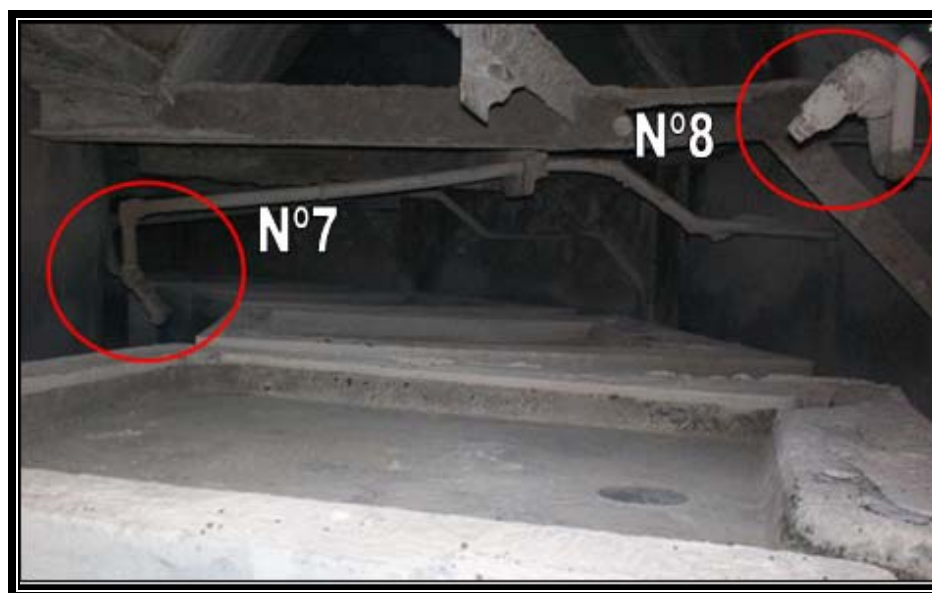


Fig. N°11. Dispersor del agua de refrigeración en la posición número 7 y 8 de la rueda de moldeo.

Las válvulas en modo automático se activan por el sistema de control el cual calcula un promedio de las temperaturas medidas por los pirómetros existentes en la rueda de moldeo (ánodo, molde, superficie de molde) y los compara con los settings

ingresados de forma manual para cada cliente y para cada válvula. Las válvulas en modo manual se pueden activar y desactivar según como el operador lo encuentre conveniente.

El sistema de refrigeración también cuenta con dos estanques Bosh, los cuales enfrían el ánodo antes de salir al patio de los ánodos para ser revisados. Los ánodos tomados por el Take-off son puestos en los estanques Bosh que están ajustados según las medidas de cada cliente.

El agua utilizada como refrigerante circula en un circuito cerrado. El agua se junta en un pozo llamado Estanque de Acumulación de una capacidad de 50 m³ el cual cuenta con dos bombas que impulsan el agua hacia dos torres alpinas encargadas de bajar la temperatura del agua a través de un ventilador. El agua que sale de las torres alpinas se acumula en un estanque llamado Estanque de Recirculación de una capacidad de 30m³ el cual recibe agua fresca de una válvula cuando el nivel es bajo. Este estanque cuenta con dos bombas de 25 hp y un caudal de 45m³/h el cual impulsa el agua hacia distintas partes de la rueda de moldeo. Una parte de esta agua va a los estanques Bosh y luego se recircula al pozo de acumulación empezando así un nuevo ciclo para el agua. Otra parte del agua es llevada a las challas de refrigeración impulsadas por una bomba llamada Booster para otorgar más presión al flujo de agua refrigerante. El agua utilizada y los vapores producidos son canalizados hacia el estanque de acumulación terminando y empezando un nuevo ciclo de refrigeración para el agua. La Fig. N°12 muestra el esquema del circuito del agua de refrigeración.⁴

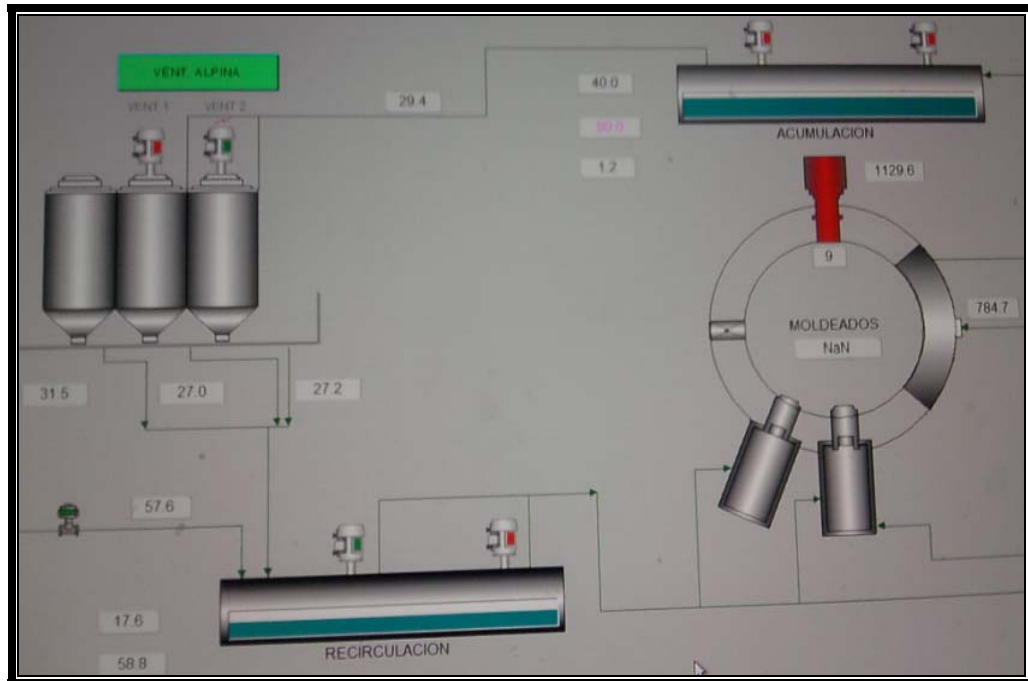


Fig. N°12. Ilustración del circuito del agua en la rueda de moldeo.

5.4 Causas de rechazo de ánodos.

Los ánodos para ser aprobados por calidad física tienen que cumplir las siguientes condiciones:

De cuerpo:

- No debe estar acuñaado.
- No debe estar pandeado.
- Debe cumplir los espesores definidos por el cliente (grueso o delgado)
- No debe tener protuberancias mayores a las especificadas por el cliente
- No debe tener grietas mayores a las especificadas por el cliente
- Debe estar dentro del rango del peso especificado por el cliente
- No debe tener impregnación de desmoldante
- No debe estar deforme
- No debe tener rebaba o aletas

De orejas:

- No debe tener grietas
- Debe cumplir los espesores definidos por el cliente (grueso o delgado)
- Debe cumplir con la geometría correcta y distancia entre orejas
- No debe estar deforme
- No debe estar doblada
- No debe tener rebaba (aleta que se extiende fuera de la forma del ánodo comun).
- No debe presentar laminación (doble solidificación)

6. Aspectos Teóricos.

6.1 Solidificación.

Todos los metales en algún momento de su procesamiento son líquidos. El líquido se solidifica al enfriarse por debajo de su temperatura de solidificación. El material puede ser utilizado tal como se solidificó o puede ser procesado posteriormente mediante trabajo mecánico o térmico.

Las estructuras producidas durante la solidificación afectan las propiedades mecánicas e influyen sobre el tipo de procesamiento posterior. En particular se puede controlar la forma y el tamaño de granos mediante solidificación.

Durante la solidificación, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance a un orden de largo alcance, es decir, una estructura cristalina.

Específicamente el cobre presenta una estructura cúbica centrada en las caras como se puede apreciar en la Fig. N°13.

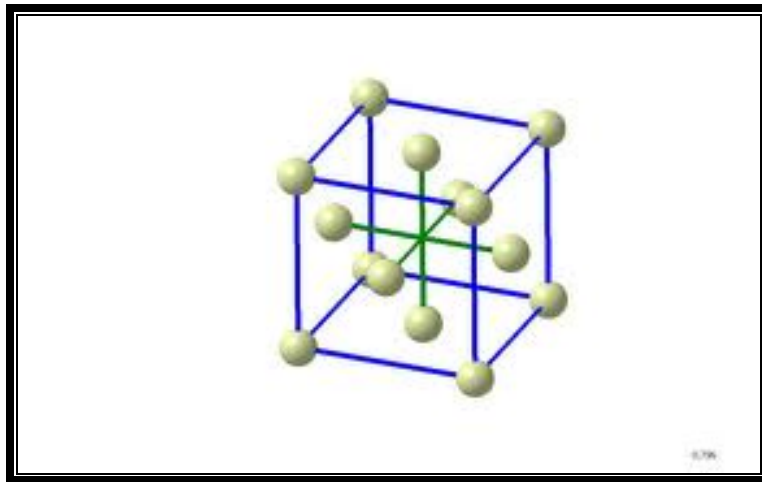


Fig. N°13. Estructura cristalina del cobre siendo ésta cúbica centrada en las caras.

La solidificación requiere de dos pasos:

- Nucleación
- Crecimiento

6.1.1 Nucleación.

Es de esperarse que un material se solidifique cuando el líquido se enfríe justo por debajo de su temperatura de fusión o solidificación, y a que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es en ese momento menor que la energía del líquido. Esta diferencia en energía entre el líquido y sólido es el cambio de energía libre de volumen ΔG_v , la que conforme aumenta de tamaño el sólido, ΔG_v se hace mayor.

Sin embargo, cuando se forma el sólido, se crea una interfase entre éste y el resto del líquido como se puede apreciar en la Fig. N°14.

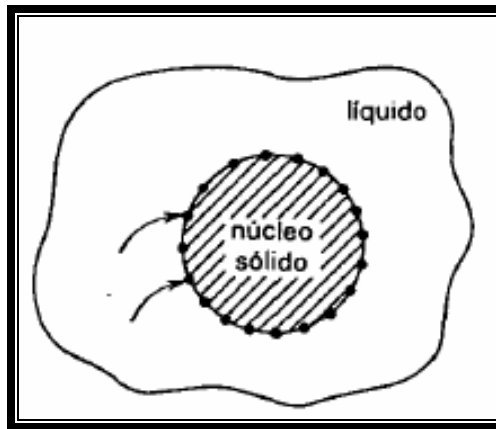


Fig. N°14. Interfase sólido-líquido.

A esta interfase se le asocia una energía libre de superficie σ , que cuanto más grande sea el sólido, mayor será el incremento en energía de superficie. Entonces, el cambio total de energía ΔG se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma \quad (6.1)$$

Donde $\frac{4}{3} \pi r^3$ es el volumen de un núcleo sólido esférico de radio r , $4\pi r^2$ es el área de la superficie del mismo, σ es la energía libre de superficie y ΔG_v es el cambio de energía libre de volumen, el cual es negativo.

El tamaño del radio crítico r^* está dado por:

$$r^* = \frac{2\sigma T_m}{\Delta H_f \Delta T'} \quad (6.2)$$

Donde ΔH_f es el calor latente de fusión, T_m es la temperatura de solidificación de equilibrio en $^{\circ}\text{Kelvin}$, y $\Delta T' = T_m - T$ es el subenfriamiento cuando la temperatura del líquido es T . El calor latente de fusión representa el calor cedido durante la transformación de líquido a sólido. Conforme se incrementa el subenfriamiento, el radio crítico requerido para la nucleación disminuye. En la Tabla N^o3 se muestran algunos valores de temperatura de solidificación, calor latente de fusión, energía de superficie y subenfriamiento máximo observado para materiales seleccionados.

Tabla N^o3. Valores para algunos materiales de temperatura de solidificación, calor latente de fusión, energía de superficie y subenfriamiento máximo observado para algunos materiales.

Material	Temperatura (°C)	Calor latente (J/cm ³)	Energía de Superficie $\times 10^{-3}$ (J/cm ³)	Subenfriamiento típico para la nucleación homogénea (°C)
Ga	30	488	56	76
Bi	271	543	54	90
Pb	327	237	33	80
Ag	962	965	126	250
Cu	1085	1628	177	236
Ni	1453	2756	255	480
Fe	1538	1737	204	420
H ₂ O	0			40

Cuando el sólido es muy pequeño (menor que r^* en la Fig. N^o15), un crecimiento adicional hace que aumente la energía libre. En vez de crecer, el sólido se vuelve a fundir para reducir la energía libre. Este sólido pequeño se conoce como embrión. El líquido está subenfriado, ya que está por debajo de la temperatura de solidificación al equilibrio. El subenfriamiento ΔT es la temperatura de solidificación al equilibrio, menos la temperatura real del líquido.

Pero cuando el sólido es mayor que r^* , el crecimiento adicional hace que la energía total del sistema se reduzca, por lo que el sólido formado es estable. La nucleación ocurrió con éxito y ahora se dará el crecimiento de la partícula sólida denominada núcleo.

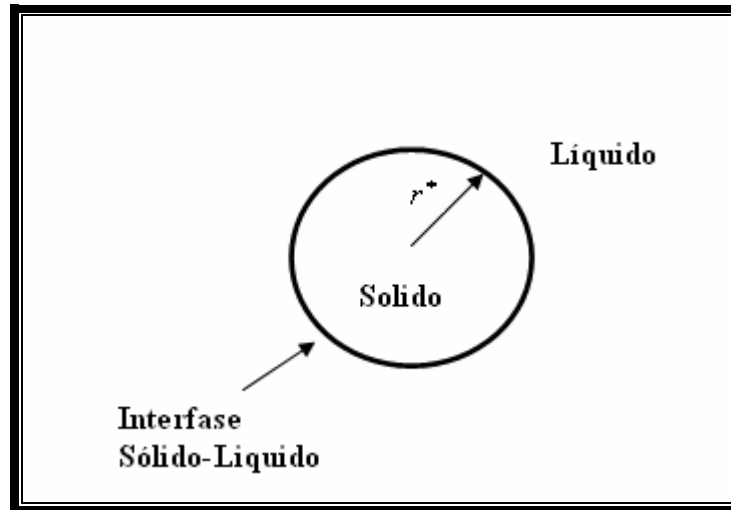


Fig. N°15. Partícula sólida representando el radio crítico.

a) Nucleación Homogénea.

Cuando el líquido se enfría lo suficiente por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se combinan dos factores para favorecer la nucleación: primero, se agrupan los átomos para formar embriones más grandes; y segundo, la mayor diferencia en energía libre de volumen entre el líquido y el sólido reduce el tamaño crítico del núcleo. La nucleación homogénea ocurre cuando el subenfriamiento es lo suficiente como para causar la formación de un núcleo estable.

b) Nucleación Heterogénea.

A excepción de experimentos fuera de lo común en laboratorios, la nucleación homogénea nunca ocurre en los metales líquidos. En lugar de ello, las impurezas que están en contacto con el líquido, ya sea en suspensión o sobre las paredes del recipiente que lo contiene, proveen una superficie sobre la cual se puede formar el sólido líquido (ver Fig. N°16). Solamente necesitan agruparse unos cuantos átomos para producir una partícula sólida con el radio de curvatura requerido. Para alcanzar

este tamaño crítico se necesita menos subenfriamiento, por lo que la nucleación empieza con mayor facilidad. La nucleación sobre superficies de impurezas se conoce como nucleación heterogénea.

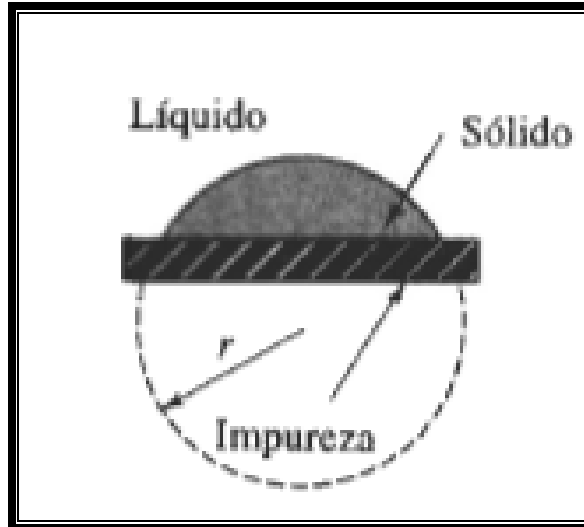


Fig. N°16. Formación de un sólido sobre una impureza.

6.1.2 Crecimiento.

Una vez formados los núcleos, el crecimiento ocurre conforme los átomos se integran a la superficie del sólido. La naturaleza del crecimiento del sólido dependerá de la forma en que se va extrayendo el calor del sistema. Deben extraerse dos tipos de calor: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El calor específico es el calor necesario para cambiar un grado la temperatura de una unidad de peso de material. El calor específico deberá ser eliminado primero, ya sea por radiación hacia la atmosfera circundante, o por conducción a través del molde de que contiene el material, hasta que el líquido se enfríe a su temperatura de solidificación.

Antes de que se complete la solidificación deberá eliminarse de la interfase sólido-líquido el calor latente de fusión. La manera en la cual se libere o retire este calor determinará el mecanismo de crecimiento de los núcleos y la estructura final.

a) Crecimiento planar.

Cuando un líquido bien inoculado se enfría al equilibrio, la temperatura del líquido es mayor que la temperatura de solidificación, y la temperatura del sólido está en o por

debajo de esa temperatura. Durante la solidificación, el calor latente de fusión es eliminado por conducción desde la interfase sólido-líquido, a través del sólido y hacia los alrededores. Cualquiera pequeña protuberancia que empiece a crecer en la interfase está rodeada de líquido con una temperatura mayor a la de solidificación (ver Fig. N°17). El crecimiento de la protuberancia se detendrá hasta que el resto de la interfase la alcance. Este mecanismo de crecimiento se conoce como crecimiento planar, y ocurre por el desplazamiento de la interfase sólido-líquido lisa o plana hacia el líquido.

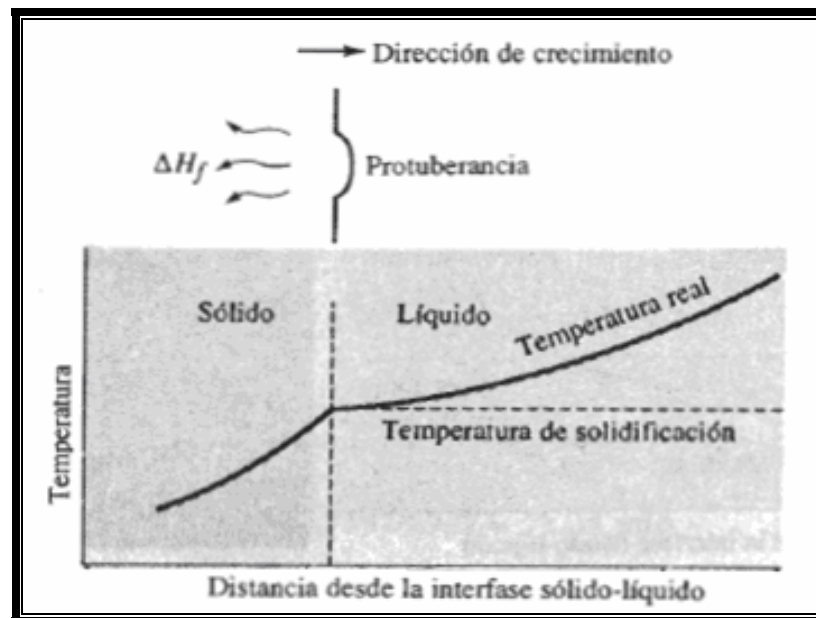


Fig. N°17. Crecimiento planar.

En la Fig. N°17 se aprecia que cuando la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de solidificación, una protuberancia existente en la interfase sólido-líquido no crecerá, conservándose una interfase plana. El calor latente se elimina de la interfase a través del sólido.

b) Crecimiento dendrítico.

Cuando la nucleación es débil, el líquido se subenfria antes de que se forme el sólido (ver Fig. N°18). Bajo estas condiciones, una protuberancia sólida pequeña, llamada dendrita se forma y crea en la interfase. Conforme crece la dendrita, el calor latente de fusión pasa al líquido subenfriado, elevando su temperatura hacia la temperatura

de solidificación. En los troncos de las dendritas primarias también pueden crecer brazos secundarios y terciarios para acelerar la liberación del calor latente de transformación. El crecimiento dendrítico continúa hasta que el líquido subenfriado alcanza la temperatura de solidificación. Cualquier líquido restante se solidificará mediante el mecanismo de crecimiento planar. La diferencia entre el crecimiento planar y el dendrítico ocurre debido a las distintas formas de disipar el calor latente. El recipiente o molde debe absorber el calor en el crecimiento planar, mientras que en el crecimiento dendrítico el calor es absorbido por el líquido subenfriado. En los metales puros, el crecimiento del dendrítico representa sólo una pequeña fracción del crecimiento total:

$$\text{Fracción dendrítica} = \frac{c \Delta T}{\Delta H_f} \quad (6.3)$$

Donde c es el calor específico del líquido. El numerador representa el calor que puede absorber el líquido subenfriado y ΔH_f es el calor latente que representa el calor total que debe liberarse durante la solidificación. Por lo que a mayor subenfriamiento ΔT , mayor es el crecimiento dendrítico.

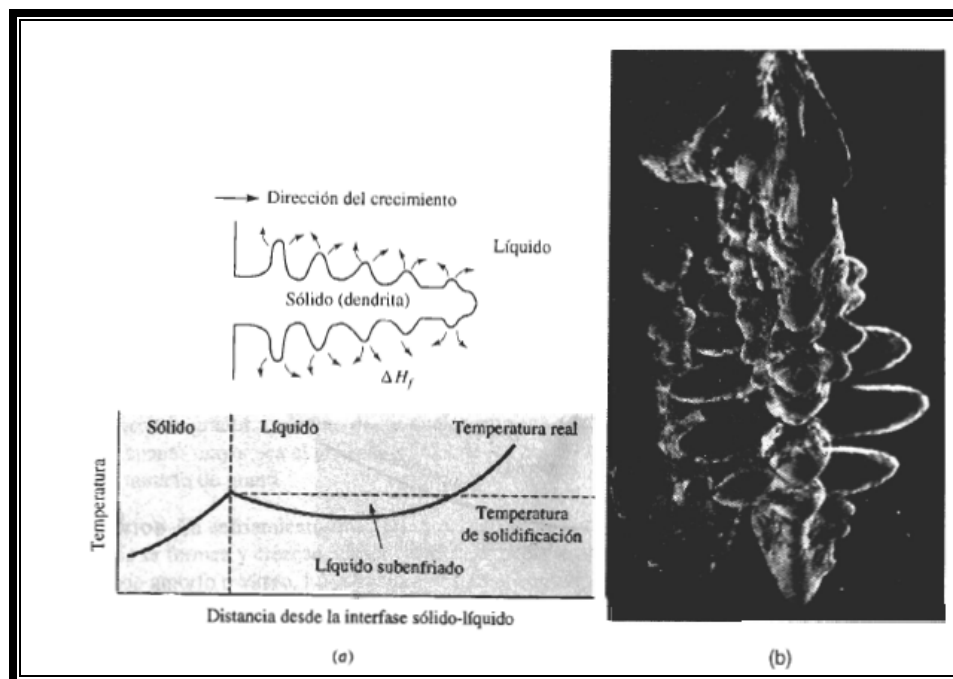


Fig. N°18. a) Crecimiento dendrítico. b) microfotografía electrónica de dendritas en el acero.

6.2 Estructura de grano de un lingote.

Un lingote tiene una estructura de granos similar a la de un ánodo. Los metales fundidos se vacían en moldes, dejando que se solidifiquen. A menudo, el molde produce un producto terminado. En otros casos, el molde produce una forma simple llamada lingote o en el caso específico del cobre, un ánodo. En el caso de un lingote y ánodo se produce una macroestructura, que a veces se conoce como estructura de grano, la cual esta formada por tres partes.

6.2.1 Zona templada.

La zona templada es una estrecha banda de granos, orientados al azar y localizada sobre la superficie de la pieza. El metal que está sobre la pared del molde es el primero en enfriarse a una temperatura igual a la temperatura de solidificación. La pared del molde también tiene muchos puntos de contacto en los cuales puede ocurrir la nucleación heterogénea.

6.2.2 Zona columnar.

Esta zona contiene granos alargados, orientados en una dirección cristalográfica particular. Conforme el material del molde extrae calor de la fundición, los granos de la zona fría crecen en dirección opuesta al flujo de calor o desde las áreas más frías de la pieza a la más caliente. Esta tendencia por lo general significa que los granos crecerán perpendicularmente a la pared del molde.

La formación de la zona columnar queda determinada principalmente por los fenómenos de crecimiento y no por los de nucleación. Los granos pueden estar compuestos de muchas dendritas sólo si originalmente el líquido está subenfriado. Si no hay subenfriamiento, los granos columnares pueden crecer en forma planar al avanzar la solidificación.

6.2.3 Zona equiaxial.

Aunque el sólido puede continuar creciendo de manera columnar hasta transformarse todo el líquido, frecuentemente en el centro de la fundición o lingote se forma una zona de granos equiaxiales. La zona equiaxial contiene granos nuevos,

orientados al azar. Estos granos crecen en forma relativamente redonda o equiaxial, con orientación cristalográfica aleatoria y deteniendo el crecimiento de los granos columnares. La formación de la zona equiaxial es un proceso controlado por la nucleación, y hace que esta porción de la fundición presente un comportamiento isotrópico.

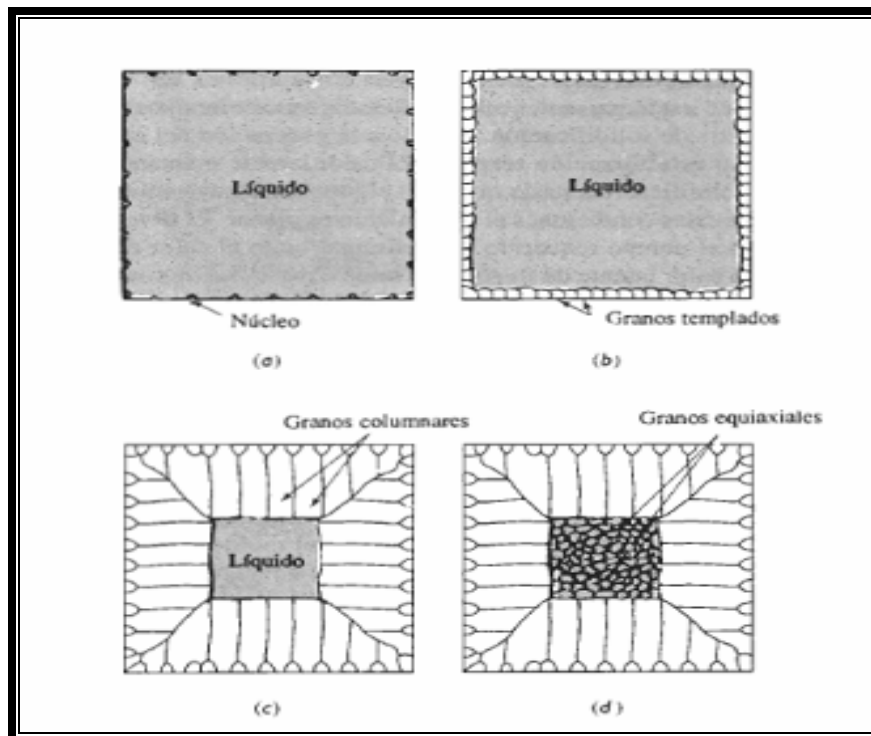


Fig. N°19. Desarrollo de la macroestructura de una fundición durante la solidificación.

En la Fig. N°19, (a) Se inicia la nucleación, (b) se forma la zona templada, (c) un crecimiento preferencial produce la zona columnar y (d) la nucleación adicional crea la zona equiaxial.²⁰

6.3 Contracción.

Generalmente el líquido fundido en el horno ocupa un volumen considerablemente mayor que cuando la pieza es producida finalmente, dando lugar una serie de problemas al fundidor. Existen tres contracciones muy distintas durante la refrigeración del metal fundido a temperatura mayor a la solidificación hasta la temperatura final de la pieza, generalmente, siendo la temperatura ambiente.

A medida que la temperatura disminuye la primera contracción tiene lugar en el estado líquido. Esta contracción térmica es la norma observada por todo el mundo en un termómetro de mercurio que se enfría, y el volumen se reduce casi exactamente linealmente con la caída de la temperatura. Esta contracción no suele ser problemático en las fundiciones.

La contracción de solidificación es otra muy distinta. Esta contracción se produce en el punto de solidificación debido a que en general el sólido es más denso que el líquido. Esta contracción causa numerosos problemas. El cobre tiene una contracción de este tipo de un 5,1% como se aprecia en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Porcentaje de contracción o expansión de algunos metales.

Material	Contracción %
Al	7
Cu	5,1
Mg	4
Zn	3,7
Fe	3,4
Pb	2,7
Ga	+3,2 (Expansión)
H ₂ O	+8,3 (Expansión)

La etapa final de contracción en el estado sólido puede causar una serie de problemas como defectos debido a no poder contraerse libremente debido a que debe cumplir ciertos rasgos geométricos. También se presenta dificultad en predecir el tamaño. La restricción del molde a la contracción puede conducir a problemas localizados como la formación de grietas. Si la contracción no es libre o diferenciada genera puntos de estrés.

La generación de puntos de estrés debido a zonas con diferentes temperaturas son puntos que generan discontinuidades generando diferenciada contracción, o bien, puntos donde se pueden generar grietas y otras fallas.

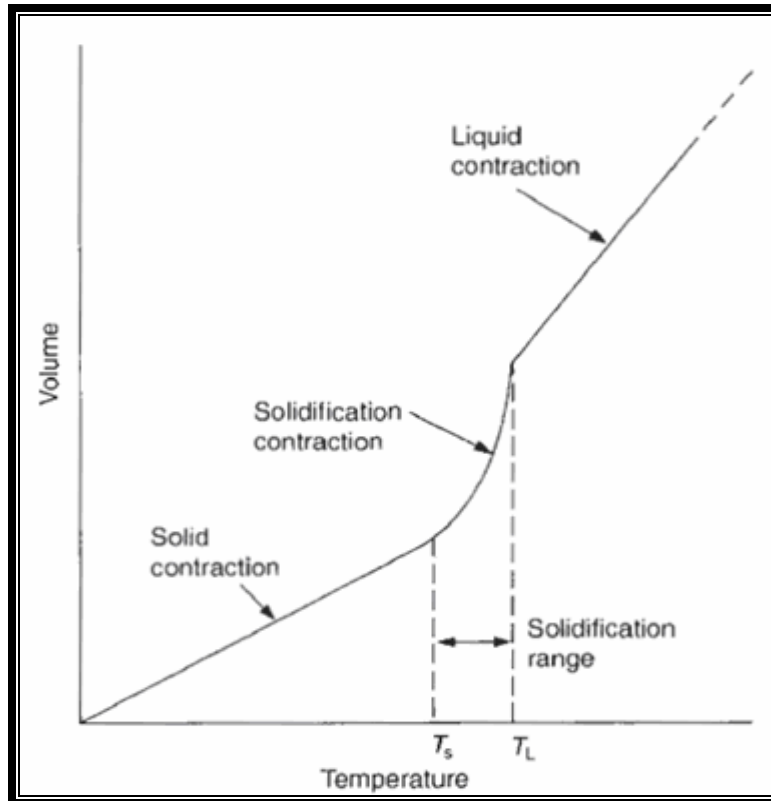


Fig. N°20. Ilustración de las tres contracciones: en el líquido, durante la solidificación y en el sólido.

6.4 Grietas en enfriamiento.

Este término se utiliza para diferenciar el tipo de grieta producido por estrés al producido por forma del molde. El motor de ramificación de este tipo de falla es el estrés.

Las grietas comienzan a partir de elevados esfuerzos. Un recaudador de estrés puede ser un cambio brusco de temperatura en una sección de la pieza.

Películas de óxido también son motores de ramificación de grietas en aleaciones y sistemas con nivel oxidante controlado no son sensibles a estos problemas.

A medida que la pieza se enfría, la relajación del estrés se hace más lento.

Benso relata un evento en 1946 donde una pieza de fundición explotó debido a las altas presiones cuando se estaba cortando. Es fácil hacer caso omiso a estas historias pero deben de servir como advertencias, ya que las piezas pueden contener tales cantidades de presiones que pueden estar al límite del peligro sin ser notadas debido a que el fundido se ve de forma perfecta. Benso en 1938 también hizo

importantes observaciones donde dice que son importantes la tasa de enfriamiento y el tratamiento térmico que se le da a las piezas con relación a las tensiones residuales y el estrés producido por éstas.²

Observaciones de Dodd en 1950 y Kotsyubinskii en 1962 descritas por John Campbell en su libro Casting² dice que la causa principal de tensiones residuales era la interacción de diferentes velocidades de enfriamiento. Las velocidades de enfriamiento están totalmente relacionadas con la temperatura de cada sección de la pieza moldeada y es debido a esto que los autores mencionados recomiendan igualar el enfriamiento en las secciones delgadas o con mayor transferencia de calor con las secciones con transferencia de calor más lentas.



Fig N°21. Grieta en un ánodo de cobre.

6.5 Curvas de enfriamiento.

En las curvas de enfriamiento se muestra cómo cambia la temperatura de un material con el transcurso del tiempo (ver Fig. N°22). El líquido se vierte en un molde a la temperatura de vaciado. La diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura de solidificación es el sobrecalentamiento. El líquido se enfría cuando el molde extrae su calor específico, hasta que llega a la temperatura de solidificación. La pendiente de la curva de enfriamiento, antes de que se inicie la solidificación, es

la rapidez de enfriamiento $\Delta T / \Delta t$. Donde $\Delta T = T_f - T_i$ siendo T_f la temperatura final y T_i la temperatura inicial y siendo Δt el tiempo transcurrido.

Si en el metal líquido están presentes núcleos heterogéneos efectivos, el cambio de estado comienza a la temperatura de solidificación. Debido a la generación del calor latente de fusión se produce una meseta o estabilización térmica. El calor latente mantendrá el líquido restante a la temperatura de solidificación, hasta que todo el líquido se haya solidificado y no se pueda extraer más calor. En estas condiciones el crecimiento es planar. El tiempo de solidificación total de la fundición es el tiempo requerido para eliminar tanto el calor específico del líquido sobrecalentado como el calor latente de fusión y se mide a partir del momento del vaciado, hasta que se completa la solidificación. El tiempo de solidificación local es el requerido para eliminar sólo el calor latente de fusión de algún sitio particular de la fundición, y su medición será a partir del momento en que comienza la solidificación hasta que termina.²²



Fig. Nº22. Curva de enfriamiento para la solidificación de un metal.

6.6 Impurezas que afectan a las propiedades del cobre refinado.

Algunos elementos presentes en el cobre como impurezas afectan las propiedades físicas del cobre refinado, afectando su calidad para bien o para mal. Algunas de estas impurezas son:

Oxígeno: Se encuentra presente en la forma de Cu_2O en el cobre, disminuyendo su resistencia mecánica y haciéndolo quebradizo. En pequeñas cantidades es favorable a la conductividad eléctrica.

Azufre-Selenio-Teluro: Se encuentra casi siempre en el cobre en estado Cu_2S , Cu_2Se y Cu_2Te , perjudicando las propiedades mecánicas. El azufre en exceso provoca levantamiento superficial, grietas y fisuras. El azufre debe ser inferior a 50 ppm.

Arsénico: En proporción 0,1% a 1% aumenta la densidad, la resistencia mecánica, maleabilidad del cobre y tiene un efecto negativo sobre la conductividad eléctrica del cobre.

Plomo: En pequeñas cantidades no perjudica la laminación; en un 0,03% toma el cobre quebradizo en caliente y un 0,04% en frío.

Antimonio: Influye sobre la conductividad eléctrica, pero a veces se adiciona para producir una mayor dureza y resistencia al cobre.

Fierro: No afecta las propiedades mecánicas, sin embargo, disminuye la conductividad eléctrica.

Hidrogeno: Provoca grietas y quebraduras. (Ver Fig. N°23)

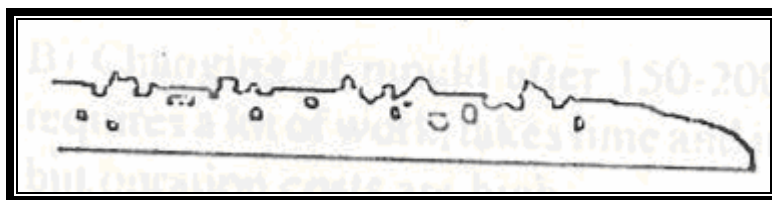


Fig. N°23. Agujeros producidos por hidrógeno.

Carbono: Provoca grietas y quebraduras.

Fósforo: Produce aumento de la resistencia a la ruptura, disminuyendo el alargamiento, maleabilidad y conductividad eléctrica.

Manganeso: Desde indicios hasta 1,5% aumenta la resistencia a la ruptura y a la dureza, en cambio influye poco en el alargamiento.

Metales nobles: No afecta notoriamente las propiedades mecánicas ni eléctricas.

Bismuto: Su expansión en la solidificación genera fisuras.

6.7 Análisis de las causas de que producen fallas.

Cuando se consideran los millones de piezas que se fabrican, no es raro que un porcentaje falle, sin embargo, aunque el número de fallas de una componente sea pequeño, es importante porque puede afectar el prestigio del fabricante en cuanto a la confiabilidad. En algunos casos, sobre todo, cuando la falla causa lesiones o muerte origina costosos litigios.

Para realizar correctamente un análisis de fallas se deben tener en cuenta todas las variables que pueden causar la falla y realizar un monitoreo. Encontrar la información del porqué aparece esta falla y enfocarse en solucionar una a la vez. Es importante revisar el tema químico con respecto a los históricos de las piezas, ya que no siempre la materia prima es la misma. Considerar cambios hechos en materiales o equipos es también un punto importante.²⁰

7. Balance de masa y energía.

7.1 Balance de masa.

El cobre moldeado en la rueda de moldeo es el mismo que entra en el horno de Refino.

Regularmente de 4 a 5 cargas de convertidores, lo que entrega unas 180 toneladas de cobre al 99,6% de pureza.

Por lo tanto la masa que entra a la rueda de moldeo es la misma que sale de la rueda como cobre en forma de ánodo. Por lo tanto:

$$m_{entra} = m_{sale} = 180 t \quad (7.1)$$

7.2 Balance de energía.

El cobre en la rueda de moldeo llega a una temperatura aproximada de 1170 °C y en estado líquido. Esta temperatura es manejada en los hornos de Refino para que al empezar el moldeo se tenga una temperatura superior a 1150 °C y menor a 1200 °C. El cobre sale de la rueda de moldeo a una temperatura promedio de 100 °C y en estado sólido.

La energía liberada, por lo tanto, es el calor sensible más el calor latente del cobre. Entonces:

$$Q = m\Delta H \quad (7.2)$$

Donde:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (7.3)$$

Donde ΔH_1 es el calor latente de fusión y ΔH_2 el calor sensible.

El calor latente de fusión es:

$$\Delta H_1 = 13,263 \frac{kJ}{mol} \quad (7.4)$$

El calor sensible total, lo conforman el calor sensible del líquido y el del sólido, por lo tanto:

$$\Delta H_2 = \Delta H_S + \Delta H_L \quad (7.5)$$

Donde

$$\Delta H_s = \int_{T_0}^{T_s} Cp_s dT \quad (7.6)$$

y

$$\Delta H_L = \int_{T_{s0}}^{T_f} Cp_L dT \quad (7.7)$$

Donde Cp_s y Cp_L son las capacidades caloríficas del sólido y del líquido respectivamente. T_0 es la temperatura de inicio de moldeo, T_s es la temperatura de solidificación y T_f es la temperatura final del ánodo a la salida de la rueda de moldeo.

El calor liberado por un moldeo de 180 toneladas y con temperaturas de inicio de moldeo 1170°C y final de moldeo de 100°C es:

$$.Q = 123.854 MJ \quad (7.8)$$

Cálculos en el Anexo N°1.

8. Transferencia de calor.

En la rueda de moldeo están presentes los tres mecanismos de la transferencia de calor:

- Conducción
- Radiación
- Convección

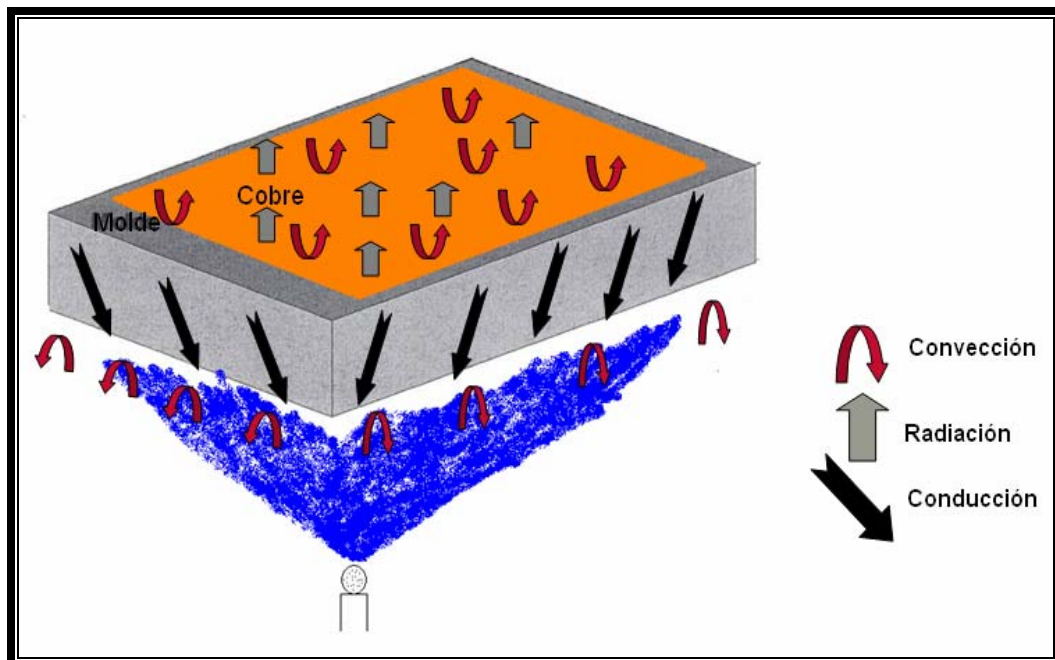


Fig. N°24. Ilustración de los mecanismos de transferencia de calor presentes en el moldeo de ánodos.

Según las dimensiones del ánodo (según el cliente) y el tipo la configuración de refrigeración ocupada será el calor transferido por cada mecanismo.

El calor total transferido es la suma de los calores transferidos por radiación, conducción y convección. Por lo tanto:

$$Q = Q_{\text{radiación}} + Q_{\text{conducción}} + Q_{\text{convección}} \quad (7.9)$$

Con un moldeo de 180 toneladas, una tasa de moldeo de 30 t/h y las temperaturas ya definidas anteriormente, se puede obtener la distribución de cuánto calor se extrae por cada mecanismo.

8.1 Calor por Radiación.

El calor por radiación es transmitido al ambiente y es transmitido durante todo el moldeo.

El calor transmitido viene dada por:

$$Q_{\text{radiación}} = \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (7.10)$$

En donde A es el área superficial y se mide en metros cuadrados (m^2), σ es la constante dimensional, llamada constante de Stefan-Boltzmann que se expresa en unidades del SI y su valor es $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$, T_1 es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K), T_2 es la temperatura superficial del recinto en Kelvin (K) y ε es la emisividad.

Podemos apreciar en el Gráfico N°3 la velocidad de transferencia de calor por radiación en kJ/s a distintas temperaturas por un metro cuadrado de cobre. Se aprecia que a temperaturas más altas es mucho mayor la cantidad de calor emitido.

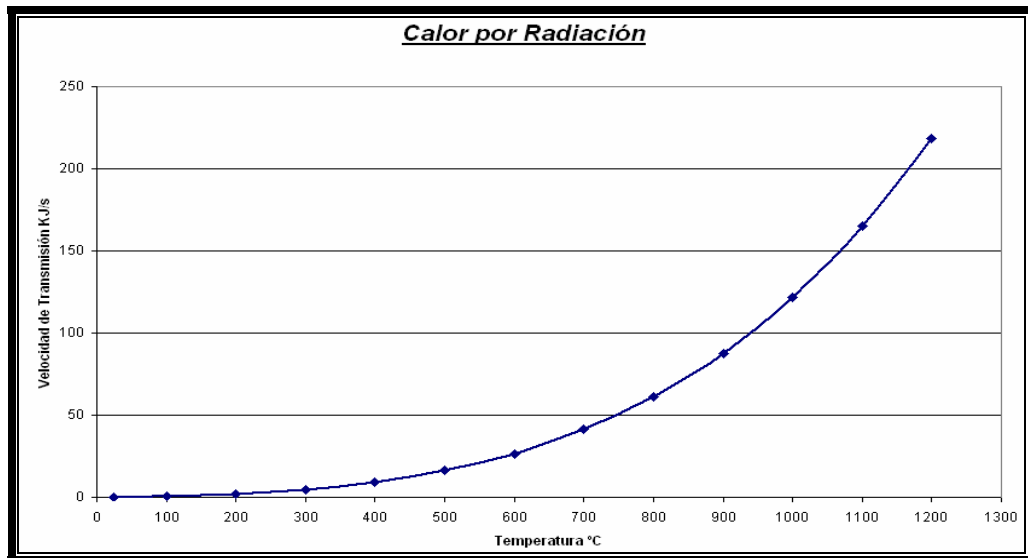


Gráfico N°3. La velocidad de transmisión de calor por radiación en kJ/s de un m^2 de cobre.

La cantidad de radiación emitida por los ánodos Codelco Ventanas en un moldeo de seis horas es la siguiente:

$$Q_{\text{radiación}} = 17.199 \text{ MJ} \quad (7.14)$$

8.2 Calor por Conducción.

El calor transmitido por conducción viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{\text{conducción}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (7.15)$$

Donde k es la conductividad térmica, A es el área de conducción, T es la temperatura y x la dirección del flujo de calor, por lo tanto, $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

La conducción se produce desde el ánodo de cobre hacia el molde. El molde es de cobre y es un muy buen conductor térmico (ver Fig. N°25). El molde es refrigerado por agua lo que extrae el calor que tomó el molde desde el ánodo, por lo tanto, mirando de forma global el sistema, lo que extrae la mayor cantidad de calor es la refrigeración (Convección molde – agua).



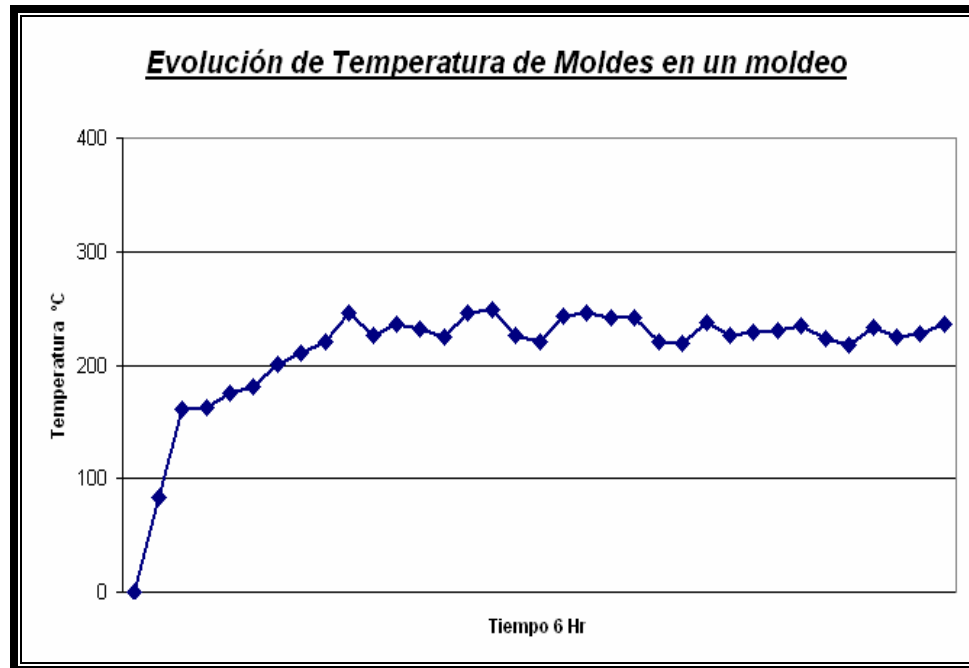
Fig. N°25. Molde de cobre.

Como calor por conducción se considera el calor que reciben los moldes, y no lo que entregan al agua de refrigeración, estos están a una temperatura de 90°C al inicio del moldeo y se estabilizan cerca a 250°C aproximadamente. Este incremento de temperatura se considera para establecer el calor real que toma el molde (Grafica

Nº4).Cada molde pesa 3 toneladas y son 16 en la rueda de moldeo por lo que el calor de conducción es:

$$Q_{conducción} = 3096 MJ \quad (7.16)$$

En el Gráfico Nº4 se aprecia la evolución de la temperatura de un molde en un moldeo de 6 horas.



Grafica. N°4 Evolución de la temperatura de un molde en un moldeo de 6 horas.

En el Gráfico Nº4 se aprecia una estabilización al pasar el tiempo. Los moldes son precalentados hasta una temperatura de 90°C antes de moldear. Al iniciar el moldeo los moldes de cobre llegan rápidamente al un equilibrio de temperatura cercano a los 250°C.

8.3 Calor por Convección.

Cuando un fluido se pone en contacto con una superficie sólida a una temperatura distinta, el proceso resultante de intercambio de energía térmica se denomina transmisión de calor por convección. En donde:

$$Q_{convección} = h_c A (T_s - T_{fluido}) \quad (7.17)$$

h_c es la conductancia convectiva térmica unitaria o coeficiente de transmisión del calor por convección en la interfase líquido-sólido en $W/(m^2K)$, A es el área superficial en contacto con el fluido en m^2 , T_s es la temperatura de la superficie en K y T_{fluido} es temperatura del fluido no perturbado lejos de la superficie transmisora del calor en K. El calor del cobre transferido por convección, es transferido por convección libre y forzada. La convección libre es por el aire que extrae calor en cada posición de la rueda. El calor perdido por convección forzada se realiza en el túnel de enfriamiento (ver Fig. N°26) y en los estanques Bosh (ver Fig. N°26) y el fluido refrigerante es agua.

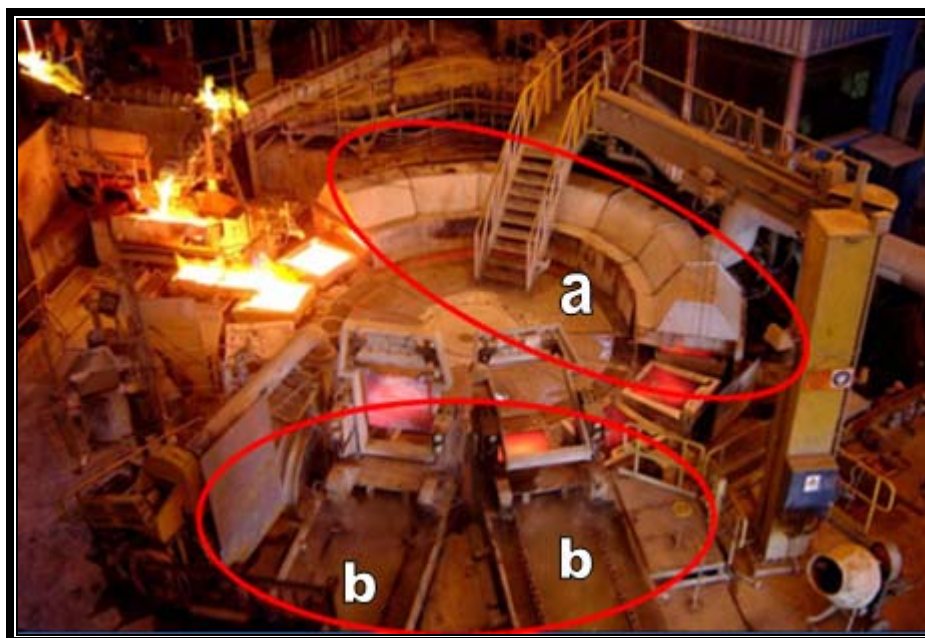


Fig. N°26. Vista general de la rueda de moldeo destacando el túnel de enfriamiento (a) y los estanques Bosh (b).

Por lo que el calor de convección queda definido por:

$$Q_{convección} = Q_{estanque\ Bosh} + Q_{tunel\ enfriamiento} + Q_{convección\ libre} \quad (7.18)$$

Por lo tanto, el calor por convección es:

$$Q_{convección} = 103.559\ MJ \quad (7.22)$$

8.4 Distribución de la transferencia de calor por mecanismo en la rueda de moldeo.

Podemos ver en el Gráfico N°5 la distribución de la transferencia de calor por mecanismo en la rueda de moldeo cuando está moldeando ánodos Codelco Ventanas.

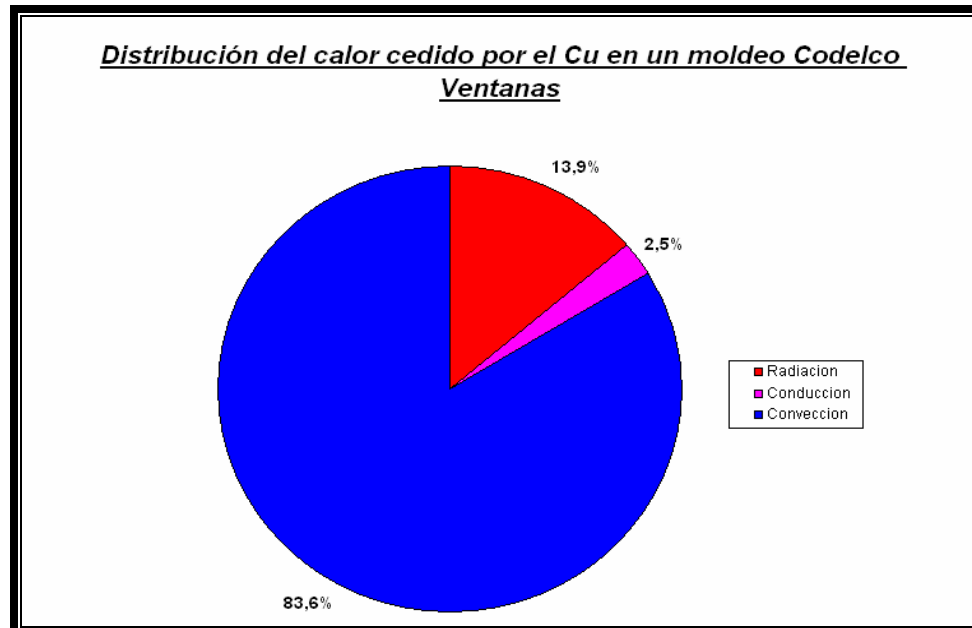


Gráfico N°5. Distribución del calor cedido del cobre moldeado en la rueda de moldeo.

La convección es el mecanismo más importante de transferencia de calor con más de un 80% y en el Gráfico N°6 se puede ver su distribución. El segundo mecanismo es la radiación con un 13,9%. Se debe considerar que la conducción actúa como un intermediario en la transferencia de calor convectiva, ya que la mayoría del calor transferido por convección es llevado al agente refrigerante por conducción. Se debe recordar que el calor de conducción graficado en el Gráfico N°5 es el calor que el molde no cede al agente refrigerante y queda en éste.

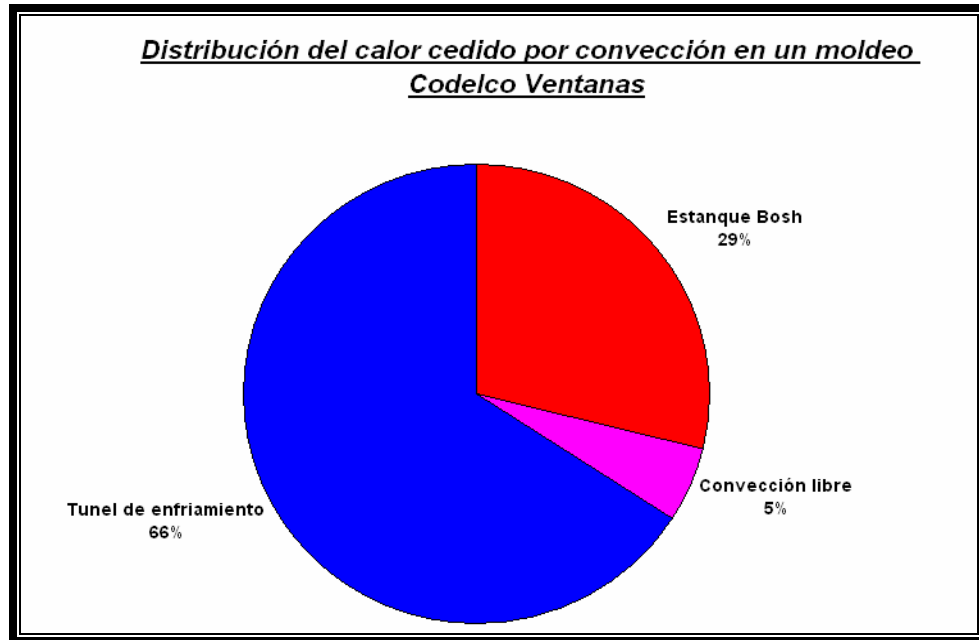
La transferencia de calor por convección se divide de la siguiente manera.

$$Q_{\text{tunel enfriamiento}} = 68.238 \text{ MJ}$$

$$Q_{\text{convección libre}} = 5511 \text{ MJ}$$

$$Q_{\text{estanque Bosh}} = 29.810 \text{ MJ}$$

Cálculos en el Anexo N°1.



Gráfica N°6. Distribución del calor transferido por el mecanismo de convección.

Se aprecia que el túnel de enfriamiento es el punto más importante en la transferencia de calor por convección con un 66% y, el segundo, es el estanque Bosh con un 29%.

9. Análisis de Grietas.

Por lo revisado y definido en el capítulo de Aspectos teóricos las grietas aparecen en los ánodos (ver Fig. N°27) y piezas moldeadas por dos temas principales:

- **Componentes Químicos:** Elementos que generan problemas y no son afines al cobre.
- **Problemas Térmicos:** Diferencias de temperatura en ciertos sectores de una pieza moldeada es lo que genera discontinuidades en la contracción del metal.

En esta memoria se revisaron estos dos puntos.



Fig. N°27. Grietas.

En la Fig. N°27 se aprecia las grietas en los ánodos presentes debajo de las orejas.

9.1 Análisis Químico.

Los análisis químicos fueron realizados en distintos laboratorios (CIMM, SGS y en el Laboratorio interno de Chagres), de los cuales las muestras fueron sacadas según los procedimientos que establece la Fundación Chagres para el muestreo de ánodos y este trabajo fue realizado por gente capacitada. Los análisis de cobre, azufre y oxígeno se realizaron en el laboratorio de la Fundación Chagres. Las otras impurezas

fueron analizadas por el Laboratorio SGS, el CIMM y entre las impurezas analizadas se hallan: el bismuto, telurio, selenio, arsénico, oro, plata, plomo, níquel, y también estos laboratorios realizaron análisis para tener las contramuestra de cobre, oxígeno y azufre.

Estos resultados se compararon con los resultados históricos de la Fundición y con el límite (concentraciones) permitido para que no existan problemas.

9.1.1 Azufre.

Se encuentra casi siempre el cobre en estado Cu_2S , perjudicando las propiedades mecánicas. El azufre en exceso provoca levantamiento superficial (ampollamiento), grietas y fisuras. La cantidad que genera problemas es sobre 50 ppm. En el Gráfico N°7 se aprecia la concentración de azufre en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010 e inicio del 2011. Se muestra además el límite de concentración en el caso de que el azufre genere problemas.

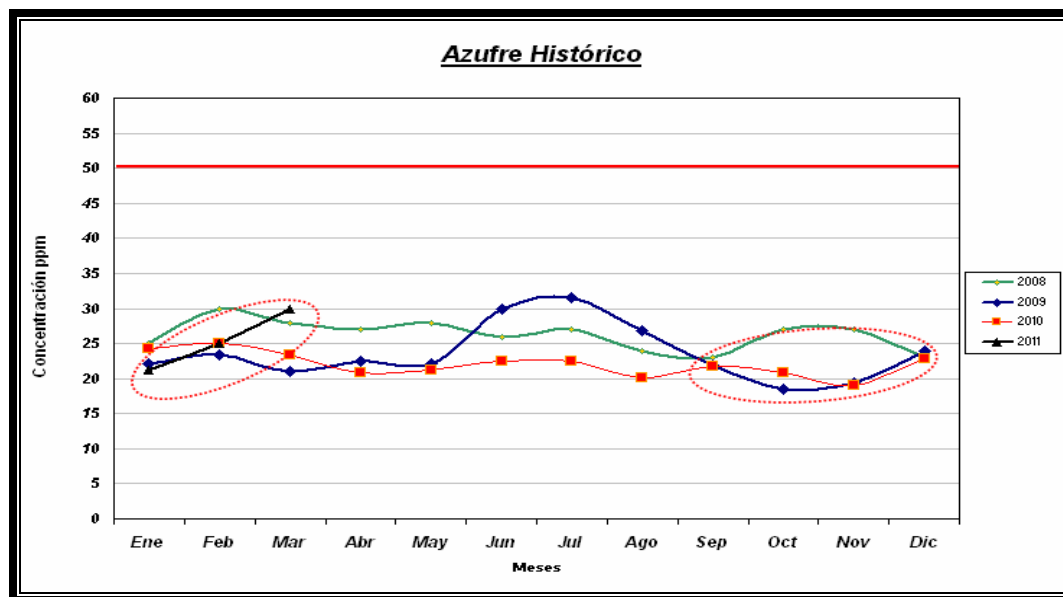


Gráfico N°7. Gráfica de la concentración de azufre en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El azufre se mantiene dentro del rango histórico y muy por debajo de la concentración que genera grietas.

9.1.2 Oxígeno.

Se encuentra presente en la forma de Cu_2O en el cobre, disminuyendo su resistencia mecánica y haciéndolo quebradizo. Sobre 3000 ppm genera grietas y ampollamiento. En el Gráfico N°8 se aprecia la concentración de oxígeno en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010 e inicio del 2011. Se muestra también el límite de concentración donde si se supera que el oxígeno genere problemas.

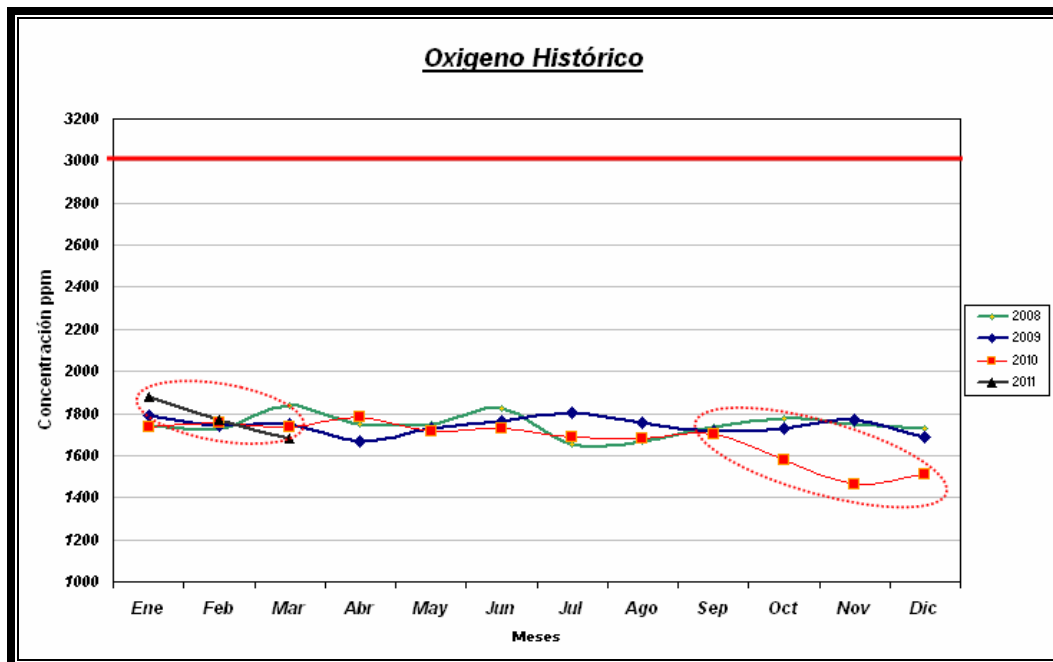


Gráfico N°8. Gráfica de la concentración de oxígeno en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El oxígeno se mantiene dentro del rango histórico y muy por debajo de la concentración que genera grietas.

9.1.3 Arsénico.

En proporción 0,1% a 1% aumenta la densidad, la resistencia mecánica, maleabilidad del cobre y tiene un efecto negativo sobre la conductividad eléctrica del cobre (0,1%=1000 ppm). En el Gráfico N°9 se aprecia la concentración de arsénico en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años

2008, 2009, 2010 e inicio del 2011. Se muestra también el límite de concentración donde si se supera que el arsénico afecte las propiedades mecánicas.

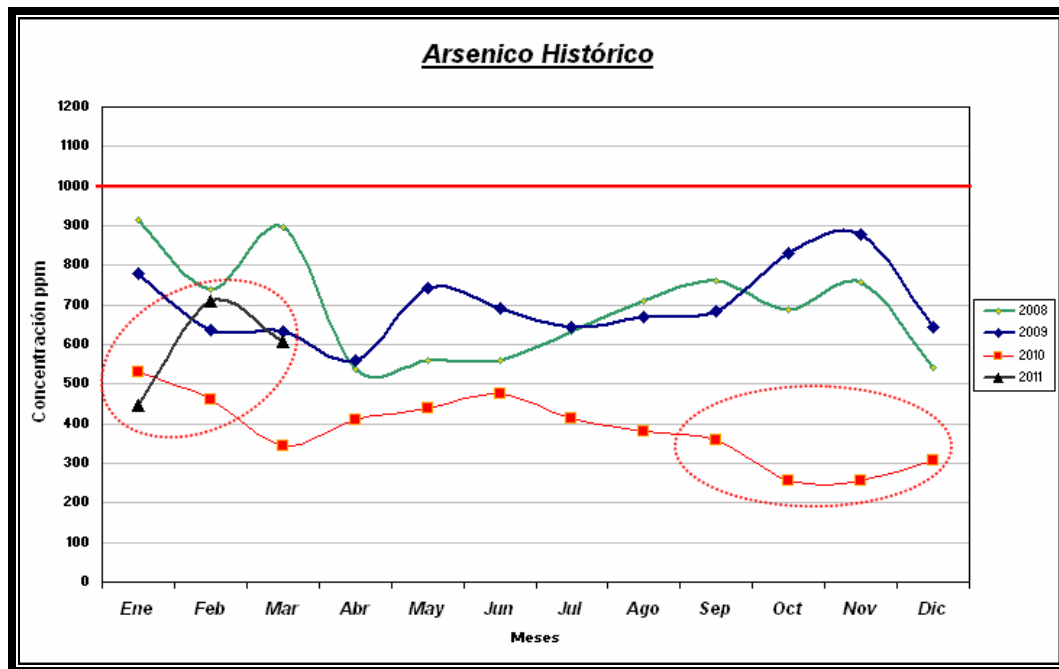


Gráfico N°9. Gráfica de la concentración de arsénico en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El arsénico se mantiene más bajo que el rango histórico, pero aún está en concentraciones donde no afecta las propiedades mecánicas.

9.1.4 Teluro.

Se encuentra en el cobre en estado Cu_2Te , perjudicando las propiedades mecánicas. Provoca grietas y fisuras. La concentración límite es de 25 ppm, ya que esta concentración generó problemas en las operaciones de Codelco Ventanas según Informe "Generación de ánodos rechazados por grieta en ruedas de moldeo" de Codelco Ventanas⁵. En el Gráfico N°10 se aprecia la concentración de teluro en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010 e inicio del 2011. Se muestra también el límite de concentración donde si se supera que el teluro afecte las propiedades mecánicas y genere grietas.

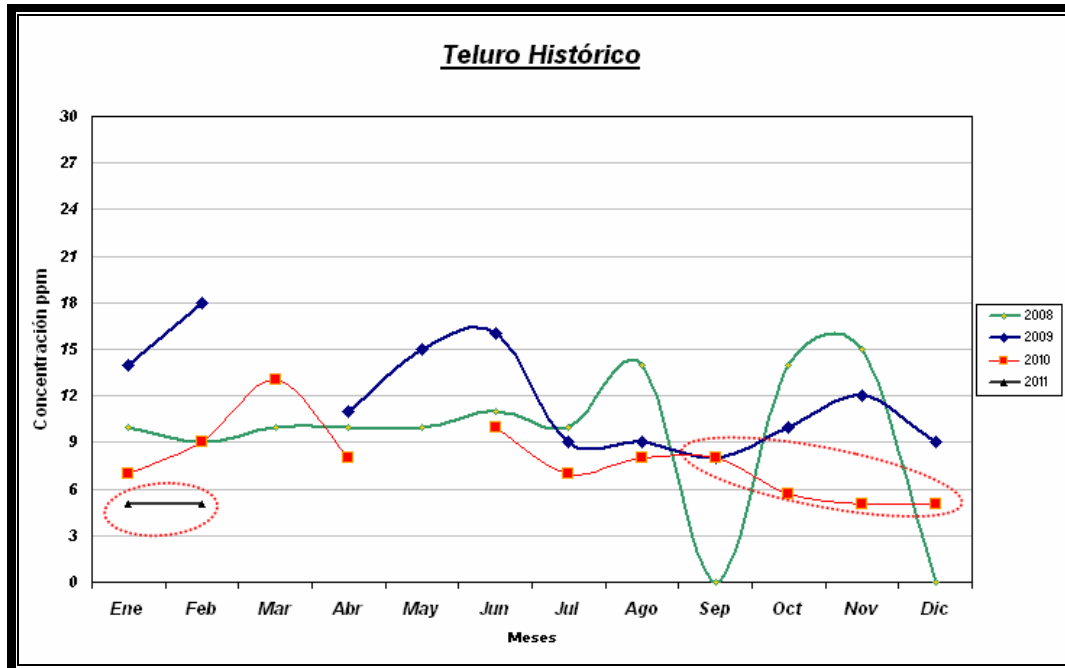


Gráfico N°10. Gráfica de la concentración de teluro en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El teluro se mantiene dentro del rango histórico y muy por debajo de la concentración que genera grietas.

9.1.5 Bismuto.

Su expansión de líquido a sólido genera grietas y fisuras. Bajo 50 ppm no genera problemas. En el Gráfico N°11 se aprecia la concentración de bismuto en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010 e inicio del 2011.

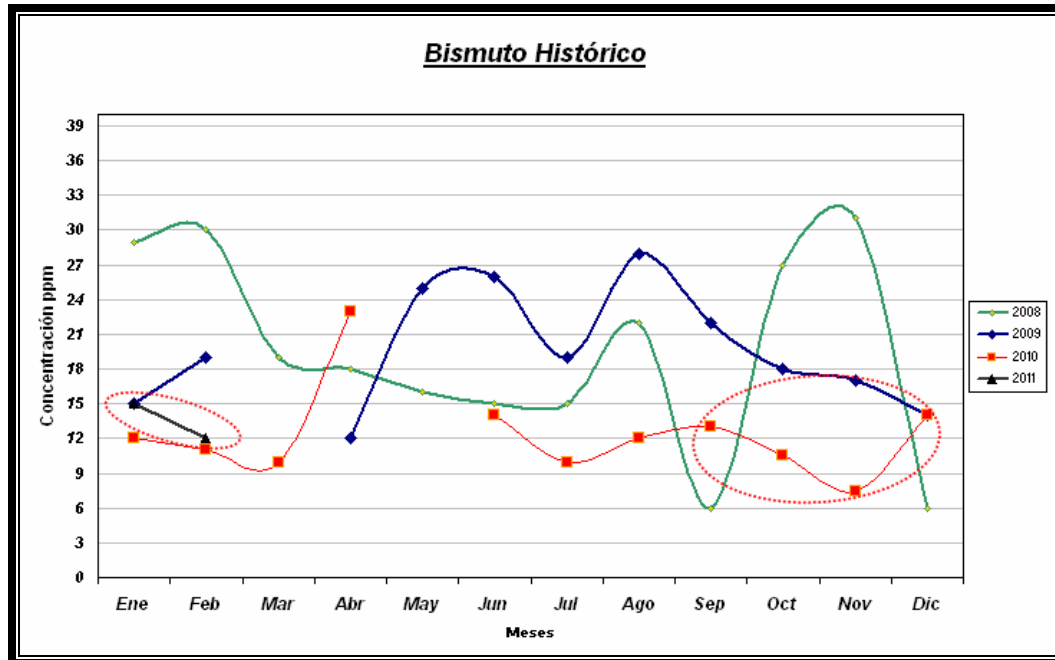


Gráfico N°11. Gráfica de la concentración de bismuto en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El bismuto se mantiene dentro del rango histórico y muy por debajo de la concentración que genera grietas.

9.1.6 Selenio.

Se encuentra en el cobre en estado Cu_2Se , perjudicando las propiedades mecánicas. Provoca grietas y fisuras. La concentración que genera límite es de 500 ppm. En el Gráfico N°12 se aprecia la concentración de selenio en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010 e inicio del 2011.

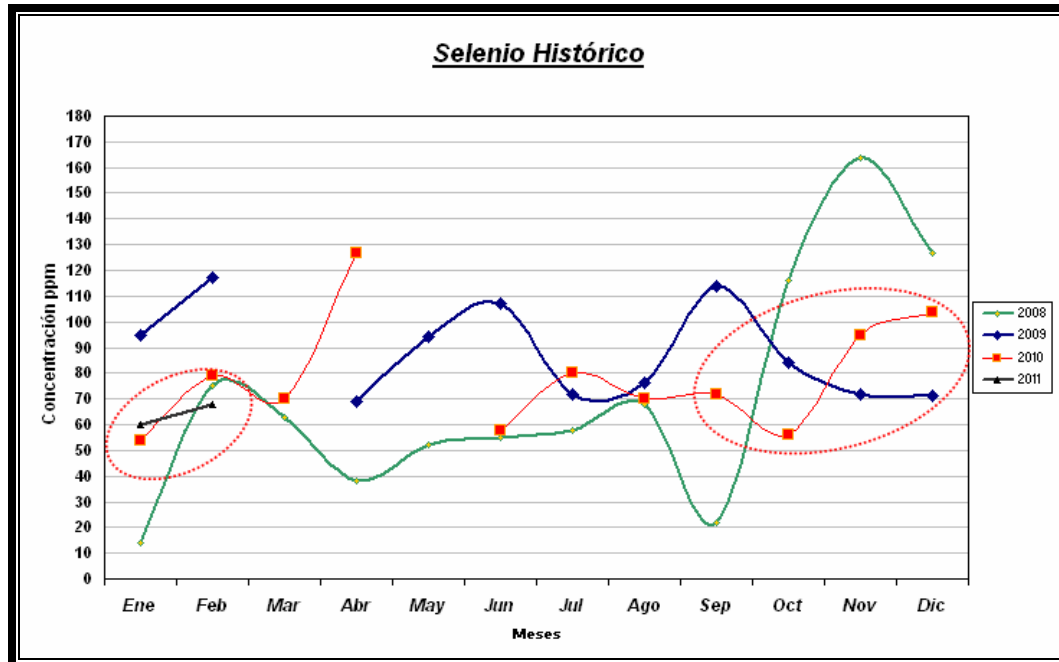


Gráfico N°12. Gráfica de la concentración de selenio en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010 e inicios 2011.

El selenio tuvo un alza en su concentración a fines del año 2010, pero se mantiene dentro del rango histórico y muy por debajo de la concentración que genera grietas.

9.1.7 Fósforo.

Produce aumento de la resistencia a la ruptura, disminuyendo el alargamiento, maleabilidad y conductividad eléctrica. En el Gráfico N°13 se aprecia la concentración de fósforo en ppm de un análisis mensual (compendio mensual). Se ven los valores de los años 2008, 2009, 2010.

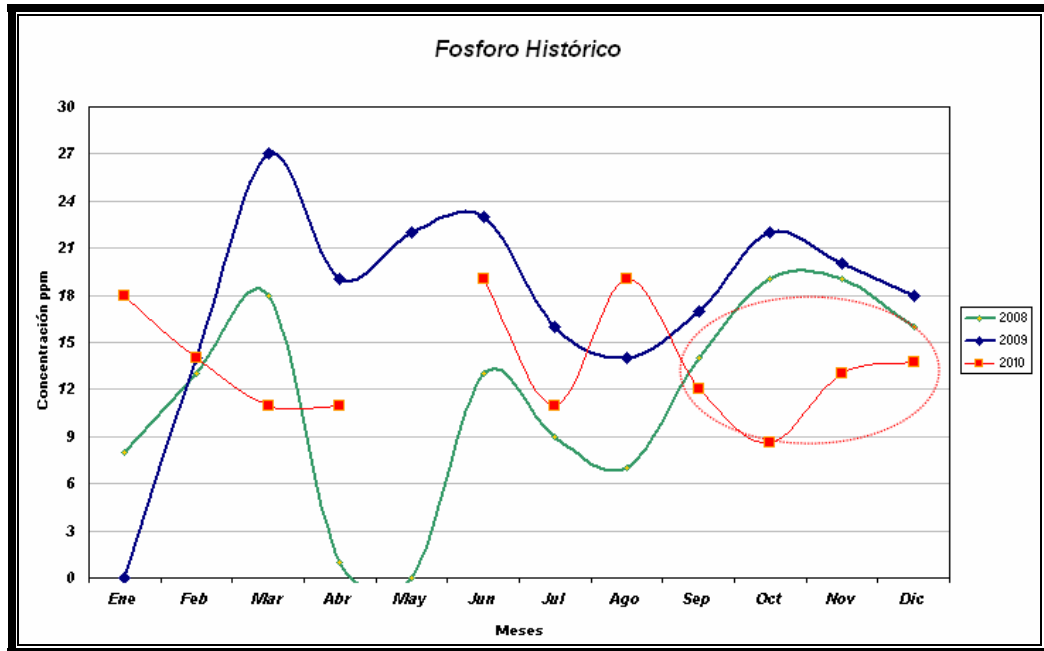


Gráfico N°13. Gráfica de la concentración de fósforo en los ánodos mensualmente en los años 2008, 2009, 2010.

El fósforo está presente en concentraciones bajas y se mantienen dentro del rango histórico.

9.1.8 Otras impurezas.

Se analizaron otras impurezas como: níquel, antimonio, oro, plata, mercurio, plomo y fierro, aunque estas impurezas no provocan problemas en el cobre. Ninguna de estas impurezas se encontraba fuera del rango histórico de concentraciones.

9.2 Análisis térmico.

De acuerdo al capítulo de aspectos teórico que trataba de la aparición de grietas por diferencia de temperatura en el ánodo, se midieron las temperaturas del ánodo al salir del túnel de enfriamiento y se observó que existían diferencias de temperaturas elevadas en diferentes sectores del ánodo. Las termografías indicaron las siguientes temperaturas (ver Fig. N°28):

- Cuerpo: 671°C
- Cabezal: 481°C

Por lo que se realizó un análisis para ver en qué afecta esta diferencia de temperatura con respecto a la velocidad de enfriamiento de cada sección del ánodo.

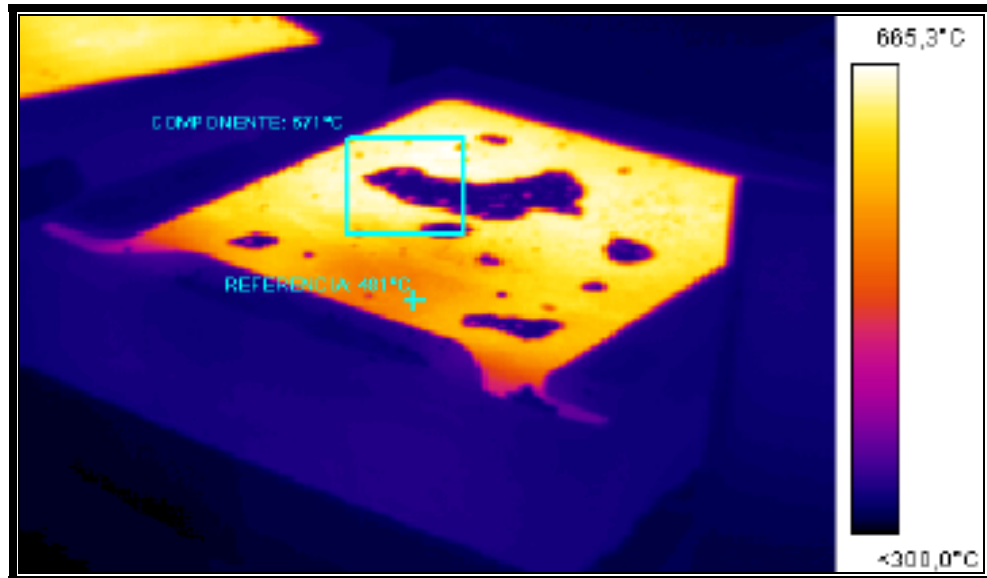


Fig. N°28. Termografía de un ánodo a la salida del túnel de enfriamiento.

9.2.1 Metodología.

El ánodo se seccionó en dos partes para realizar el análisis de velocidad de enfriamiento como se puede ver en la Fig. N°29. Estas partes son:

- Cabezal: comprende la parte superior del ánodo e integra las orejas de éste.
- Cuerpo: Comprende la parte media y inferior del ánodo.

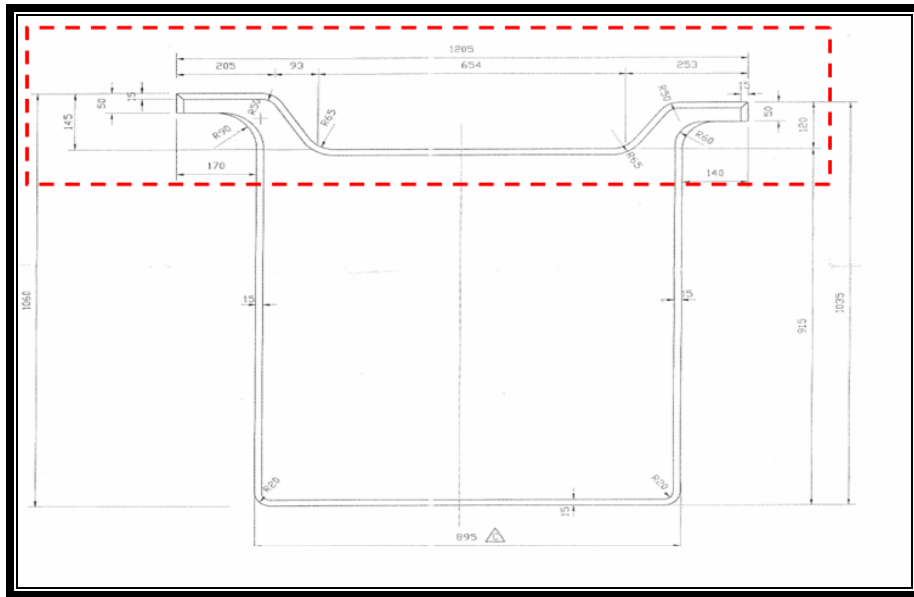


Fig. N°29. Ilustración mostrando cómo se seccionó el ánodo para el análisis.

La masa de cada sección es:

- Cuerpo: 235 kg.
- Cabezal: 40 kg.

Los puntos medidos en el ánodo para hacer el análisis se aprecian en la Fig. N°30.

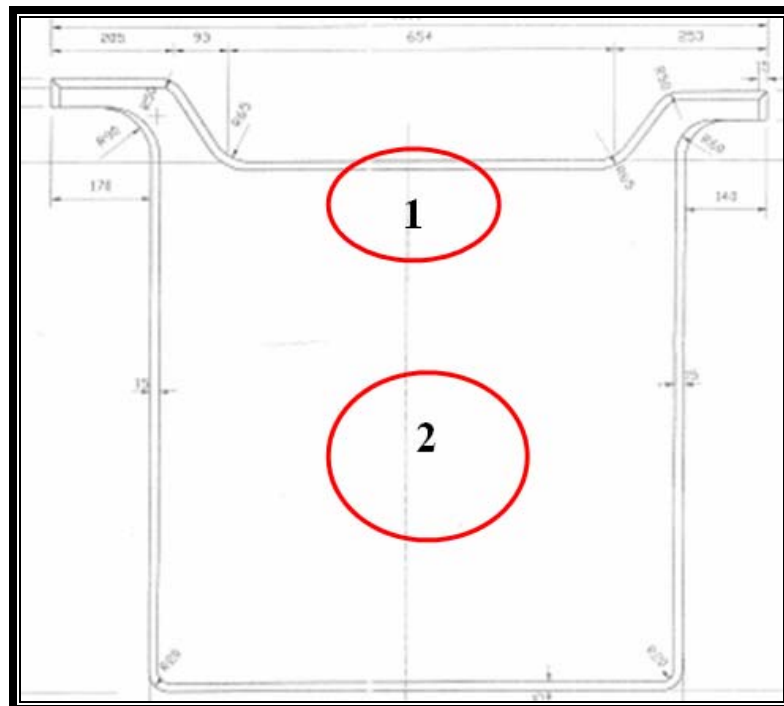


Fig. N°30. Puntos de medición del ánodo.

1. Centro cabezal.
2. Centro cuerpo.

Los puntos sobre dónde se realizaron las mediciones en la rueda de moldeo se muestran en la Fig. N°31.

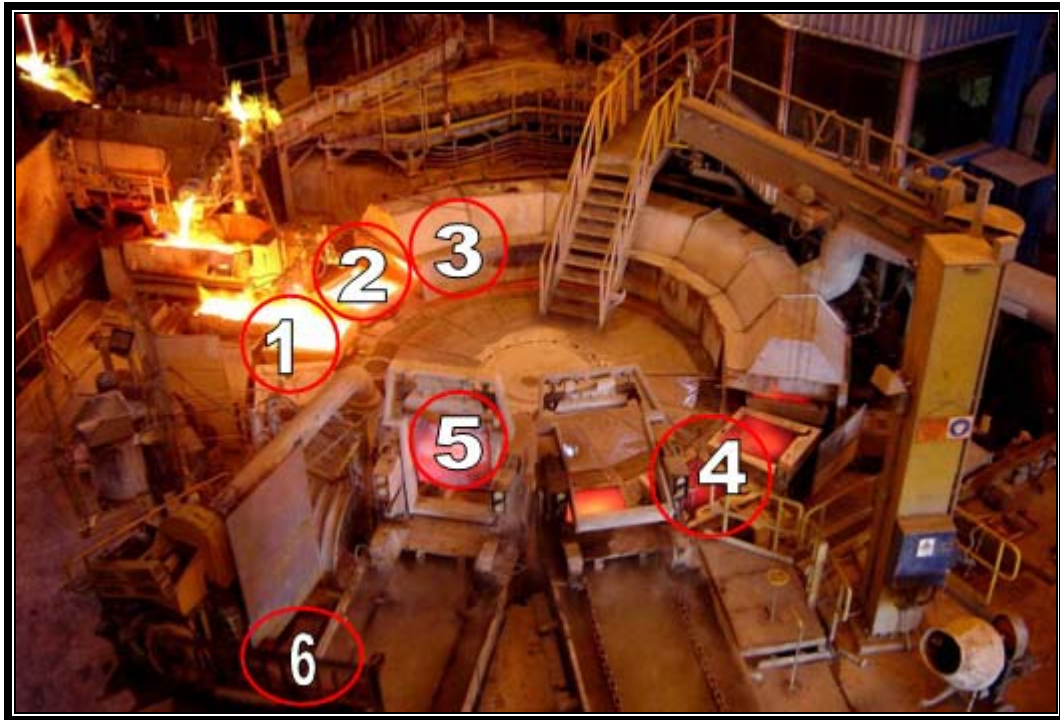


Fig. N°31. Puntos de medición en la rueda de moldeo.

Los puntos de medición fueron los siguientes:

1. Inicio
2. Segunda posición
3. Entrada a túnel de enfriamiento
4. Pistón
5. Estanque Bosh 2
6. Salida rueda de moldeo

9.2.2 Refrigeración.

Un punto muy importante en este análisis es la distribución de la refrigeración lo cual se aprecia en la Fig. N°32.

Podemos apreciar que las válvulas A, B, C, D, E, F, refrigeran el molde por abajo y las válvulas I, J, K, L refrigeran el pie del molde, Q refrigera el cabezal del molde y R, S, P refrigera el ánodo directamente.

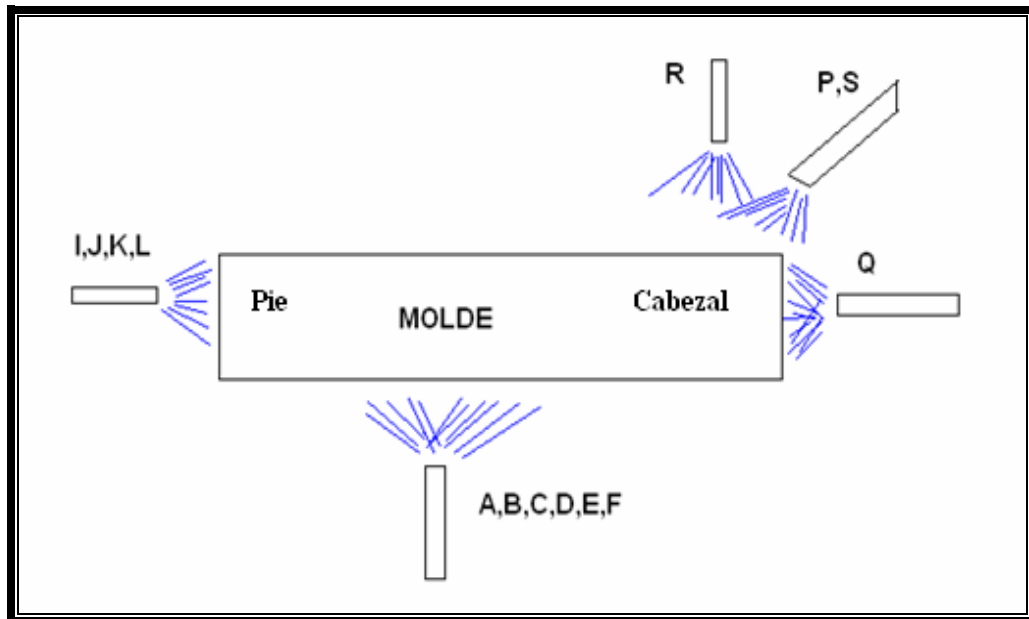


Fig. N°32. Distribución de la refrigeración en la rueda de moldeo.

9.2.3 Mediciones.

Se tomaron mediciones de temperatura con diferentes distribuciones de refrigeración y se formaron curvas de enfriamiento del cuerpo y cabezal. Se buscó una refrigeración que pueda igualar las temperaturas del cuerpo y cabezal.

a) Refrigeración total.

- Mediciones.

Tabla N°5. Mediciones en cabezal con refrigeración total.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1165
Segunda posición	958
Entrada a túnel de enfriamiento	929
Pistón	375
Estanque Bosh 2	367
Salida	90

Tabla N°6. Mediciones en cuerpo con refrigeración total.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1165
Segunda posición	958
Entrada a túnel de enfriamiento	929
Pistón	594
Estanque Bosh 2	581
Salida	100

- Curva de enfriamiento

Se realizó la curva de enfriamiento (Gráfico N°14) y se calculó la diferencia de temperatura en el punto de medición del pistón la cual era 219°C.

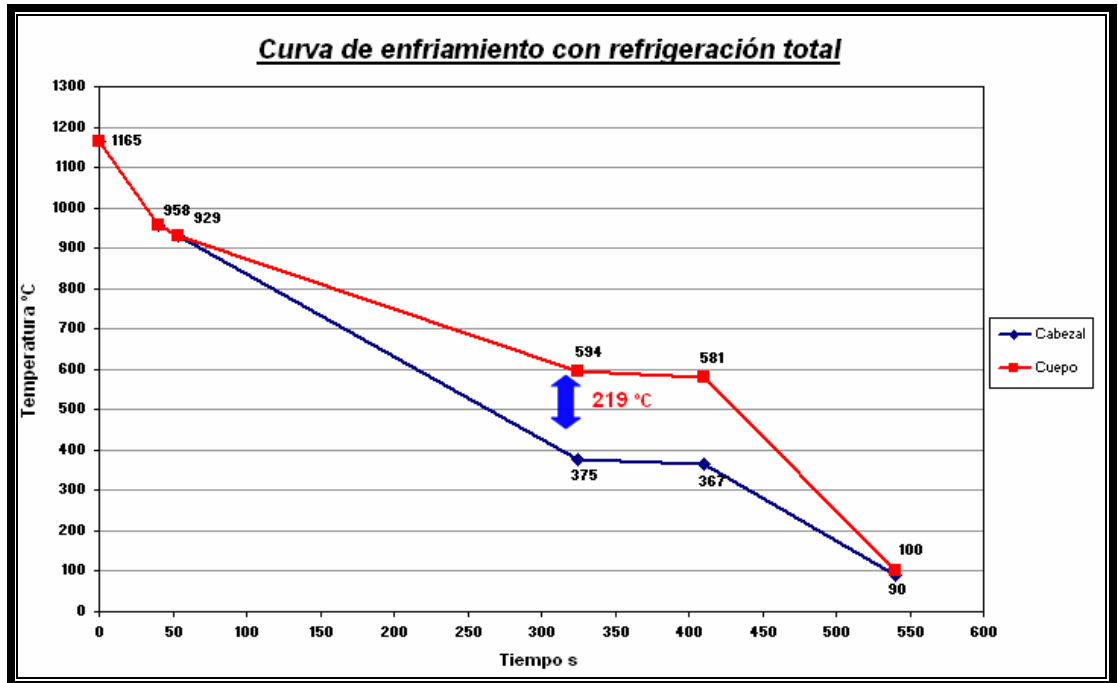


Gráfico N°14. Curva de enfriamiento con refrigeración total.

b) Refrigeración con válvula P cerrada.

- Mediciones.

Tabla N°7. Mediciones en cabezal con válvula P cerrada.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1174
Segunda posición	957
Entrada a túnel de enfriamiento	945
Pistón	435
Estanque Bosh 2	419
Salida	102

Tabla N°8. Mediciones en cuerpo con válvula P cerrada.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1174
Segunda posición	957
Entrada a túnel de enfriamiento	945
Pistón	619
Estanque Bosh 2	594
Salida	102

- Curva de enfriamiento.

Se realizó la curva de enfriamiento (Gráfico N°15) y se calculó la diferencia de temperatura en el punto de medición del pistón la cual era 184°C.

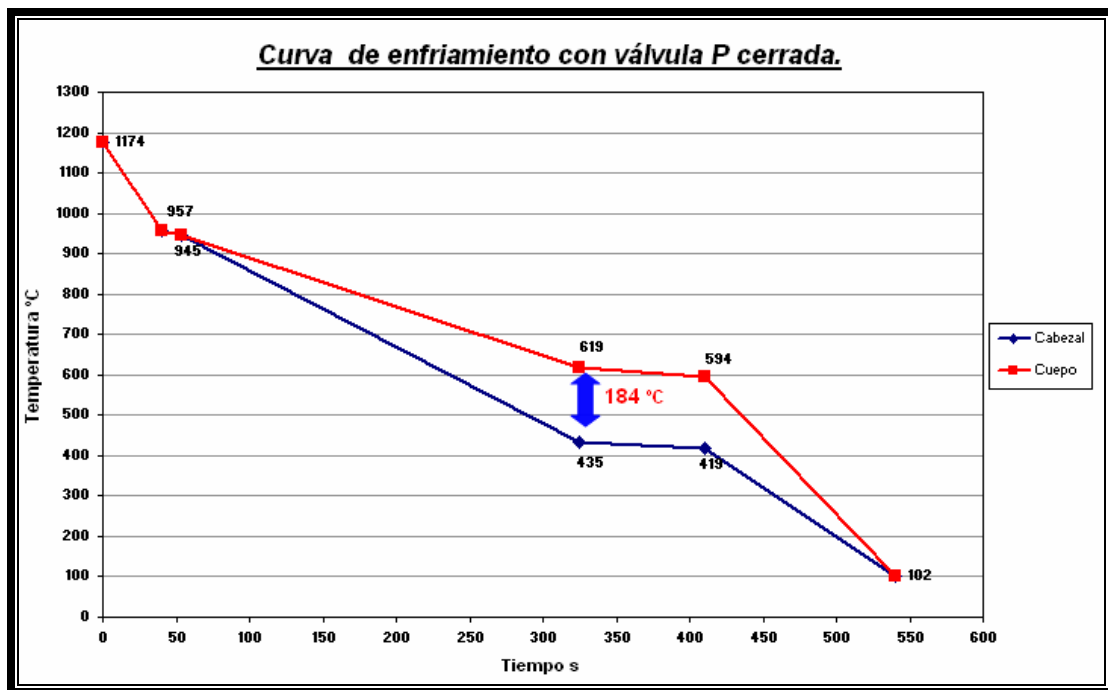


Gráfico N°15. Curva de enfriamiento con válvula P cerrada.

c) Refrigeración con válvulas P, R cerradas.

- Mediciones.

Tabla N°9. Mediciones en cabezal con válvulas P, R cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1182
Segunda posición	951
Entrada a túnel de enfriamiento	934
Pistón	463
Estanque Bosh 2	422
Salida	97

Tabla N°10. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1182
Segunda posición	951
Entrada a túnel de enfriamiento	934
Pistón	622
Estanque Bosh 2	601
Salida	97

- Curva de enfriamiento

Se realizó la curva de enfriamiento (Gráfico N°16) y se calculó la diferencia de temperatura en el punto de medición del pistón la cual era 159°C.

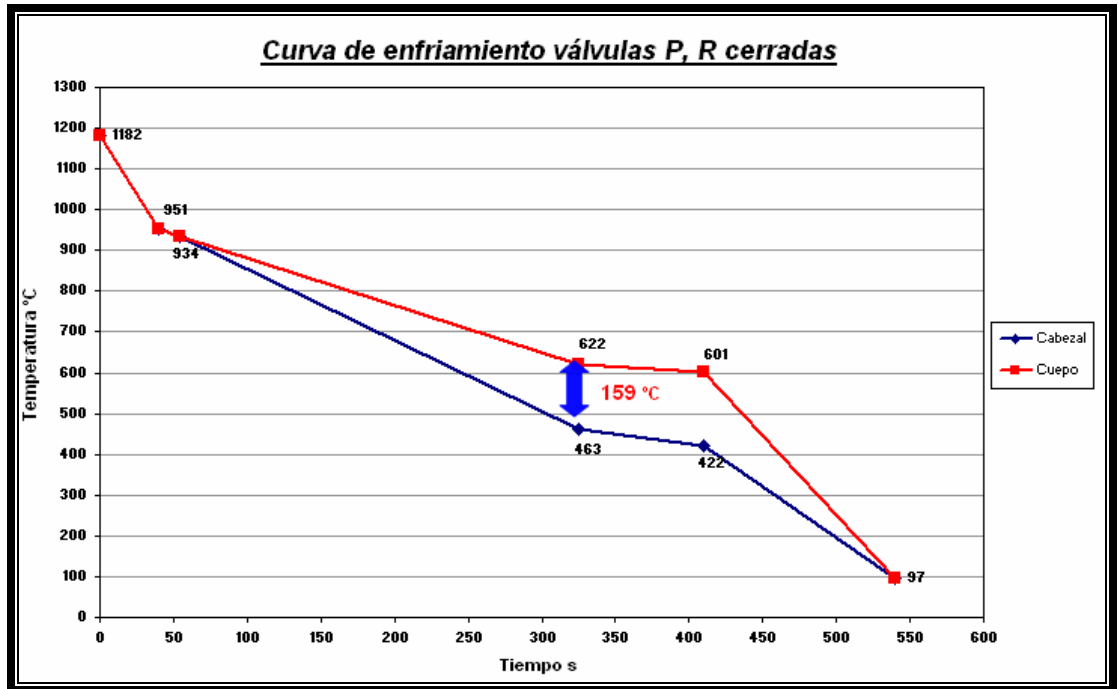


Gráfico N°16. Curva de enfriamiento con válvulas P, R cerradas.

d) Refrigeración con válvulas P, R, S cerradas.

- Mediciones.

Tabla N°11. Mediciones en cabezal con válvulas P, R, S cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1182
Segunda posición	959
Entrada a túnel de enfriamiento	948
Pistón	509
Estanque Bosh 2	491
Salida	96

Tabla N°12. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R, S cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1182
Segunda posición	959
Entrada a túnel de enfriamiento	948
Pistón	641
Estanque Bosh 2	625
Salida	96

- Curva de enfriamiento

Se realizó la curva de enfriamiento (Gráfico N°17) y se calculó la diferencia de temperatura en el punto de medición del pistón la cual era 132°C.

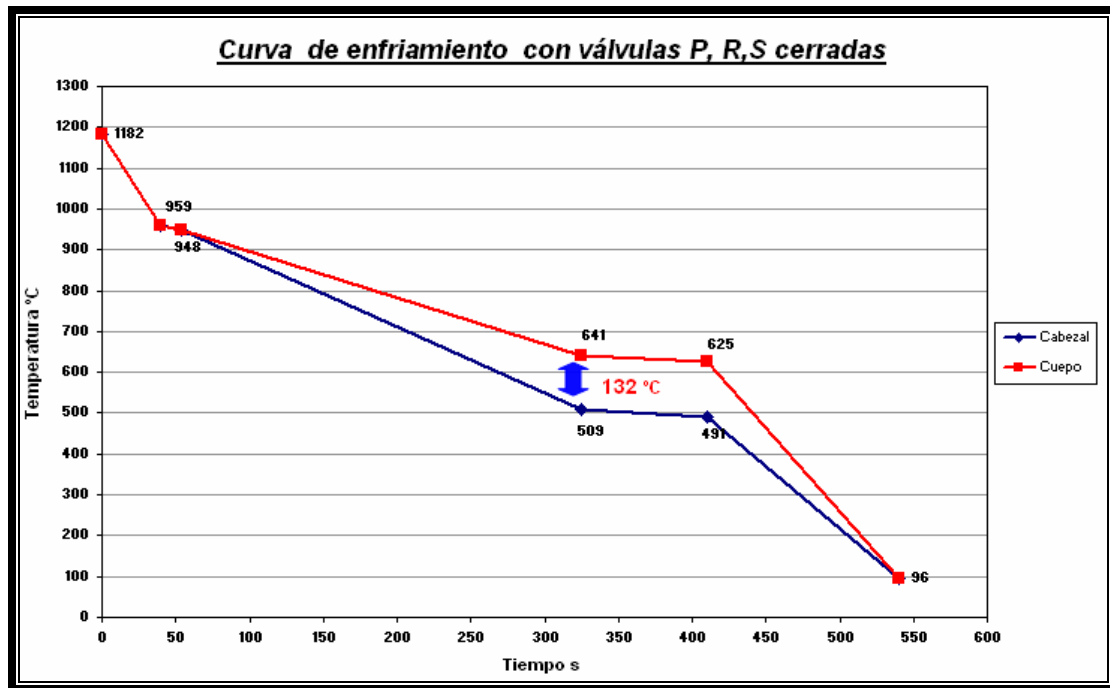


Gráfico N°17. Curva de enfriamiento con válvulas P, R, S cerradas.

e) Refrigeración con válvulas P, R, S, Q cerradas.

- Mediciones Cabezal.

Tabla N°13. Mediciones en cabezal con válvulas P, R, S, Q cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1155
Segunda posición	945
Entrada a túnel de enfriamiento	937
Pistón	524
Estanque Bosh 2	516
Salida	85

Tabla N°14. Mediciones en cuerpo con válvulas P, R, S, Q cerradas.

Posición	Temperatura (°C)
Inicio	1155
Segunda posición	945
Entrada a túnel de enfriamiento	937
Pistón	631
Estanque Bosh 2	616
Salida	85

- Curva de enfriamiento

Se realizó la curva de enfriamiento (Gráfico N°18) y se calculó la diferencia de temperatura en el punto de medición del pistón la cual era 107°C.

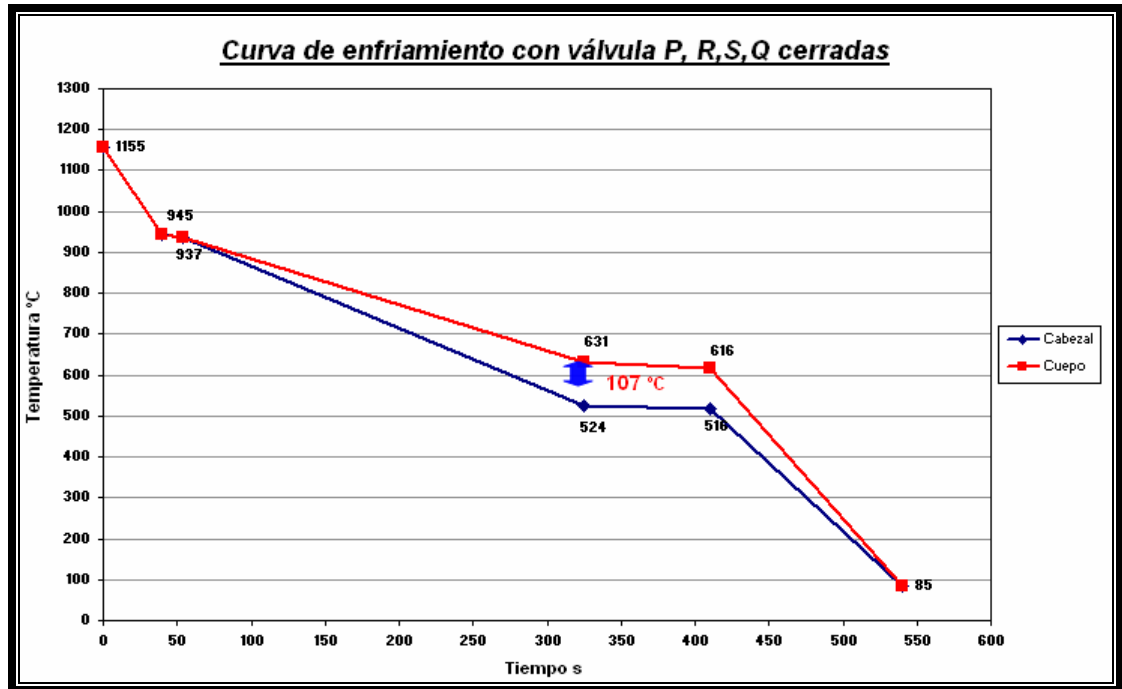


Gráfico N°18. Curva de enfriamiento con válvulas P, R, S, Q cerradas.

9.3 Análisis Velocidad de enfriamiento.

Se calculó el porcentaje de diferencia entre velocidad de enfriamiento del cuerpo y cabezal. Para esto se calculó la energía liberada en el túnel de enfriamiento con un balance de energía y se calculó además la velocidad de enfriamiento específica

$\frac{kJ}{kg \cdot s}$. Los cálculos están en el Anexo N°3.

- Refrigeración Total

Tabla N°15. Análisis de velocidad de enfriamiento con refrigeración total.

Sección	kg	Delta °C	Velocidad de enfriamiento °C/s	kJ	kJ/s	kJ/kg*s	% Diferencia
Cabezal	40	554	1,7	9.880	37	0,92	65
Cuerpo	235	335	1	36.000	133	0,56	

- Refrigeración con válvula P cerrada

Tabla N°16. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvula P cerrada.

Sección	kg	Delta °C	Velocidad de enfriamiento °C/s	kJ	kJ/s	kJ/kg*s	% Diferencia
Cabezal	40	510	1,6	9.180	34	0,84	62
Cuerpo	235	326	1,0	33.680	125	0,52	

- Refrigeración con válvulas P, R cerradas

Tabla N°17. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R cerradas.

Sección	kg	Delta °C	Velocidad de enfriamiento °C/s	kJ	kJ/s	kJ/kg*s	% Diferencia
Cabezal	40	471	1,45	8.490	31	0,78	50
Cuerpo	235	312	0,96	33.680	124	0,52	

- Refrigeración con válvulas P, R, S cerradas

Tabla N°18. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R, S cerradas.

Sección	kg	Delta °C	Velocidad de enfriamiento °C/s	kJ	kJ/s	kJ/kg*s	% Diferencia
Cabezal	40	439	1,4	7.970	30	0,75	44
Cuerpo	235	307	0,9	33.300	123	0,52	

- Refrigeración con válvulas P, R, S, Q cerradas

Tabla N°19. Análisis de velocidad de enfriamiento con válvulas P, R, S, Q cerradas.

Sección	kg	Delta °C	Velocidad de enfriamiento °C/s	kJ	kJ/s	kJ/kg*s	% Diferencia
Cabezal	40	413	1,3	7.500	28	0,69	33
Cuerpo	235	306	0,9	33.090	122	0,52	

No se analizaron más refrigeraciones, ya que con otras refrigeraciones la temperatura de los moldes no estaban en el rango correcto 150-200°C y superándolo por más de 50°C, creando otro tipo de fallas como protuberancias por moldes agrietados y desgastando el molde más de lo normal por lo que debe haber una mayor rotación de éstos, algo no sustentable en el tiempo en la Fundición Chagres.

9.4 Efecto de la refrigeración.

En el Gráfico N°19 se puede apreciar el efecto de las diferentes refrigeraciones en la diferencia de temperatura entre cuerpo y cabezal. También se puede apreciar el efecto de la refrigeración en la diferencia de velocidades de enfriamiento entre cuerpo y cabezal.

Tabla N°20. Datos de Diferencia de temperatura entre cuerpo y cabezal y Diferencia de velocidad de enfriamiento entre cuerpo y cabezal.

Refrigeración	Diferencia entre cuerpo y cabezal (°C)	Diferencia de velocidad de enfriamiento entre cuerpo y cabezal (%).
Total	219	65
Válvula P cerrada	184	62
Válvulas P, R cerradas	159	50
Válvulas P, R, S cerradas	132	44
Válvulas P, R, S, Q cerradas	107	33

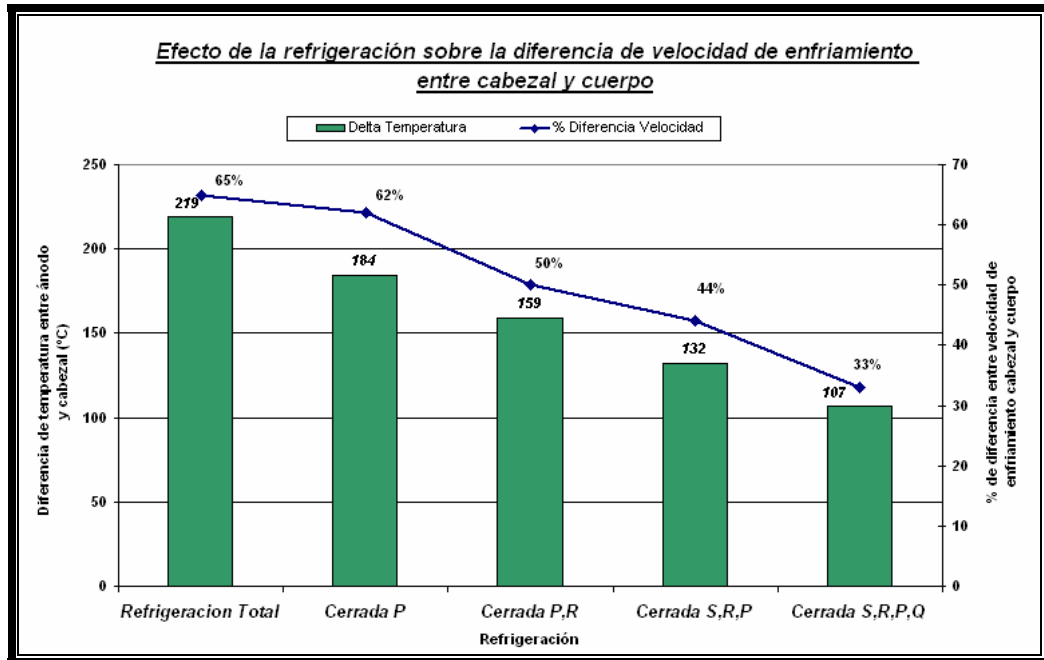


Gráfico N°19. Efecto de la refrigeración en la diferencia de temperatura entre cuerpo y cabezal. Efecto de la refrigeración en la diferencia de velocidad de enfriamiento entre cabezal y cuerpo.

A medida que se cierran las válvulas de refrigeración, que están direccionadas al cabezal del ánodo, la diferencia de temperatura entre cabezal y cuerpo disminuye. Al disminuir esta diferencia de temperatura también se igualan las velocidades de enfriamiento y de una diferencia de 65% con refrigeración total se puede llegar a un 33 % de diferencia redistribuyendo la refrigeración. Por lo que se decidió trabajar con esta refrigeración (Q, R, S, P cerradas) y ver el efecto en la formación de grietas en los ánodos.

Los resultados de este cambio de refrigeración en las aprobaciones se ven en el capítulo Resultados.

10. Análisis doble capa (laminación de la oreja).

La doble capa es una falla donde la oreja sufre de una doble solidificación y al transportarla se abre como se puede apreciar en la Fig. N°36. En este capítulo se analizarán las posibles variables que producen esta falla.



Fig. N°33. Ilustración de la doble capa donde se aprecia la doble solidificación y las orejas abiertas.

La doble capa (ver Fig. N°33) se produce al momento del vaciado del cobre en el molde. El cobre produce un oleaje y llega en una primera instancia al sector de las orejas solidificándose rápidamente o bajando su temperatura de manera drástica. La segunda llegada de cobre a la oreja se forma sobre una capa que está a una menor temperatura y a veces en estado sólido, formando una doble capa. Esta secuencia se puede apreciar en la Fig. N°34.

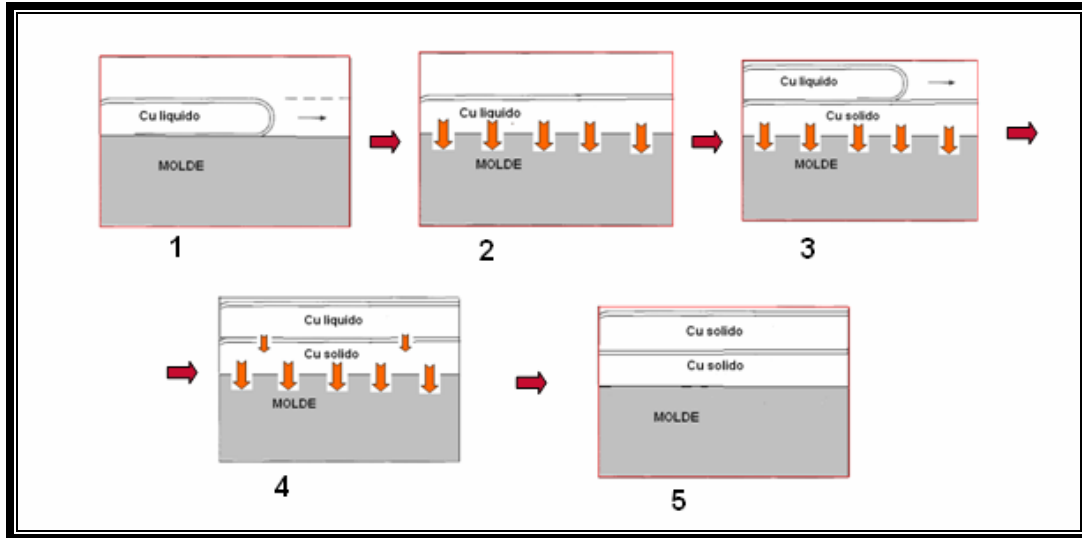


Fig. N°34. Secuencia de la formación de la doble capa.

Al vaciar el cobre en el molde llega una primera capa de líquido (1), la cual empieza a transferir calor (2), llega la segunda capa de cobre la cual empieza a solidificarse sobre una capa de sólido (4), por lo que queda una doble solidificación en la oreja (5).

Las posibles variables que producen esta falla son:

- Velocidad de vaciado
- Transferencia de calor cobre – molde.

10.1 Velocidad del vaciado.

Esta variable se analizó para tratar de lograr un llenado de forma pareja y evitar el oleaje para evitar que se formara esta primera capa.

Las cucharas de moldeo tienen 5 velocidades distintas que son controladas por el sistema de control. La confección de los moldes y cucharas de moldeo es de forma artesanal por lo que varían mucho las medidas de éstas. Debido a lo anterior, en este análisis no tuvo validez para ser presentado en esta memoria. La velocidad del vaciado es una variable operacional para controlar la viscosidad del cobre, ya que ésta cambia con la temperatura, y como la temperatura se maneja en un rango de 1150°C a 1200°C la velocidad también cambia en cada moldeo.

10.2 Transferencia del calor en las orejas.

Se analizó el sistema molde-desmoldante-Cu como un sistema de resistencias térmicas. Al agregar el desmoldante queda una zona cubierta por éste y una zona no cubierta por el desmoldante en donde el cobre moldeado tendrá contacto directo con el molde.

El desmoldante es utilizado para que el cobre no se pegue en el molde. El desmoldante es principalmente CaCO_3 y éste es agregado al molde por el sistema de pintado de la rueda de moldeo. El desmoldante se compra en polvo con el cual se prepara una pulpa y se va controlando la densidad de la pulpa con una balanza Marcy y se agrega directamente al molde.

En la Fig. N°35 se aprecia el lugar específico sobre dónde se realiza el análisis.

Podemos apreciar en la Fig. N°36 la configuración térmica del sistema molde-desmoldante.

Una resistencia térmica queda definida por:

$$R_k = \frac{L}{k A} \quad (9.1)$$

Donde L es el largo, A es el área y k es la conductividad térmica.



Fig. N°35. Lugar de análisis en el molde.

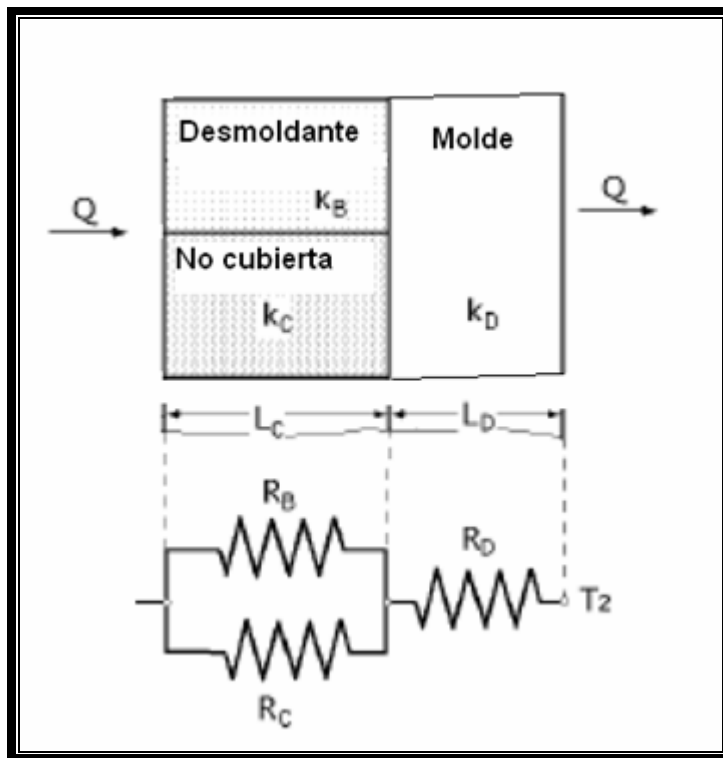


Fig.N°36. Configuración térmica sistema molde - desmoldante.

La resistencia R_B representa la resistencia que produce el desmoldante al paso del calor, las resistencias R_c y R_D representan la resistencia del molde al paso del calor.

Las resistencias R_B y R_c están en paralelo por lo que su resistencia conjunta se puede reescribir como:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \quad (9.2)$$

Por lo tanto, la cantidad de calor transferido en el tiempo queda definido por:

$$Q_K = \frac{\Delta T_{global}}{R_2 + R_D} \quad (9.3)$$

Y en la interfase cobre-molde desmoldante queda definido por:

$$Q_K = \frac{\Delta T_{global}}{R_2} \quad (9.4)$$

Para que se forme una capa de 1 cm sólida en la oreja el cobre tiene que liberar:

$$Q = 80kJ \quad (9.5)$$

La velocidad de transferencia por radiación del sector de la oreja es:

$$Q_{radiación} = 164.860 \frac{W}{m^2} \quad (9.6)$$

La velocidad de transferencia de calor por conducción desde el cobre al molde en la interfase sin considerar desmoldante en la interfase es de:

$$Q = 67.000 \frac{kW}{m^2} \quad (9.7)$$

10.2.1 Efecto del desmoldante.

El desmoldante tiene más de una función en el molde, siendo de éstas la principal el no dejar que el cobre se pegue al molde. Una función secundaria dada a una cualidad de baja conductividad térmica es aislar térmicamente el molde.

En la Tabla N°21 podemos apreciar la conductividad del cobre y la del desmoldante.

Tabla N°21. Conductividades térmicas.

Conductividad cobre	335	(W/mK)
Conductividad desmoldante	0,13	(W/mK)

El desmoldante actúa como resistencia térmica al paso del calor y el valor de esta resistencia varía según el área que el desmoldante cubra la superficie del molde. Al agregar desmoldante queda una porción no cubierta la cual son los espacios que el cobre tiene contacto directo con el molde y donde la transferencia de calor es muy superior.

Las formas de disminuir o aumentar los espacios no cubiertos son manejadas a través de la densidad de la pulpa del desmoldante preparada para cada moldeo, siendo ésta la única variable que se mide del desmoldante (medida con una balanza Marcy). Desde ahora a los espacios vacíos serán representados en un término genérico llamado porosidad, por lo tanto la porosidad será:

$$Porosidad = \frac{Area\ no\ cubierta\ por\ el\ desmoldante}{Area\ total} \quad (9.8)$$

Debido a la gran diferencia de conductividad térmica entre el desmoldante y el cobre, la resistencia común varía con respecto a la porosidad.

Se obtuvo el valor de la porosidad para cada densidad de pulpa del desmoldante la cual se puede ver en el Gráfico N°20.

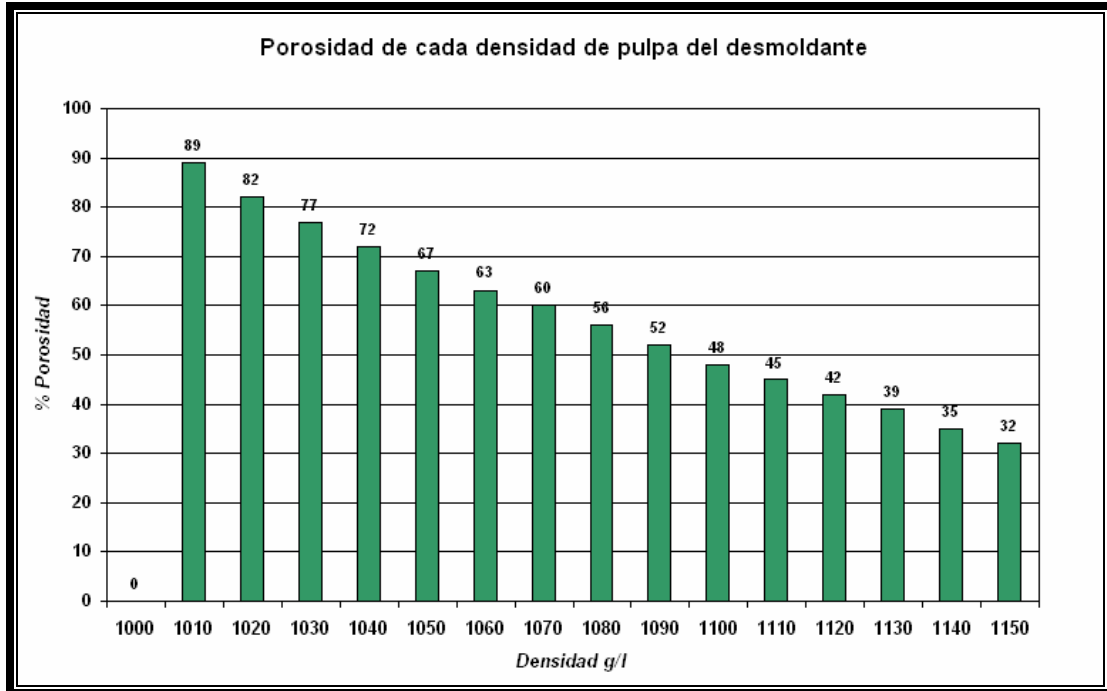


Gráfico N°20. Porosidad para cada densidad de pulpa.

Se puede apreciar a medida que se aumenta la densidad de pulpa la porosidad disminuye.

El valor de las resistencias variando la porosidad se puede ver en el Gráfico N°21.

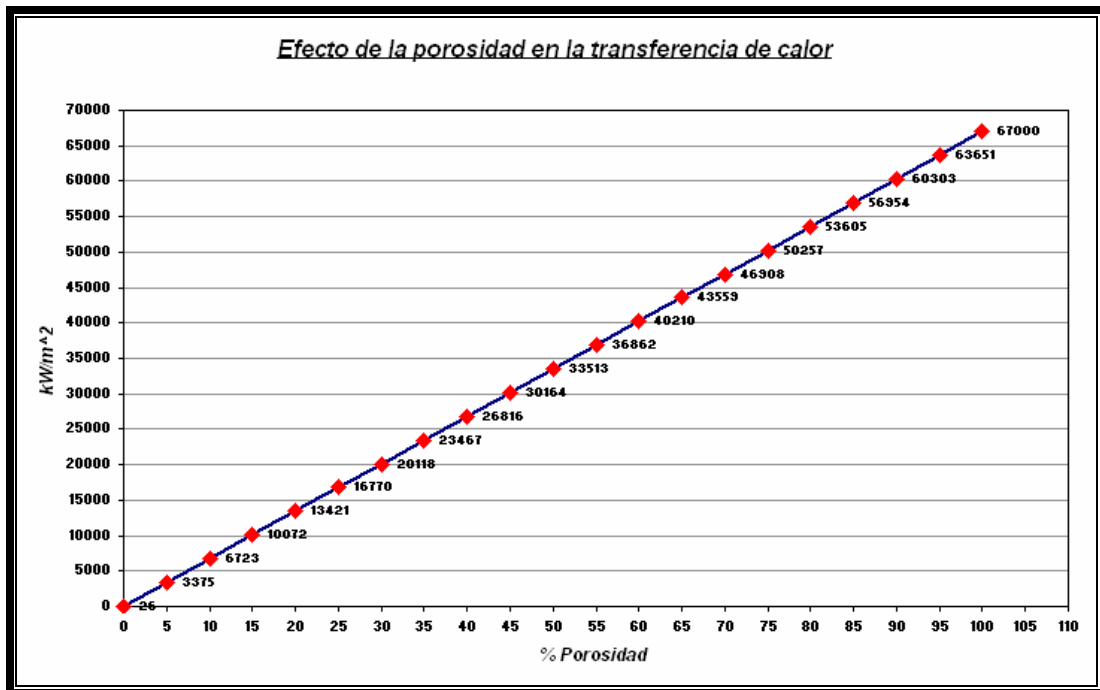


Gráfico N°21. Efecto de la porosidad en la transferencia de calor en la interfase.

A mayor porosidad mayor es la cantidad de calor transmitido en la interfase.

En el Gráfico N°22 se aprecian los efectos de la porosidad en la transmisión de calor en la interfase y a qué densidad de pulpa corresponde cada porosidad.

La operación normal en los moldeos Codelco Ventanas es con una densidad de 1040 g/l con lo que se obtiene una porosidad de 72% y una transferencia de calor de 48.000 kW/m².

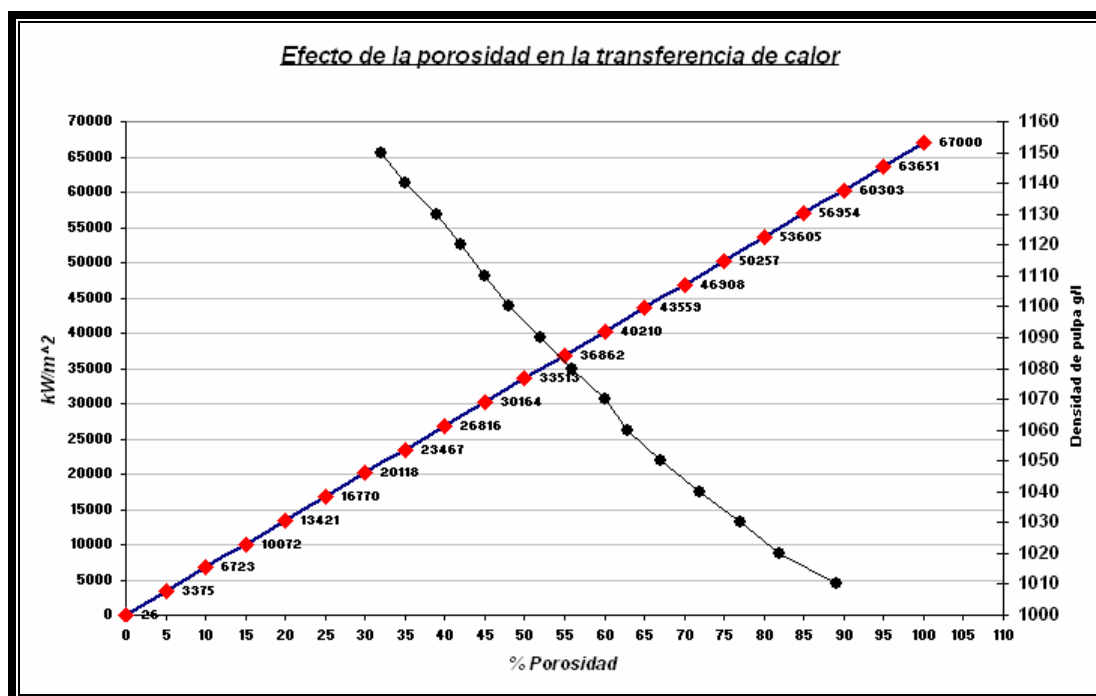


Gráfico N°22. Efecto de la porosidad en la transferencia de calor en la interfase y porosidad según densidad de pulpa.

Al aumentar la densidad de pulpa del desmoldante a niveles de 1130g/l disminuirá la porosidad a 39 % y el paso del calor a 25.000 kW/m². Al realizar este cambio la porosidad disminuye de 72% a 39%, por lo tanto, la resistencia aumenta un 92% al paso del calor. Las pruebas realizadas en terreno muestran que a densidades mayores de 1130 g/l los ánodos son rechazados por impregnación de desmoldante como se puede apreciar en la Fig. N° 40 por lo que queda como límite de operación una densidad de desmoldante de 1130 g/l.



Fig. N°40. Ánodo rechazado por impregnación de desmoldante.

De acuerdo al análisis realizado, se aumentó la densidad de pulpa de desmoldante lo más posible (1130 g/l) teniendo como límite el rechazo de los ánodos por impregnación. Al aumentar la densidad de la pulpa de 1040 g/l a 1130 g/l aumentará la resistencia al paso del calor por lo que la primera capa no tendrá opción de solidificarse tan rápidamente evitando así la falla.

Los resultados se pueden apreciar en el Capítulo N° 11.

11. Resultados.

11.1 Grietas.

El análisis se realizó en el mes de Octubre donde se observó que el 15 % del total de la producción de ánodos Codelco Ventanas eran ánodos con grietas. Al realizar el análisis se encontró una configuración de refrigeración que mantenía la temperatura del ánodo lo más parecido posible (válvulas Q, R, S, P cerradas).

Al cambiar la configuración de refrigeración se logro una temperatura mas uniforme en el ánodo. La diferencia de temperatura entre el cabezal y el cuerpo llego a ser de 107°C disminuyendo en 112°C esta diferencia con la refrigeración utilizada normalmente para la operación (219°C de diferencia entre el cuerpo y el cabezal). Al tener temperaturas más uniforme en el ánodo se logro disminuir la diferencia entre las velocidades de enfriamiento del cuerpo y el cabezal del ánodo llegando a 33% de diferencia en velocidad de enfriamiento, disminuyendo en un 32% esta diferencia con la refrigeración utilizada normalmente para la operación (65% de diferencia en velocidades de enfriamiento entre el cuerpo y el cabezal).

El efecto que tiene la disminución de la diferencia entre la velocidad enfriamiento del cabezal y el cuerpo genera que la discontinuidad de la contracción del cuerpo y cabezal no sea capaz de generar un stress suficientemente fuerte para generar una grieta.

El análisis químico indico que las impurezas contenidas en el cobre (O, S, Bi, Te, P, Se, As) no eran la causa de la generación de grietas ya que estas impurezas se encuentran dentro del rango histórico y bajo el nivel que estas impurezas generan problemas.

Las válvulas de refrigeración Q, R, S, P son innecesarias para la refrigeración de los ánodos Codelco Ventanas ya que refrigeran el sector del cabezal, sector que tiene menos calor que transferir que el cuerpo del ánodo (mas masa). Al utilizar estas válvulas la temperatura del cabezal baja abruptamente generando mas diferencia de temperatura con el cuerpo.

Al interferir las válvulas del sector del cuerpo de ánodo A, B, C, D, E, F y pie del ánodo I, J, K, L no se mantienen las condiciones mínimas para la operación ya que

los moldes se calientan por encima de los 250°C generando que los ánodos se peguen a los moldes lo que genera en algunas ocasiones terminar el moldeo.

Cambiando el modo de refrigerar a la configuración obtenida se pudo minimizar las grietas hasta un nivel de 2% de lo producido, nivel aún alto ya que esta falla no es la única presente en los ánodos, pero considerando que aún existía una falla (doble capa), que también se creía que era un tema de refrigeración, no se pudo aplicar en todos los momentos la refrigeración obtenida en el análisis. Al solucionar la doble capa se refrigeró en todo momento con la distribución de refrigeración Q, R, S, P cerradas dando resultados de un 0,6 y 0,4 % en los meses de Febrero y Marzo, siendo estos porcentajes buenos para cumplir el objetivo principal.

En el Gráfico N°23 se puede apreciar el porcentaje mensual de grietas observando así la disminución después de haber cambiado la refrigeración de Octubre a Noviembre.

En el Gráfico N°24 se puede apreciar la producción mensual de ánodos Codelco Ventanas y la cantidad rechazada por grietas.

Tabla N°22 Detalle de la cantidad de ánodos producidos, rechazados y cantidades por causas de rechazo

Mes	Producidos	Rechazados	Aprobación%	Grietas	Doble Capa	Orejas Deformes
Septiembre	13.273	982	92,6	903		478
Octubre	13.647	3169	76,8	2042	249	504
Noviembre	16.664	1992	88,0	439	327	451
Diciembre	13.163	960	92,7	182	188	292
Enero	17.812	3507	80,3	453	1428	953
Febrero	19.174	1047	94,5	119	378	114
Marzo	21.304	415	98,1	83	17	82

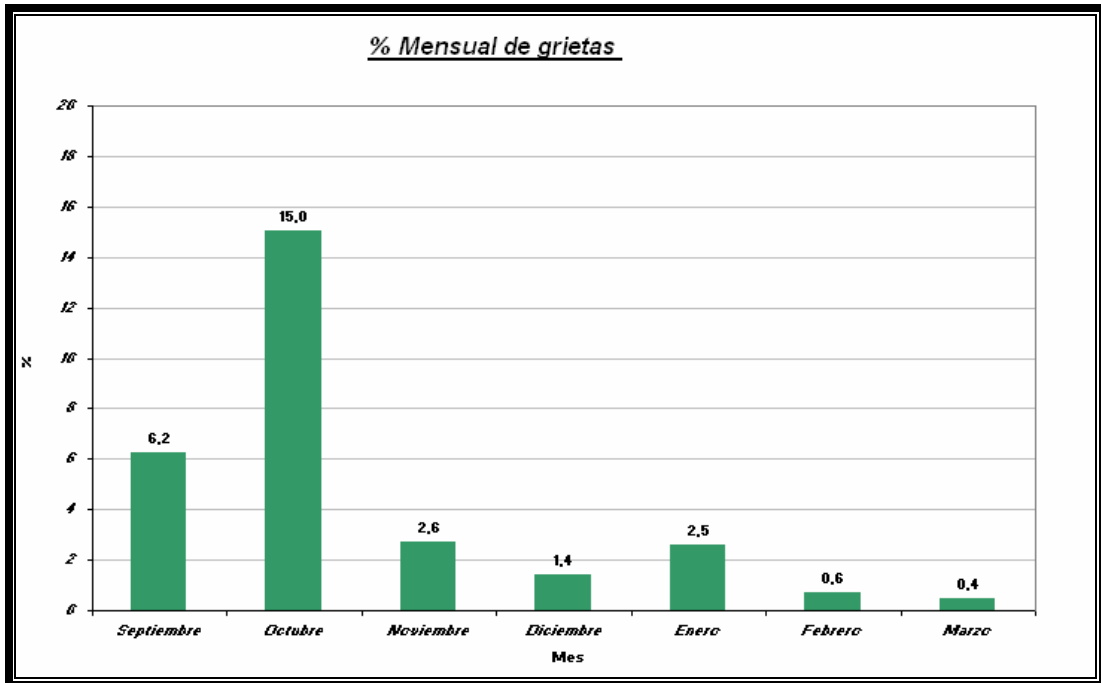


Gráfico N° 23 Porcentaje de grietas producidas del total de ánodos Codelco Ventanas.

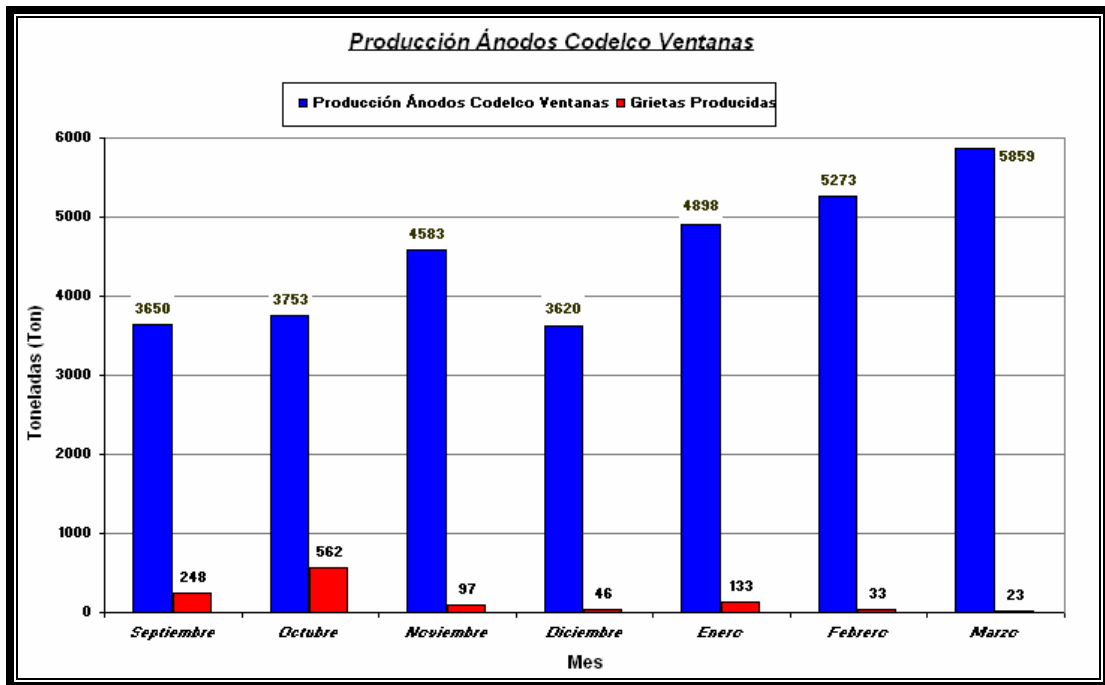


Gráfico N°24. Producción mensual de ánodos Codelco Ventanas y cantidad de grietas producidas en toneladas.

11.2 Doble capa.

En cuanto el otro grupo de fallas (doble capa y orejas deformes) se logró mejorar aumentando la densidad del desmoldante según el análisis realizado.

El defecto de doble capa en las orejas de los ánodos se produce por una rápida transferencia de calor desde el cobre hacia el molde. Lo único que presenta una resistencia térmica al paso del calor es el desmoldante (ceniza de hueso) el cual tiene condiciones de baja conductividad. La operación normal del pintado de ánodos con desmoldantes es con una lechada con una densidad de pulpa de 1040 g/l la cual presenta una porosidad del 72% la cual produce una transferencia de calor de 48.000 kW/m². Al aumentar la densidad de pulpa de la lechada a niveles de 1130 g/l disminuye la porosidad a 39 % y el paso del calor a 25.000 kW/m². Al producir un aumento de la resistencia térmica de un 92% el cobre no cede tan rápidamente el calor al molde por lo que la primera capa de cobre que llega al sector de las orejas (molde) no solidifica instantáneamente por lo que no da instancia a formar la doble capa, obteniendo una oreja (ánodo) mucho mejor formada.

Operando a mayores densidades de pulpa de desmoldante mejor es la formación de la oreja del ánodo. El límite para aumentar la densidad de pulpa del desmoldante es la impregnación del desmoldante que se presenta en los ánodos, la cual es causa de rechazo de ánodos. El límite de la densidad de pulpa para que no se produzca impregnación de desmoldante en los ánodos es de 1130g/l.

De acuerdo al análisis realizado se cambió la densidad de pulpa del desmoldante de 1040 g/l a 1130 g/l en la operación de la rueda de moldeo.

El cambio se realizó a fines del mes de Febrero, por lo que los resultados se obtuvieron en el mes de Marzo.

Los niveles de rechazos por doble capa bajaron alrededor desde un 3,3% promedio a un 0,1 %, siendo éste un resultado que se ajusta al objetivo general.

Las orejas deformes bajaron de un promedio de un 3,5% a 0,4% de la producción total de ánodos de Codelco Ventanas.

En el Gráfico N°25 se aprecia el porcentaje mensual de doble capa y orejas deformes donde se aprecia una disminución drástica al momento de cambiar la densidad del desmoldante.

En el Gráfico N°26 se puede apreciar la producción mensual, la cantidad rechazada por doble capa y orejas deformes en toneladas.

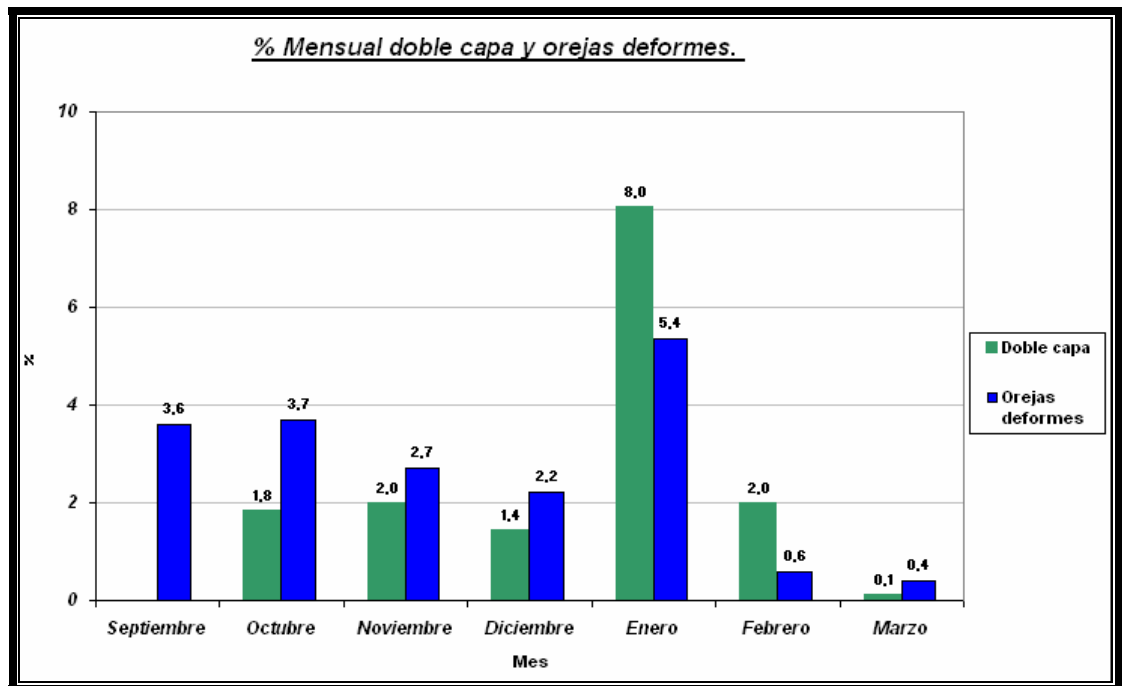


Gráfico N°25. Porcentaje de doble capa y orejas deformes producidas del total de ánodos Codelco Ventanas producidos.

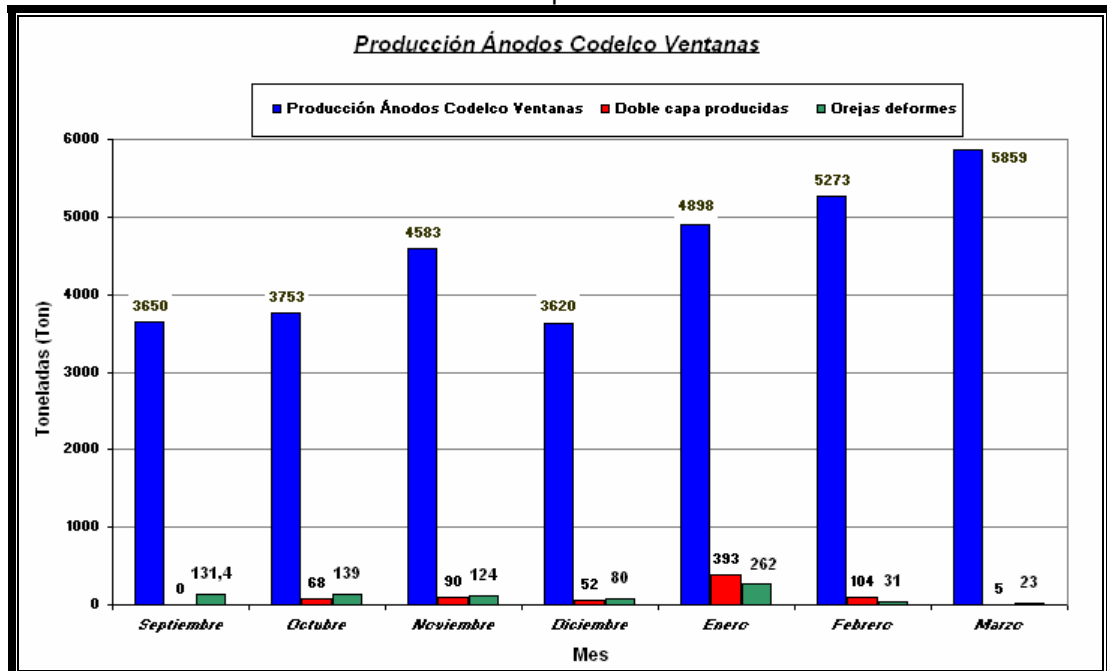


Gráfico N°26. Producción mensual de ánodos Codelco Ventanas, cantidad de doble capa y orejas deformes producidas en toneladas.

En la Tabla N°23 se aprecia el resumen de resultados en porcentajes antes y después de la intervención en la operación.

Tabla N°23. Resumen de resultados.

Falla	Antes % Promedio	Después %Promedio
Grietas	10	0,5
Doble capa	3,3	0,1
Orejas deformes	3,5	0,4

Con los resultados obtenidos las aprobaciones mensuales de los moldeos Codelco Ventanas llegaron a un 98% cumpliendo así el objetivo general impuesto para esta memoria. La evolución de las aprobaciones se puede ver en el Gráfico N°27.

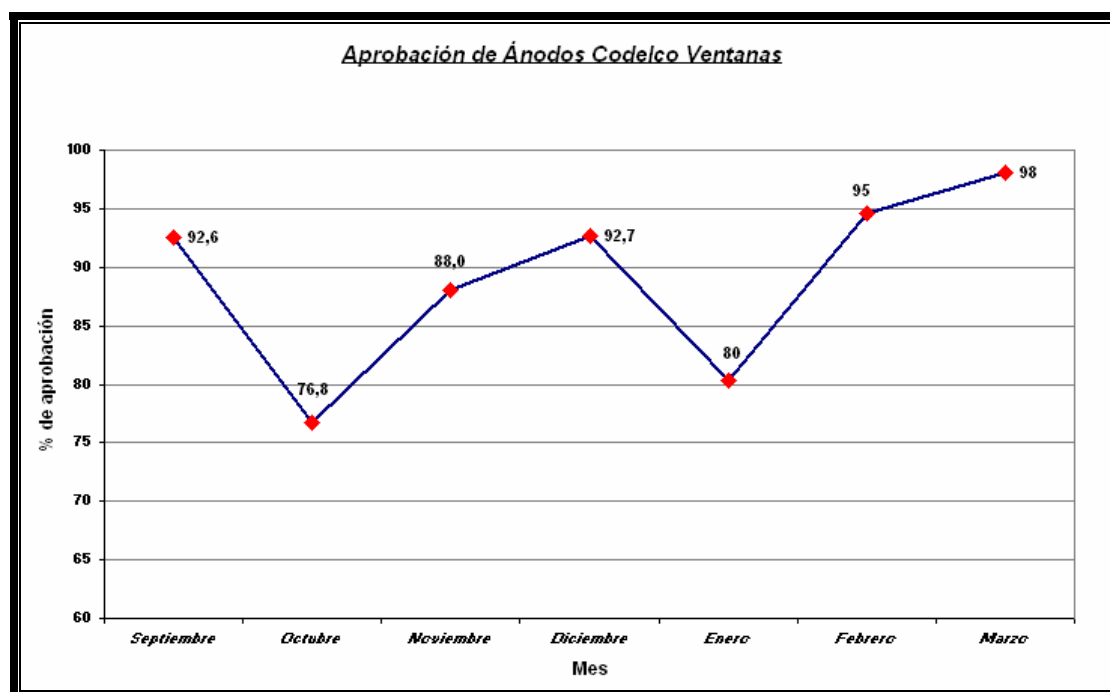


Gráfico N°27. Evolución de las aprobaciones mensuales de los moldeos Codelco Ventanas.

12. Análisis Económico.

La condición que existía en la Fundición Chagres era vender los ánodos rechazados como cobre blister por lo que se deja de percibir un premio por no tener la calidad de cobre anódico. El premio es de 50 US\$/t de cobre, el cual es entregado por el cliente. Esta es la condición base para realizar el análisis económico.

12.1 Primera Condición “Reproceso de ánodos”.

En una primera instancia, debido a que la cantidad de ánodos rechazados era alta, se empezó a reprocesar estos ánodos para poder venderlos con la calidad de cobre anódico obteniendo así el premio.

Se analiza un promedio de aprobación de 82% con una producción de 5000 toneladas mensuales de ánodos de Codelco Ventanas y un reproceso del 16% para cumplir el 98% de aprobación.

El costo de proceso es de 15 US\$/t de cobre considerando un aumento del 2% anual.

Se consideró un aumento en la producción de un 3 % anual y un incremento del premio de un 2% anual.

El personal y las instalaciones existen en la propia Fundición Chagres, por lo que no requiere de una inversión. Se considera un aumento en el costo de producción de 2 US\$/t por concepto de transporte, almacenaje y preparación para el reproceso del ánodo rechazado, por lo que el costo de reprocesar es 17 US\$/t de cobre.

Ingresos

$$Ingresos \text{ Anuales}_{año 1} = 50 \frac{US\$}{t \text{ de Cu}} * 5000 \frac{t}{Men.} * 12men. * 0,16 = 480.000US\$ \quad (11.1)$$

Costos de reproceso

$$Costo \text{ reproceso}_{año 1} = 17 \frac{US\$}{t \text{ de Cu}} * 5000 \frac{t}{Men.} * 12men. * 0,16 = 163.200US\$ \quad (11.2)$$

Tabla N°24. Producción, costo de reproceso y premio de ánodos Codelco Ventanas por año.

Año	Producción (t)	Costo US\$/t de Cu	Premio US\$/t de Cu
1	5000	17	50
2	5150	17,3	51
3	5304,5	17,7	52
4	5463,6	18,0	53,1
5	5627,5	18,4	54,1
6	5796,4	18,8	55,2
7	5970,3	19,1	56,3
8	6149,4	19,5	57,4
9	6333,9	19,9	58,6
10	6523,9	20,3	59,8

Se puede ver en la Tabla N° 25 y N°26 el flujo de caja con los flujos afectados por el reproceso de ánodos Codelco Ventanas.

Tabla N°25. Flujo de caja considerando reprocesar ánodos rechazados.

	1	2	3	4	5
Ingresos (US\$)	480.000	504.288	529.805	556.613	584.778
Costos operacionales (US\$)	163.200	171.458	180.134	189.248	198.824
Utilidad Operacional (US\$)	316.800	332.830	349.671	36.7365	385.953
Utilidad antes de impuesto (US\$)	316.800	332.830	349.671	36.7365	385.953
Impuesto (17%) (US\$)	53.856	5.6581	59.444	62.452	65.612
Utilidad después de impuesto (US\$)	262.944	276.249	290.227	304.913	320.341
Flujo (US\$)	262.944	276.249	290.227	304.913	320.341

Tabla N°26. Continuación Flujo de caja.

	6	7	8	9	10
Ingresos (US\$)	614.367	645.454	678.114	712.427	748.476
Costos operacionales (US\$)	208.885	219.455	230.559	242.225	254.482
Utilidad Operacional (US\$)	405.483	426.000	447.556	470.202	493.994
Utilidad antes de impuesto (US\$)	405.483	426.000	447.556	470.202	493.994
Impuesto (17%) (US\$)	68.932	72.420	76.084	79.934	83.979
Utilidad después de impuesto (US\$)	336.551	353.580	371.471	390.268	410.015
Flujo (US\$)	336.551	353.580	371.471	390.268	410.015

Considerando TMAR de un 40%.

$$VAN = US\$709.937 \quad (11.3)$$

12.2 Segunda Condición “Cambios Operacionales”.

Al encontrar las causas y las soluciones se implementó estos cambios operacionales, por lo que ya no era necesario el reproceso. Este cambio en la operación tiene efecto en la operación de la refrigeración y operación del pintado de moldes, instalaciones que existen en la rueda de moldeo. No hubo que realizar alguna inversión, ya que se disponía de todo lo necesario para implementar las nuevas prácticas operacionales.

Con las nuevas prácticas operacionales se empieza a percibir el premio por calidad del ánodo por el porcentaje que antes era vendido como cobre blister o reprocesado. Se aumentó el costo de producción en 0,2 US\$/t de cobre por concepto de un aumento en la densidad de pulpa del desmoldante, cuyo valor afecta a toda la producción de ánodos Codelco Ventanas.

Se analiza un promedio de aprobación de 98% con una producción de 5000 toneladas mensuales de ánodos de Codelco Ventanas.

El costo de proceso es de 15,2 US\$/t de cobre aumentó un 2% anual.

Considerando un aumento en la producción de un 3 % anual y un incremento del premio de un 2% anual.

Ingresos

$$\text{Ingresos Anuales}_{\text{año } 1} = 50 \frac{\text{US\$}}{\text{t de Cu}} * 5000 \frac{\text{t}}{\text{Men.}} * 12 \text{men.} * 0,16 = 480.000 \text{US\$} \quad (11.4)$$

Aumento en los costos operacionales.

$$\text{Costo Operacional}_{\text{año } 1} = 0,2 \frac{\text{US\$}}{\text{t de Cu}} * 5000 \frac{\text{t}}{\text{Men.}} * 12 \text{men.} = 120.00 \text{US\$} \quad (11.5)$$

Tabla N°27. Producción, el aumento del costo de proceso y premio de ánodos Codelco Ventanas por año.

Año	Producción (t)	Costo US\$/t de Cu	Premio US\$/t de Cu
1	5000	0,20	50
2	5150	0,20	51
3	5304,5	0,21	52
4	5463,6	0,21	53,1
5	5627,5	0,22	54,1
6	5796,4	0,22	55,2
7	5970,3	0,23	56,3
8	6149,4	0,23	57,4
9	6333,9	0,23	58,6
10	6523,9	0,24	59,8

Se puede ver en la Tabla N°28 y N°29 el flujo de caja con los flujos afectados por los cambios operacionales.

Tabla N°28. Flujo de caja considerando nuevas prácticas operacionales.

	1	2	3	4	5
Ingresos (US\$)	480.000	504.288	529.805	556.613	584.778
Costos operacionales (US\$)	1920	2017	2119	2226	2339
Utilidad Operacional (US\$)	478.080	502.271	527.686	554.387	582.439
Utilidad Antes de impuesto (US\$)	478.080	502.271	527.686	554.387	582.439
Impuesto (17%) (US\$)	81.274	85.386	89.707	94.246	99.015
Utilidad después de impuesto (US\$)	396.806	416.885	437.979	460.141	483.424
Flujo (US\$)	396.806	416.885	437.979	460.141	483.424

Tabla N°29. Continuación Flujo de caja considerando nuevas prácticas operacionales.

	6	7	8	9	10
Ingresos (US\$)	614.367	645.454	678.114	712.427	748.476
Costos operacionales (US\$)	2457	2582	2712	2850	2994
Utilidad Operacional (US\$)	611.910	642.873	675.402	709.577	745.482
Utilidad Antes de impuesto (US\$)	611.910	642.873	675.402	709.577	745.482
Impuesto (17%) (US\$)	104.025	109.288	114.818	120.628	126.732
Utilidad después de impuesto (US\$)	507.885	533.584	560.584	588.949	618.750
Flujo (US\$)	507.885	533.584	560.584	588.949	618.750

Considerando TMAR de un 40%.

$$VAN = US\$1.071.358 \quad (11.6)$$

El VAN es de US\$1.071.358, valor muy superior a la alternativa de reprocesar ánodo rechazado el cual tiene un VAN de US\$ 709.937, por lo que se justifica económicamente el cambio operacional.

12.3 Análisis de Sensibilidad.

Se realiza el análisis de sensibilidad con respecto a una inversión inicial, ya que no se realizó ninguna por contar con los equipos necesarios, pero estos equipos sufren muchos problemas como lo es el sistema de pintado de moldes el cual tiene muy poca eficiencia de pintado, los pirómetros desvían sus mediciones a momentos, etc. Se pueden efectuar mejoras en el sistema de refrigeración, pintado y medición. Estos sistemas cumplen la función hasta el momento, pero deficientemente en algunos momentos.

Tabla N°30. Variación del VAN y TIR con respecto a la inversión.

Inversión US\$	VAN US\$	TIR %
100.000	971.359	400
200.000	871.359	203
300.000	771.359	137
400.000	671.359	104
500.000	571.359	84
600.000	471.359	70
700.000	371.359	60
800.000	271.359	53
857.884	213.475	50

En la rueda de moldeo se pueden invertir US\$ 857.884 y se obtendrá una tasa interna de retorno del 50%. Por lo que se justifica invertir en mejoras para el sistema de pintado, refrigeración y de medición de la rueda de moldeo.

En el Gráfico N°28 podemos apreciar el TIR variando la inversión.

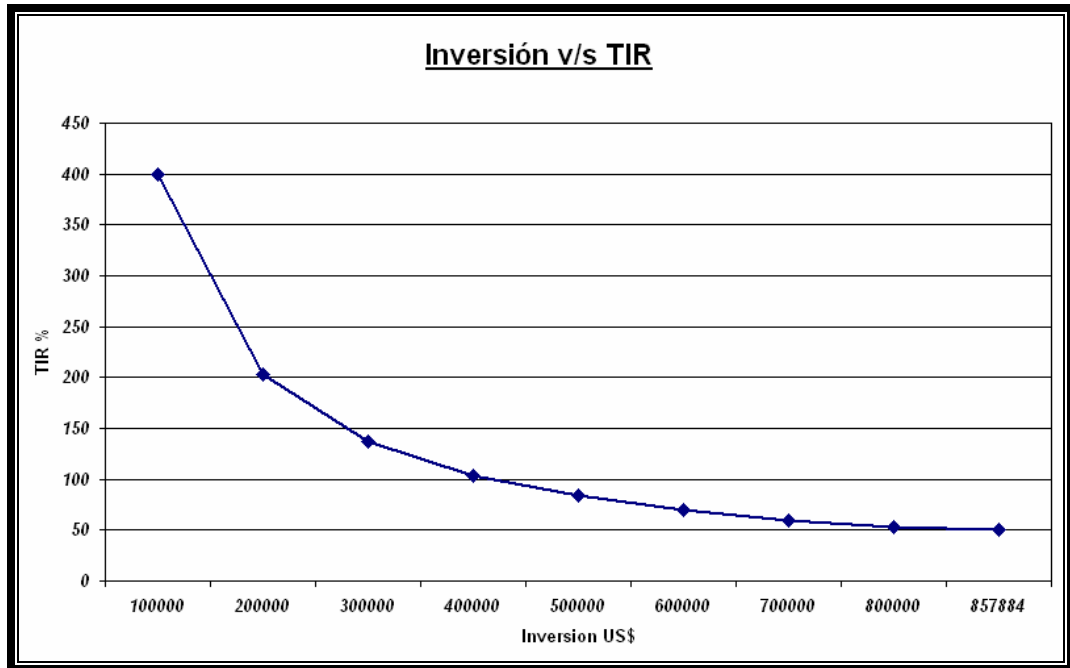


Gráfico N° 28. Variación del TIR respecto a la inversión.

13. Conclusiones.

1. Con el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos se logro la obtención y implementación de nuevas prácticas operacionales obtenidas a través del análisis de falla realizados a los ánodos Codelco Ventanas por lo que se logró disminuir los defectos en estos ánodos y cumplir la meta de obtener aprobaciones superiores a 97 % en los moldeo del cliente Codelco Ventanas.
2. A través de la búsqueda de información sobre las causas de las fallas presentes en los ánodos Codelco Ventanas se pudo obtener las bases para establecer el análisis de falla para ambos casos (grietas y doble capa).
3. Se logro identificar las variables que influían realmente en el problema y descartas las demás. En la falla de las grietas existen dos puntos importantes por lo que se pueden producir estas falla, el primero la calidad química del cobre en cuanto a impurezas (S, O, Te, Bi, As, P, Se) y el segundo la transferencia de calor según la refrigeración utilizada, puntos que fueron analizados en esta memoria. En la falla de doble capa existen dos puntos importantes que generan la falla, el primero la velocidad del vaciado del cobre al cuchara y el segundo la transferencia de calor entre el cobre y el molde punto que fue analizado. La velocidad del vaciado fue descartada ya que es una variable operacional que cambia según la temperatura del molde y es manejada por los operadores durante todo el moldeo.
4. El problema de las grietas es un problema térmico, ya que al realizar el análisis se pudo observar que existían diferencias de temperatura superiores a 200°C entre el cuerpo y el cabezal del ánodo, lo que genera una discontinuidad en la contracción generando un punto de estrés para la generación de grietas. Al analizar estas temperaturas a diferentes refrigeraciones se obtuvo que la refrigeración en el cabezal del ánodo es

innecesaria para el ánodo Codelco Ventanas, ya que al utilizarla la diferencia de temperatura entre el cuerpo y cabezal se incrementa.

5. Al disminuir la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el cabezal también disminuye la diferencia de la velocidad de enfriamiento específica. La mejor distribución de refrigeración es con las válvulas A, B, C, D, E, F, I, J, K, L abiertas y las válvulas R, S, P, Q cerradas. Esta distribución alcanza la diferencia de temperatura de 107°C entre el cuerpo y cabezal y una diferencia de velocidad de enfriamiento específica de un 33% siendo valores muy inferiores a los que existían en la operación normal (219°C y un 65% de diferencia entre las velocidades de enfriamiento específica).
6. Al implementar en la operación la nueva distribución del agua de refrigeración se disminuyeron las grietas de un 10% de la producción a un 0,5%. Con esto se verificó que la refrigeración es un punto importante para la obtención de ánodos de calidad.
7. Queda demostrado, a través de los análisis químicos, que el problema que genera grietas no es por las impurezas presentes en los ánodos. Estas impurezas (S, O, As, Te, Bi, Se, P) no superan en ningún caso los límites de concentraciones que afectan las propiedades físicas de los ánodos.
8. La doble capa y orejas deformes se producen por una muy rápida solidificación en el sector de las orejas, debido a que el paso del calor del cobre al molde tiene una muy baja resistencia térmica, solidificando la primera ola de cobre que llega a la oreja, formando la segunda capa sobre una capa ya sólida. La forma de controlar esta resistencia en la interfase molde-cobre es a través del desmoldante.
9. A través del análisis realizado se pudo obtener que trabajar a densidades de pulpa de desmoldante mayores a 1.130 g/l incrementa la resistencia térmica en un 92% considerando que se operaba con una densidad de 1.040g/l. Al implementar la nueva práctica operacional se disminuyó la doble capa de un

3,3% a un 0,1% de la producción de ánodos Codelco Ventanas y las orejas deformes de un 3,5 a un 0,4 %.

10. Al obtener un 16% más de aprobación que el promedio en que se encontraba antes del análisis se logran beneficios económicos, ya que este cobre aprobado ya no tiene que ser vendido como cobre blister ni reprocesado, obteniendo así un premio de 50US\$/(tonelada de Cobre) por alcanzar la calidad de cobre anódico. Al realizar el análisis se obtiene que el VAN de las mejoras operacionales es de US\$1.071.358 por lo que se justifica el cambio operacional.
11. El VAN de las mejoras operacionales es superior en US\$ 361.421 a la alternativa tomada en una primera instancia de reprocesar ánodos.

Bibliografía.

1. Datos de Fundición Chagres facilitados para esta memoria.
2. John Campbell, "Castings", Second edition 2003, Elsevier Science Ltd, Capítulos 8,pag 245-275.
3. Anglo American Chile "Reporte de Desarrollo Sustentable y Estados Financieros 2008" disponible en: http://www.anglochile.cl/es/doc/angloamerican_chile2008_individual_es.pdf.
4. AngloAmerican, "Curso Multimedia Refino y moldeo", División Fundición Chagres, Primera edición
5. Codelco Ventanas, Informe "Generación ánodos rechazados por grietas en ruedas de moldeo", Diciembre 2007, Pág. 4-18.
6. Sydney H. Avner, "Introducción a la metalurgia física", McGraw-Hill1988, Pág. 77-80; Pág.626-630.
7. D. Jaramillo; L. Sánchez, "Crystalline structure of copper, mechanical microscopic properties and of processing", Universidad Militar Nueva Granada., Septiembre 2006, Pág 1-6.
8. Hinojosa; Moises, "La estructura cristalina de los metales, Septiembre 2000, Vol.III, N°8, Pág. 2-4.
9. John Campbell, "Castings", Second edition 2003, Elsevier Science Ltd, Capítulos 1- 2-3-4-5-7-9.
10. AngloAmerican, "Curso Multimedia Tecnologías aplicadas al proceso de conversión", División Fundición Chagres, Primera edición.
11. Vicente Amigó Borrás, "Tecnología de materiales", Ed. Univ. Politéc. Valencia, 2003, Pág. 280-285.
12. Adrian Bejan; Allan D. Kraus, "Heat Transfer Handbook", John Wiley & Sons, Inc.2003, Capítulos 3, 7, 8.
13. Hans Appold, "Tecnología de los metales para profesiones técnico-mecánicas", Reverte, 1994, Pág.120-130.
14. Serope Kalpakjian; Steven R. Schmid; Gabriel tr Sánchez García," Manufactura, ingeniería y tecnología", Pearson Educación, 2002, Pág. 253.

15. AngloAmerican, "Curso Multimedia manual operacional de manejo integral de aguas", División Fundición Chagres, Primera edición.
16. AngloAmerican, "Curso Multimedia Tecnologías aplicadas a la operación del Horno Flash", División Fundición Chagres, Primera edición.
17. AngloAmerican, "Curso Multimedia Tecnologías aplicadas a la operación de la planta de acido", División Fundición Chagres, Primera edición.
18. Donald Q. Kern, "Procesos de transferencia de calor", Compañía editorial continental, México 1999, Pág. 13-90.
19. J. H. Leinhard, "Heat Transfer Textbook", Pholgtston Press 2003, Capítulos 2, 3, 4.
20. Donald. Askeland, "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Es. Thomson, 1998, Capitulo 8, Pág. 210 -240.
21. George S. Brady; Henry R. Clauser, "Materials Handbook, McGraw-Hill, Pág. 274-276.
22. John D. Verhoeven, "Fundamentos de la metalurgia física", Limusa1987, Capitulo 9, Pág. 253-280.
23. O. Quintero Sayago, "Solidificación", Universidad Simón Bolívar, Departamento de Ciencia de Materiales; Pág. 4-12.

ANEXOS

Anexo N°1

Cálculos capítulo N°7

Cálculos

Balance de Energía

Balances de energía realizados en HSC Chemistry.

Datos Ingresados

Entrada 180.000 kg de Cu a una temperatura de 1170 °C.

Salida 180.000 kg de Cu a una temperatura de 100 °C.

Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida. (Masa, energía y temperaturas)

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ²	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu Entrada	1170,000	2832,594	180000,000	20,089	129129,41	129129,41
2	Cu Salida	100,000	2832,594	180000,000	20,089	5274,83	5274,83
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-123854,59	-123854,59

Fig. N°1. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ²	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-123854,59	-123854,59

Fig. N°2. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q = 123.854MJ$$

Transferencia de Calor

Calor por radiación

Cálculos de velocidad radiante de 1 m² de Cu al ambiente a diferentes temperaturas.

Temperatura ambiente: 25°C=298 K

Constante de SB: $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Emisividad de cobre oxidado: $\varepsilon = 0,82$

Área= 1 m²

$$Q_{\text{radiación}} = 1 * 0,82 * 5,67 * 10^{-8} (T_1^4 - 298^4)$$

T_1 se reemplazo para cada $Q_{radiacion}$

T_1 (°C)	T_1 (K)	Q kJ/s
1200	1473	219
1100	1373	165
1000	1273	122
900	1173	88
800	1073	61
700	973	41
600	873	27
500	773	16
400	673	9
300	573	5
200	473	2
100	373	1
25	298	0

Datos graficados en el Gráfico N°3.

Para calcular la radiación emitida por un moldeo de seis horas, se estableció que siempre hay un ánodo en todas las posiciones de la rueda antes del estanque Bosh (12 posiciones), condición que se cumple en casi todo el moldeo (Las posiciones son desde que se vacía cobre a un molde hasta la posición donde el Take-off lo toma para depositarlo en el estanque Bosh).

Se midieron las temperaturas en las 12 posiciones que recorren los ánodos en la rueda de moldeo.

- **Ánodo Codelco Ventanas:**

Área: 0,95m²

La velocidad de radiación se calculó con respecto a:

$$Q_{radiacion} = 0,95 * 0,82 * 5,67 * 10^{-8} (T_1^4 - 298^4)$$

Posición	T_1 (°C)	MJ/s	MJ/h	Total moldeo (MJ)
1	1170	0,2	688	4129
2	990	0,1	403	2420
3	966	0,1	373	2241
4	921	0,1	322	1932
5	870	0,1	270	1621
6	795	0,1	206	1234
7	745	0,05	170	1017
8	684	0,04	132	793
9	622	0,03	101	605
10	592	0,02	88	527
11	526	0,02	64	381
12	481	0,01	50	301
			Total	17.199

$$Q_{radiacion} = 17.199 \text{ MJ}$$

Calor por Conducción

Calor retenido en los moldes el cual no es entregado al agua de refrigeración.

Material molde: Cobre.

Cantidad: 16

Masa: 3000 kg.

Temperatura inicial del molde: 90 °C.

Temperatura final del molde: 250 °C.

$$\text{Masa total de Moldes} = 16 * 3000 = 48.000 \text{ kg}$$

Balance de energía realizado en HSC.

Datos

Entrada 48.000 kg de Cu a una temperatura de 90°C.

Salida 48.000 kg de Cu a una temperatura de 250°C

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu Entrada	90,000	755,358	48000,000	5,357	1216,86	1216,86
2	Cu Salida	250,000	755,358	48000,000	5,357	4312,95	4312,95
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	3096,09	3096,09

Fig. N°3. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	3096,09	3096,09

Fig. N°4. Resumen Balance realizado en HSC.

$$Q_{\text{Conducción}} = 3096 \text{ MJ}$$

Calor por Convección

Por diferencia se puede calcular el calor por convección.

$$Q = Q_{\text{radiación}} + Q_{\text{conducción}} + Q_{\text{convección}}$$

Por lo tanto, el calor por convección es:

- **Ánodos Codelco Ventanas:**

$$Q_{\text{convección}} = 103.559 \text{ MJ}$$

Cálculos de la distribución del calor por Convección

$$Q_{\text{convección}} = Q_{\text{estanque Bosh}} + Q_{\text{tunel enfriamiento}} + Q_{\text{convección libre}}$$

Estanque Bosh

Se toma la temperatura que entran al estanque y la que salen, y se realiza un balance de energía.

Para simplificar los análisis se hace un promedio de temperatura de entrada para los 4 tipos ánodos y de salida.

Balance de energía realizado en HSC

Masa: 180.000kg

Temperatura de entrada a estanque Bosh: 500°C

Temperatura de salida a estanque Bosh: 100°C

Datos

Entrada de 180.000kg a una temperatura de 500°C

Salida de 180.000kg a una temperatura de 100°C

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ²	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada		2832,594	180000,000	20,089	35085,25	35085,25
2	Cu salida		2832,594	180000,000	20,089	5274,83	5274,83
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-29810,43	-29810,43

Fig. N°5. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ²	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-29810,43	-29810,43

Fig. N°6. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{\text{estanque Bosh}} = 29.810 \text{ MJ}$$

Convección libre

Para este cálculo se consideraron los 16 moldes de la rueda y las posiciones que el aire tiene contacto con el ánodo, es decir, en 12 posiciones.

El área del molde que tiene contacto con el aire es 3,72m² y esto ocurre sólo cuando no tiene ánodo, lo que sucede en 4 posiciones. Cuando el molde tiene un ánodo, el área de contacto con el aire disminuye a 2,76m² lo cual ocurre en 12 posiciones, ya que la otra parte del área el aire tiene contacto con el ánodo.

Convección libre de moldes

$$\text{Área ánodo: } 0,96 \text{ m}^2$$

$$h_c \text{ Aire} = 15 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

$$Q_{\text{convección libre}} = A_{\text{MOLDE}} * h_c * (T_s - T_{\text{fluido}})$$

$$T_{\text{fluido}} : 25^\circ\text{C}$$

La temperatura de los moldes es de 200°C.

Posición	Área (m ²)	Temperatura °C	MJ/s	MJ/h	Total Moldeo (MJ)
1	2,76	200	0,007	26,1	156,5
2	2,76	200	0,007	26,1	156,5
3	2,76	200	0,007	26,1	156,5
4	2,76	200	0,007	26,1	156,5
5	2,76	200	0,007	26,1	156,5
6	2,76	200	0,007	26,1	156,5
7	2,76	200	0,007	26,1	156,5
8	2,76	200	0,007	26,1	156,5
9	2,76	200	0,007	26,1	156,5
10	2,76	200	0,007	26,1	156,5
11	2,76	200	0,007	26,1	156,5
12	2,76	200	0,007	26,1	156,5
13	3,72	200	0,010	35,2	210,9
14	3,72	200	0,010	35,2	210,9
15	3,72	200	0,010	35,2	210,9
16	3,72	200	0,010	35,2	210,9
				Total	2721,6

$$Q_{\text{convección libre Moldes}} = 2722 \text{ MJ}$$

Convección libre ánodos

Para estos cálculos se toman las mismas mediciones de temperaturas tomadas anteriormente y se enfoca de la misma manera como se hizo con el calor de radiación, es decir, se considera que siempre hay un ánodo en las 12 primeras posiciones de la rueda. El calor transmitido por convección libre desde el ánodo es.

$$Q_{\text{convección libre}} = A_{\text{Anodo}} * h_c * (T_s - T_{\text{fluido}})$$

- **Ánodo Codelco Ventanas:**

Posición	Temperatura °C	MJ/s	MJ/h	Total Moldeo (MJ)
1	1170	0,016	59	352
2	990	0,014	50	297
3	966	0,013	48	290
4	921	0,013	46	276
5	870	0,012	43	260
6	795	0,011	40	237
7	745	0,010	37	222
8	684	0,009	34	203
9	622	0,009	31	184
10	592	0,008	29	175
11	526	0,007	26	154
12	481	0,006	23	140
			Total	2789

$$Q_{\text{convección libre Anodo}} = 2789 \text{ MJ}$$

Convección Libre total

- **Ánodo Codelco Ventanas:**

$$Q_{\text{convección libre}} = 5511 \text{ MJ}$$

Convección en túnel de enfriamiento

Por diferencia se puede calcular la convección en el túnel de enfriamiento:

$$Q_{\text{convección}} = Q_{\text{es tan que Bosh}} + Q_{\text{túnel enfriamiento}} + Q_{\text{convección libre}}$$

- **Ánodo Codelco Ventanas:**

$$Q_{\text{tunel enfriamiento}} = 68.238 \text{ MJ}$$

Otra manera de llegar al calor transferido en el túnel de enfriamiento es hacer un balance de energía al agua de refrigeración.

El caudal de agua de refrigeración es de 1600lt/min. (Instrumento de medición TAG. FIT4141.PV)

La temperatura promedio de entrada del agua es 35°C. (Instrumento de medición TAG. TIT4138.PV)

La temperatura promedio de salida del agua es de 55°C. (Instrumento de medición TAG. TIT6640A.PV).

Datos del agua.

$$C_p \text{ Promedio} = 4,18 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad} = 1\text{g/l}$$

$$Q = m * C_p * (T_{\text{Salida}} - T_{\text{Entrada}})$$

$$Q = 1600 * 1 * 4,18 * (55 - 35) = 133.760 \text{ kJ / min}$$

En un moldeo de 6 horas el calor es:

$$Q = 48.153 \text{ MJ}$$

Se estima un 10 % de evaporación.

$$\text{Masa evaporada} = 1600 * 0,1 * 1 * 60 * 6 = 57.600 \text{ kg}$$

Calor latente de evaporación: 6,007 KJ/mol

Peso molecular H₂O:18

$$Q_{\text{Evaporación}} = \frac{57.600}{18} * 1000 * 6,007 = 1,922 * 10^7 \text{ kJ} = 19.222 \text{ MJ}$$

$$Q_{\text{Tunel de enfriamiento}} = 48.153 + 19.222 = 67.375 \text{ MJ}$$

Valor que se aproxima al valor calculado anteriormente.

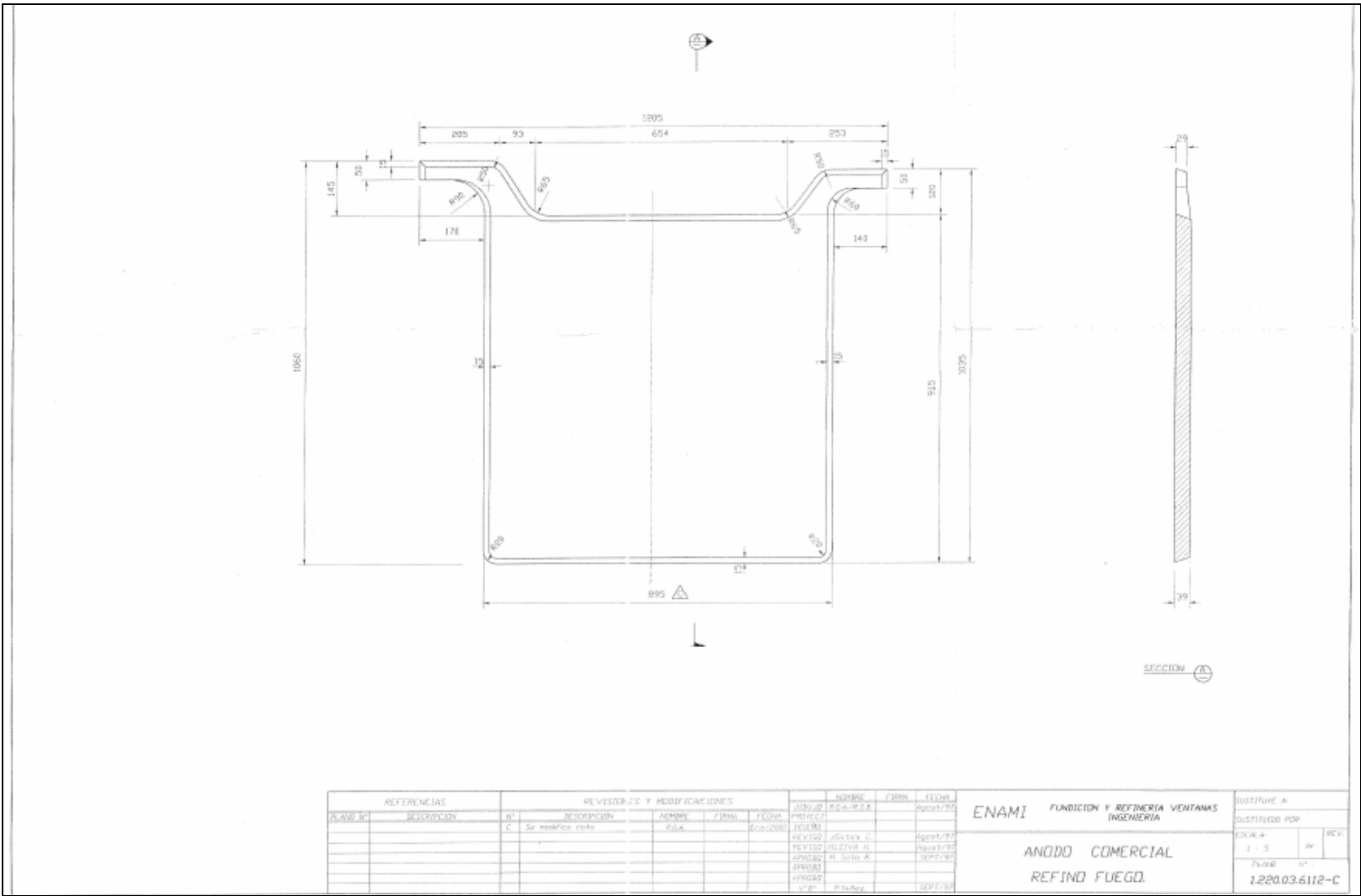
Anexo N°2

Planos del sistema de refrigeración y ánodos

Planos.

Nº1. Plano de ubicación de dispersores en el túnel de enfriamiento.

Nº2 Plano Ánodo Codelco Ventanas.



REFERENCIAS		REVISORES Y MODIFICACIONES				FECHA		ESTADO	
PLANO N°	REVISOR	N°	ACORDEON	ASIGNA	FECHA	ESTADO	FECHA	ESTADO	FECHA
		C	Se modifica coto	SSA	05/01/2000	REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			
						REVISADO			

ENAMI FUNDICION Y REFINERIA VENTANAS INGENIERIA

ANODO COMERCIAL
REFINO FUEGO.

DISTRIBUIDOR A:
DISTRIBUIDOR POR:
EJEC. N°: 3 - 5
REV. N°: 01
FECHA: 12/20/03
1.220.03.6112-C

Anexo N°3

Análisis Térmico

Cálculos

Tiempo en el túnel de enfriamiento: 271 segundos.

Tiempo utilizado para todos los cálculos de esta sección.

Se realizaron balances de energía al cuerpo y cabezal con cada tipo de refrigeración para calcular la velocidad de enfriamiento de cada sección.

La masa de cuerpo del ánodo es: 235 kg.

La masa de cabezal del ánodo es: 40 kg.

Balances de energía realizados en HSC.

Refrigeración Total

Temperatura de entrada a túnel de enfriamiento: 929°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cabezal: 375°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cuerpo: 594°C

- Cabezal**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	15,56	15,56
2	Cu salida tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	5,67	5,67
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-9,88	-9,88

Fig. N°1. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-9,88	-9,88

Fig. N°2. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cabezal} = 9880 \text{ kJ}$$

- Cuerpo**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	91,39	91,39
2	Cu salida tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	55,39	55,39
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-36,00	-36,00

Fig. N°3. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-36,00	-36,00

Fig. N°4. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cuerpo} = 36000kJ$$

Refrigeración con válvula P cerrada.

Temperatura de entrada a túnel de enfriamiento: 945°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cabezal: 435°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cuerpo: 619°C

- **Cabezal**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	15,86	15,86
2	Cu salida tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	6,69	6,69
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-9,18	-9,18

Fig. N°5. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-9,18	-9,18

Fig. N°6. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cabezal} = 9180 kJ$$

- **Cuerpo**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	93,21	93,21
2	Cu salida tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	57,97	57,97
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-35,24	-35,24

Fig. N°7. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-35,24	-35,24

Fig. N°8. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cuerpo} = 35.240 kJ$$

Refrigeración con válvulas P, R cerradas

Temperatura de entrada a túnel de enfriamiento: 934°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cabezal: 463°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cuerpo: 622°C

- **Cabezal**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	15,65	15,65
2	Cu salida tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	7,16	7,16
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-8,49	-8,49

Fig. N°9. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-8,49	-8,49

Fig. N°10. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cabezal} = 8490 \text{ kJ}$$

- **Cuerpo**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	91,95	91,95
2	Cu salida tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	58,28	58,28
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-33,68	-33,68

Fig. N°11. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-33,68	-33,68

Fig. N°12. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cuerpo} = 33.680 \text{ kJ}$$

Refrigeración con válvulas P, R, S cerradas.

Temperatura de entrada a túnel de enfriamiento: 948°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cabezal: 509°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cuerpo: 641°C

- **Cabezal**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	15,92	15,92
2	Cu salida tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	7,95	7,95
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-7,97	-7,97

Fig. N°13. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-7,97	-7,97

Fig. N°14. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cabezal} = 7970 \text{ kJ}$$

- **Cuerpo**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	93,55	93,55
2	Cu salida tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	60,25	60,25
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-33,30	-33,30

Fig. N°15. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-33,30	-33,30

Fig. N°16. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cuerpo} = 33.300 \text{ kJ}$$

Refrigeración con válvulas P, R, S, Q cerradas

Temperatura de entrada a túnel de enfriamiento: 945°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cabezal: 524°C

Temperatura de salida a túnel de enfriamiento del cuerpo: 631°C

- **Cabezal**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	15,71	15,71
2	Cu salida tunel de enfriamiento		0,629	40,000	0,004	8,21	8,21
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-7,50	-7,50

Fig. N°17. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-7,50	-7,50

Fig. N°18. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cabezal} = 7500 \text{ kJ}$$

- **Cuerpo**

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada a tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	92,29	92,29
2	Cu salida tunel de enfriamiento		3,698	235,000	0,026	59,21	59,21
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-33,09	-33,09

Fig. N°19. Balance de energía mostrando corriente de entrada y salida (masa, energía y temperaturas).

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-33,09	-33,09

Fig. N°20. Resumen de balance realizado en HSC.

$$Q_{Cuerpo} = 33.090 \text{ kJ}$$

Velocidad de enfriamiento

$$v = \frac{Q}{t}$$

Velocidad de enfriamiento especifica

$$v = \frac{Q}{t * kg}$$

Diferencia

$$\left(1 - \frac{v_{cuerpo}}{v_{cabezal}}\right) * 100$$

Anexo N°4

Cálculos Capítulo N° 10

Cálculos

Área oreja:

$$3,5 * 12 = 42 \text{ cm}^2$$

Volumen con una capa de 1cm:

$$42 * 1 = 42 \text{ cm}^3$$

Cantidad de masa:

$$42 \text{ cm}^3 * 7,938 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 333,4 \text{ g}$$

Energía liberada.

Balance de energía realizado en HSC.

Entrada 333,4 g a 1150°C

Salida 333,4 g a 1080 °C.

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm ³	Latent H MJ	Total H MJ
1	Cu entrada		0,005	0,333	0,000	0,24	0,24
2	Cu salida		0,005	0,333	0,000	0,15	0,15
3	BALANCE		0,000	0,000	0,000	-0,08	-0,08

Fig.Nº1. Balance de masa especificando las corrientes.

	kmol	kg	Nm ³	MJ	MJ
BALANCE (1)	0,000	0,000	0,000	-0,08	-0,08

Fig. Nº2 Resumen de balance de energía.

$$Q = 0,08 \text{ MJ} = 80 \text{ kJ}$$

Radiación

Por el efecto de la radiación se pierden

Temperatura promedio: 1100°C

$$Q_{\text{radiación}} = 0,82 * 5,67 * 10^{-8} (1373^4 - 298^4)$$

$$Q_{\text{radiación}} = 164.860 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Velocidad interfase molde-cobre

Considerando que la conductividad del cobre es un promedio de las conductividades del sólido y líquido se determina la velocidad de transferencia de calor en la interfase.

Área de contacto del cobre con el molde: $0,0073 \text{ cm}^2$

Conductividad cobre a $1.100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conductividad líquido: 330 W/mk

Conductividad sólido: 340 W/mk

Promedió conductividad: 335 W/mK

Temperatura molde: 300°C

Temperatura Promedio cobre: 1100°C

$$Q = 335 * (1373 - 573)$$

$$Q = 268.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

En la interfase de 4mm

$$Q = 67.000 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Porosidad

Para calcular la porosidad de cada densidad de pulpa utilizada en la rueda de moldeo se utilizan las densidades:

Densidad de la pulpa: $D_{lechada}$ en g/l

Gravedad específica del agua: $G_{agua} = 1$

Gravedad específica del desmoldante: $G_{desmoldante} = 2,8$

Volumen de sólido: $V_s = (D_{lechada} / 1000 - G_{agua}) / (G_{desmoldante} - G_{agua})$

Volumen de sólido: $V_l = (-D_{lechada} / 1000 + G_{solido}) / (G_{desmoldante} - G_{agua})$

Flujo: $F = 50 \text{ ml}$.

Área de dispersión en la oreja: $A = 80 \text{ cm}^2$

$$\text{Volumen de líquido en } 1 \text{ cm}^3 = V_{\text{liquido } 1\text{cm}^3} = \frac{F}{A} * V_l$$

$$\text{Volumen de sólido en } 1 \text{ cm}^3 = V_{\text{solido } 1\text{cm}^3} = \frac{F}{A} * V_s$$

$$\text{Gramos de desmoldante: } \textit{grs desmoldante} = G_{\text{desmoldante}} * V_{\text{solido } 1\text{cm}^3}$$

$$r = (V_{\text{solido } 1\text{cm}^3} * 3 / (4 * \pi))^{1/3}$$

$$\text{Área del desmoldante: } A_{\text{desmoldante}} = 4 * \pi * r^2$$

$$\text{Porosidad: } P = \frac{(1 - A_{\text{desmoldante}})}{1} * 100$$

Calculando obtenemos:

Densidad de Pulpa (g/l)	Porosidad %
1000	0
1010	89
1020	82
1030	77
1040	72
1050	67
1060	63
1070	60
1080	56
1090	52
1100	48
1110	45
1120	42
1130	39
1140	35
1150	32

Calculo de velocidad de transferencia de calor

Una resistencia térmica es:

$$R_k = \frac{L}{kA}$$

En el sistema analizado en el capítulo 9 el paso del calor queda definido por:

$$Q_K = \frac{\Delta T_{global}}{R_2 + R_D}$$

Donde

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}, \text{por lo tanto, } R_2 = \frac{R_B R_C}{R_B + R_C}$$

Esta resistencia cambia de valor según la porosidad, ya que el área cubierta cambia.

$$\text{Área cubierta por desmoldante} = A * (1 - \varepsilon)$$

Donde ε es la porosidad en fracción.

$$\text{Área no cubierta por el desmoldante} = A * \varepsilon$$

Valores ocupados para calcular los valores de la resistencia.

Conductividad desmoldante 0,13 W/mK

Se considera que la capa de desmoldante es de 4mm y para calcular el valor de la velocidad de transferencia en la interfase se considera sólo el sistema molde-desmoldante y no el total del molde, ya que se considera suficientemente conductivo para extraer todo el calor que se extraiga del cobre.

Por lo que el calor queda definido por:

$$Q_K = \frac{\Delta T_{global}}{R_2}$$

Porosidad %	R ₂	Q kW/m ²
0	0,0308	26
5	0,0002	3375
10	0,00012	6723
15	0,00008	10.072
20	0,00006	13.421
25	0,00005	16.770
30	0,00004	20.118
35	0,00003	23.467
40	0,00003	26.816
45	0,00003	30.164
50	0,00002	33.513
55	0,00002	36.862
60	0,00002	40.210
65	0,00002	43.559
70	0,00002	46.908
75	0,00002	50.257
80	0,00001	53.605
85	0,00001	56.954
90	0,00001	60.303
95	0,00001	63.651
100	0,00001	67.000

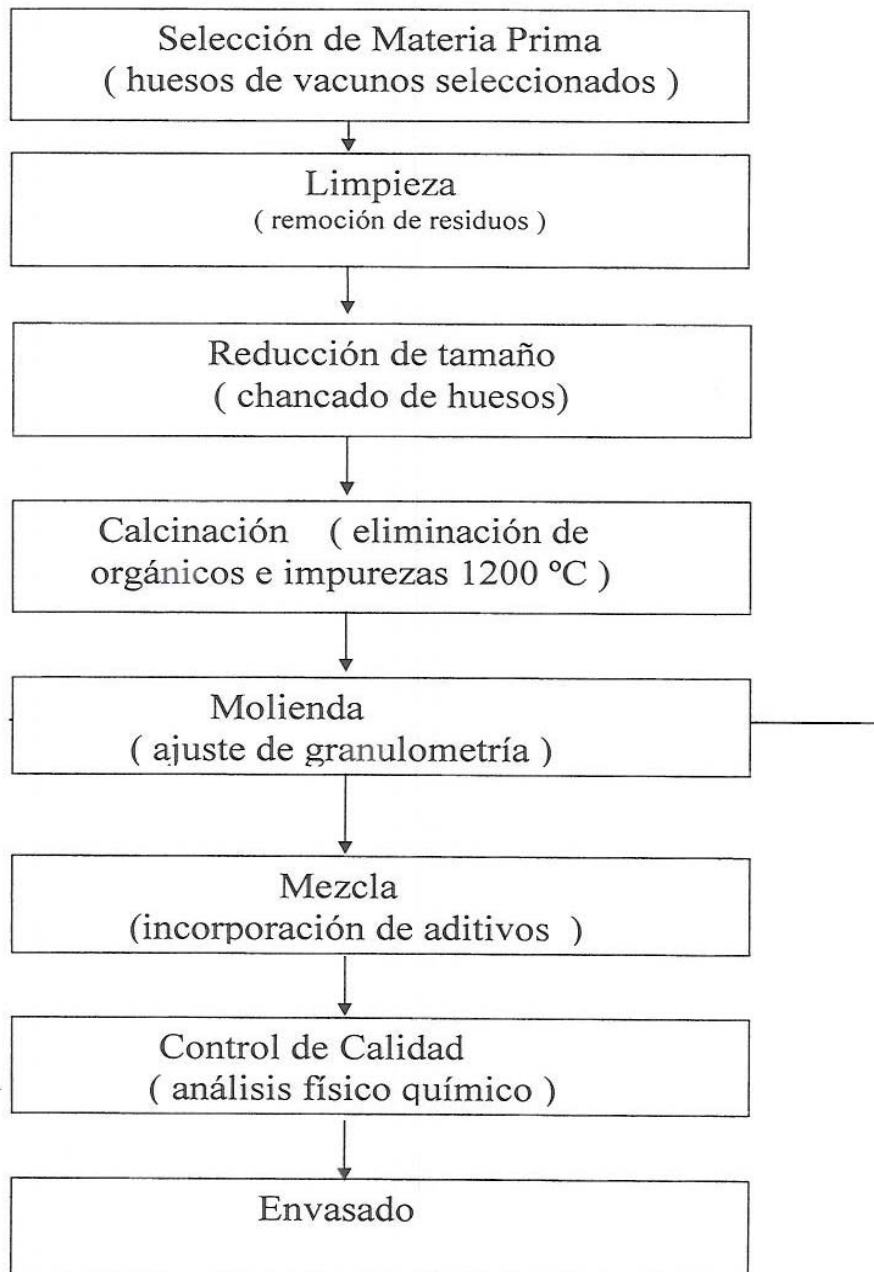
Anexo N°5

Propiedades del desmoldante

Descripción

Extramould es un desmoldante especialmente diseñado para el moldeo de ánodos de cobre es un producto en polvo, formulado en base a ceniza natural de hueso y una combinación de aditivos, que permite obtener un recubrimiento uniforme y alta adherencia sobre la superficie del molde. Esta película actúa como desmoldante entre molde y el nodo de cobre, debido a su gran capacidad de absorción de calor.

Proceso de Fabricación



Especificaciones Técnicas

El desmoldante extramould, cuya base es una mezcla natural de huesos más una combinación de aditivos, permite obtener un recubrimiento uniforme y de alta adherencia sobre la superficie del molde. Esta película actúa como desmoldante entre el ánodo de cobre debido a su gran capacidad de absorción de calor.

Análisis Químico típico.

CaO	54,1%
P ₂ O ₅	41,5%
Azufre max <	0,2%
Fe ₂ O ₃	0,08%
SiO ₂ total	0,6%
Ca ₃ (PO ₄) ₂	95,6%

Análisis Físico típico.

Densidad aparente	1,1 g/cm ³
Gravedad específica	2,8 g/cm ³
Humedad	0,1%
Granulometría	95% bajo malla 325
Conductividad térmica	0,13 W/mK