



revista

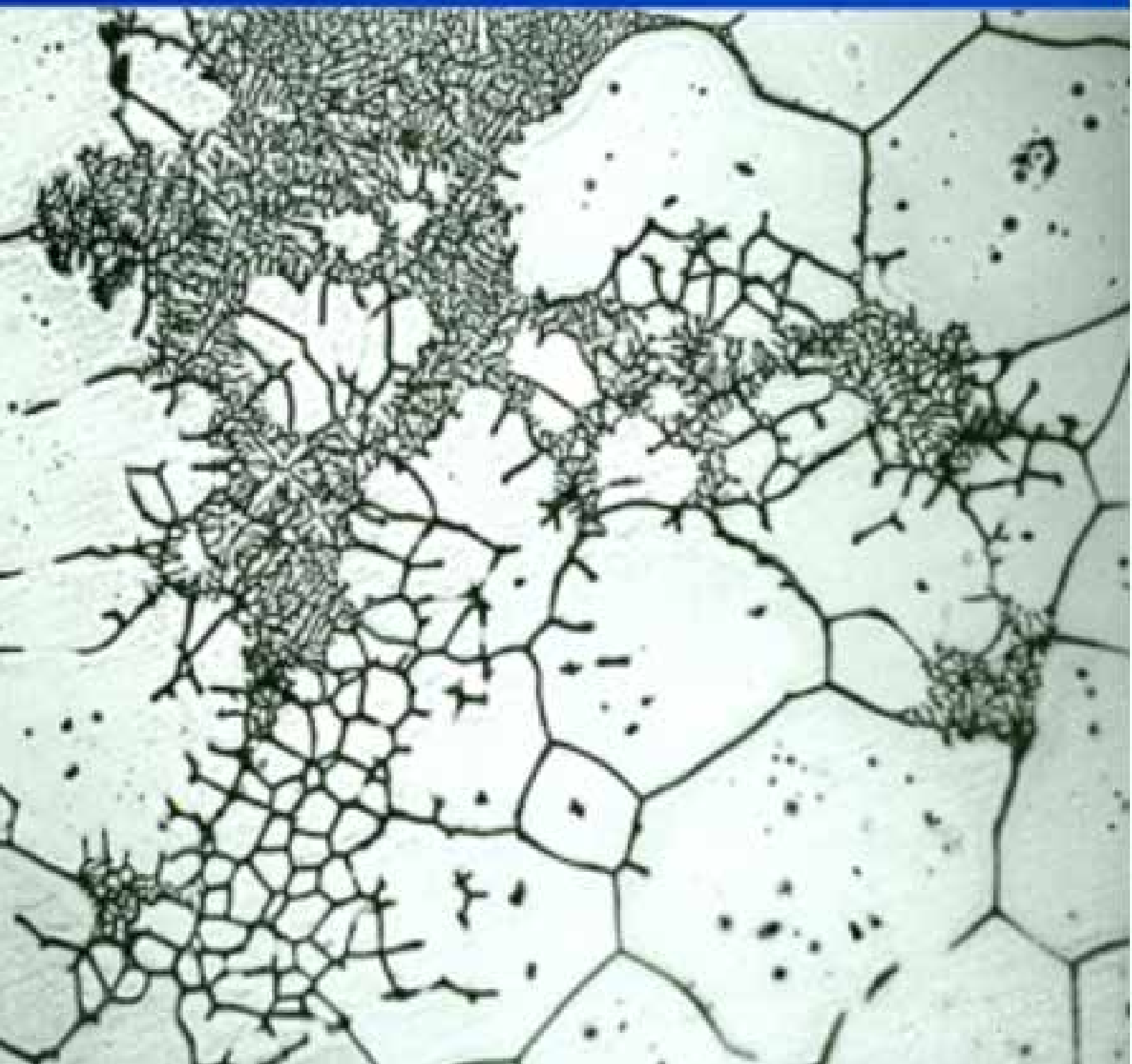
remetalica

departamento de ingeniería metalúrgica • facultad de ingeniería • universidad de santiago de chile

AÑO 25, N°13 DICIEMBRE 2005

SANTIAGO - CHILE

ISSN 0716-291X



Editorial

Con este nuevo número de la revista Remetallica completamos el quinto desde que reiniciamos la edición en julio del 2003. Desde esa fecha hemos tenido la colaboración de académicos, alumnos y por supuesto de egresados de nuestro departamento y de la universidad.

En esta edición publicamos artículos relacionados con las nuevas tendencias en la electrorefinación de cobre, aceros resistentes a la corrosión atmosférica, investigaciones en plasticidad de metales, las capacidades de técnicas de análisis por medio de microscopía de fuerza atómica y un interesante artículo sobre el origen estelar de los metales. Un espectro amplio de temas.

El año 2006 nos trae, como departamento de ingeniería metalúrgica, grandes desafíos, en particular, la acreditación de las carreras de pregrado y reacreditación de los programas de postgrado. Para llevar a cabo estas actividades solicitamos la valiosa colaboración de nuestros egresados. Necesitamos vuestra visión para evaluar a los nuevos profesionales que se están formando y las sugerencias para mejorar los planes y programas de las carreras. Como bien lo sabemos el Departamento está conformado por los académicos, alumnos, administrativos y egresados. La participación de estos cuatro estamentos nos permitirá seguir avanzando en la formación de los futuros profesionales metalurgistas que requiere el país. Próximamente los contactaremos.

Aprovechamos para desearle a toda la comunidad metalúrgica éxito y prosperidad para el año 2006.

TENDENCIAS EN LA TECNOLOGÍA DE ELECTROREFINACION DE COBRE

Carlos Cuadra
Ingeniero Civil Metalurgista

Jane Standen T.
Ingeniero Civil Químico

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La producción de cobre de pureza comercial a partir de minerales sulfurados se efectúa mayoritariamente por la vía de los procesos de:

- flotación, que entrega un concentrado de cobre,
- fundición, que procesa el concentrado para producir ánodos, y
- refinación electrolítica, que produce cátodos de alta pureza.

Por ya varias décadas se ha venido intentando reemplazar los procesos de fusión y electrorefinación por otros de lixiviación, extracción por solventes y electroobtención, para transformar los concentrados de cobre en cátodos, pero ello hasta ahora no se ha logrado en forma comercial, a pesar de los incentivos que existen para introducir nuevos procesos con reducción de las emisiones de las fundiciones. Mientras tanto, los procesos de fundición y electrorefinación han seguido experimentando mejoras significativas, las que tienden a reforzar sus ventajas naturales, que les han permitido mantenerse como la opción preferente para el tratamiento de concentrados sulfurados de cobre.

La primera patente⁽¹⁾ para la producción de metales electrorefinados, se obtuvo en Inglaterra en el año 1865 por el Sr. James Elkington para la electrorefinación de cobre. La primera refinera de

cobre fue construida por Balbach Smelting and Refining Company en 1883. Las primeras refineras tuvieron dificultad para producir cátodos rígidos y de alta pureza. Esta dificultad la contrarrestaron con la adición de aditivos al electrolito y mejorando la circulación del electrolito en las celdas, llegando a producir cobre de mayor pureza y calidad que el producido con el proceso de refinado a fuego. En el año 1914 el cobre electrorefinado fijó el precio oficial del mercado.

En los inicios del siglo pasado, la industria del cobre creció rápidamente con la construcción de refineras en América, Europa y Australia. El proceso de electroobtención⁽¹⁾ fue desarrollado a gran escala entre los años 1912 y 1915 en Chuquicamata, Chile.

Los motivos que han impulsado el mejoramiento continuo del proceso de electrorefinación y del manejo y tratamiento de los electrodos son⁽²⁾:

- La industria del cobre ha debido crecer para satisfacer la demanda del mercado.
- La calidad del cátodo adquirió más importancia debido a la mayor exigencia que impusieron los productores de alambre fino por trefilación a los productores de alambrón, lo que repercutió finalmente en las electrorefinerías.
- Reducir el alto costo de operación y mano de obra
- Reducir la mano de obra y mejorar las condiciones de seguridad.

En la presente publicación se pretende exponer los avances recientes en la tecnología de refinación electrolítica de ánodos de cobre, que son relevantes tanto para la construcción de nuevas refinerías como para la modernización y/o ampliación de refinerías existentes. El artículo no incluye el tratamiento de barras anódicas y la purificación de electrolito.

GENERALIDADES

El proceso de electrorefinación⁽³⁾ tiene como objetivo principal la producción de cátodos a partir de ánodos impuros. En el caso de la producción de cátodos de cobre éstos alcanzan una pureza generalmente mayor a 99,99% de cobre a partir de ánodos con un contenido de cobre típico de 99,5% (Esta pureza puede ser mucho menor, hasta 98%, en caso de ánodos con impurezas o metales nobles en altos contenidos).

El proceso de electrorefinación es realizado en un sistema de múltiples celdas electrolíticas en donde se ubican⁽¹⁾:

- Los ánodos de cobre
- Solución electrolítica en circulación con un contenido de cobre y ácido sulfúrico definidos y a una temperatura controlada en un estrecho margen
- Láminas iniciales o cátodos permanentes.

Los electrodos, ánodos y cátodos, se conectan eléctricamente en paralelo en las celdas. Estas a su vez se conectan en serie para formar un circuito.

La electrorefinación consiste en la aplicación de corriente continua a los electrodos contenidos en las celdas, produciendo la disolución electroquímica del cobre contenido en los ánodos y el depósito selectivo de este cobre sobre cátodos de cobre o de un metal inerte. La electrorefinación permite:

- Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre. Las principales impurezas son As, Sb, Bi, Co, Fe, Ni, Pb, Se y Te.
- Separar las impurezas valiosas del cobre: Au, Ag y metales del grupo del platino.

Además de la disolución electroquímica del cobre se produce la disolución química de una fracción del Cu_2O contenido en los ánodos por una reacción de dismutación con el H_2SO_4 presente en el electrolito, mientras que la fracción metálica restante se deposita con el barro anódico.

Esta reacción se puede representar como:



Junto con la disolución química del Cu_2O se disuelven otras impurezas presentes en los ánodos impuros. Para controlar el contenido de estas impurezas en el electrolito dentro de los rangos definidos, se hace necesario descartar una cantidad de solución conteniendo la cantidad equivalente a la masa de la impureza controlante disuelta. En el caso de ánodos nacionales la impureza controlante resulta ser en la mayor parte de los casos el arsénico o el antimonio.

El año 2004 el cobre tuvo un consumo anual de 16,77 millones de toneladas y se produjeron 15,98 millones de toneladas de cobre electrorefinado. En la Figura 1 se muestra la tendencia estimada del consumo y producción desde el año 2001 hasta el año 2008 y en la Tabla 1 los valores que se obtuvieron como resultado del benchmarking, los que dieron origen al gráfico.

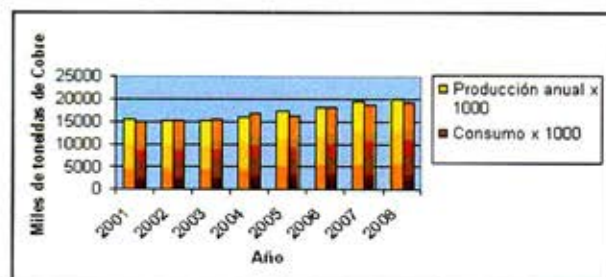


Figura 1: Producción y Consumo Mundial de Cobre Refinado

Tabla 1: Producción y Consumo Mundial de Cobre Refinado

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Producción anual x 10 ³	15.580	15.266	15.232	15.989	17.320	18.262	19.406	20.065
Crecimiento	5,56	-2,02	0	4,89	8,33	5,43	6,25	3,4
Consumo anual x 10 ³	14.893	15.139	15.614	16.775	16.437	18.065	18.682	19.279
Crecimiento	-1,51	1,65	3,14	7,77	3,95	3,60	3,41	3,20

En el mundo existen 75 refinerías de cobre en operación, de las cuales 19 se ubican en Norte y Sud América, 24 en Europa, 27 en Asia y Australia y 5 en África.

AVANCES TECNOLOGICOS EN REFINERIAS ELECTROLITICAS

Una refinería electrolítica se compone de los siguientes sistemas:

- Circuitos Hidráulicos: Encargado de la recirculación del electrolito. Pertenecen a este circuito las celdas, bombas de circulación, intercambiadores de calor de placas, filtro de finos, sistema de dosificación de aditivos y sistema de lavado de celdas.
- Circuitos Eléctricos: Provee la corriente continua. Pertenecen a este circuito el traforectificador y seccionadores—circuitadores.
- Manejo Interno de Electrodo: Encargado de realizar los movimientos y traslados de electrodos durante las cosechas.
- Sistema de Control: Se encarga del monitoreo y control de las variables asociadas a proceso.
- Sistema de Preparación de Electrodo. Acondiciona electrodos para una mejor operación y manipulación. Pertenecen a este sistema las máquinas preparadoras de ánodos, despegadoras lavadoras de cátodos y lavadoras de restos de ánodos.
- Plataforma de Automatización: Sistema recientemente implementado que integra el control del proceso con las máquinas preparadoras de electrodos y con los equipos de manejo interno de electrodos.

Los principales avances experimentados por la electrorefinación del cobre se pueden resumir en el siguiente listado:

- Aumento de la densidad de corriente
- Sistema en línea de control de proceso
- Celdas monolíticas poliméricas
- Cátodos permanentes de acero inoxidable
- Sistemas automáticos de preparación de electrodos
- Sistemas de manejo automático de electrodos
- Plataforma de Automatización

AUMENTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE

Un desarrollo importante que ha experimentado el proceso mismo de electrorefinación ha sido el aumento de la densidad de corriente⁽³⁾. En los inicios del siglo 20, entre 1900 y 1930, la densidad de corriente eléctrica fue incrementada desde 100 hasta 200 A/m². Se requirió mayor investigación para lograr un mayor entendimiento del proceso de electrólisis y optimizaciones de los parámetros de electrorefinación para poder recién a partir del año 1980 incrementar la densidad de corriente hasta 300-350 A/m². Este avance ha sido en parte debido a la incorporación de placas permanentes fabricadas en acero inoxidable, en reemplazo de las láminas iniciales, y por un mejor control de la composición química del electrolito.

Operar con una mayor densidad de corriente permite obtener mayor producción y además, tener ciclos anódicos y catódicos más cortos, lo cual disminuye el inventario de cobre en la refinería.

Los principales parámetros de significación económica en la electrorefinación son el consumo específico de energía y la eficiencia de corriente. Un buen sistema de detección y remoción de cortocircuitos incide en la eficiencia de corriente y la calidad del cátodo. La densidad de corriente se trata de mantener lo más alta posible para asegurar la capacidad de producción. Una nueva tecnología de equipos infrarrojos se utiliza para la detección de cortocircuitos en conjunto con el "gaussmeter".

Un procedimiento muy utilizado en la década de los 70, inversión de la dirección de la corriente en forma periódica, utilizada inicialmente por el aumento en la velocidad de producción del cátodo al permitir un aumento del 15% en la densidad de corriente^(3,4), ha dejado de ser utilizada por disminuir la eficiencia de corriente. Por el contrario, la tecnología de cátodos permanentes, desarrollada a fines de esa misma década, ha permitido operar a densidades de corriente mayores con una mejor eficiencia de corriente. Igualmente, contribuyen a este objetivo el mejor control de la forma, dimensiones y separación uniforme de los electrodos.

En 1995 existían 11 refinerías que aplicaban la inversión de corriente, en 1999 sólo 8 refinerías y en el año 2003 sólo cinco^(3,8).

CONTROL DE PROCESO

A medida que se aumentó la densidad de corriente todas las variables que influyen en la eficiencia de corriente se hicieron más críticas para trabajar con una mantención y operación efectivas⁽⁶⁾.

Una alta eficiencia de corriente se puede asegurar teniendo un control riguroso de los siguientes aspectos del proceso y sus materias primas:

- Calidad física y química del ánodo (peso, verticalidad, dimensiones, espesor, calidad de superficie y de las orejas)
- Calidad de la composición química del electrolito
- Calidad física del cátodo permanente o lámina inicial
- Alineamiento de los electrodos (espaciamiento uniforme, verticalidad, contactos limpios)
- Control calidad física y química del electrolito (sólidos en suspensión, aire disuelto, flujo, temperatura, impurezas contenidas, contenido de cloro, calcio)
- Detección de cortocircuitos y su monitoreo (verticalidad, nodulación)
- Adición de aditivos (control)
- Óptimas condiciones de operación de los equipos principales de proceso (preparación y manejo de electrodos y los pertenecientes al circuito hidráulico y eléctrico).

Estos parámetros no son sólo válidos de controlar para mantener una eficiencia de corriente alta (96-98%), sino que además desde el punto de vista de proceso son de gran importancia, porque tienen relación con la calidad del cátodo. Un buen control de estos parámetros asegura la calidad del cátodo.

El funcionamiento y el estado en que se encuentra el proceso de electrorefinación es difícil de monitorear⁽⁶⁾. El gran número de celdas, el gran volumen de electrolito en recirculación, el hecho de que se trata de un proceso de variables múltiples correlacionadas entre sí, con constantes de tiempo de gran duración y mecanismos de reacción complejos y en algunos aspectos aún desconocidos, hacen que las alteraciones del proceso se desarrollen lentamente y duren por largos períodos de tiempo.

Por las características antes mencionadas, no es posible mediante observaciones, mediciones gruesas y sólo discretas, tener un buen

control del proceso, debido a que se hace dificultosa, por no decir imposible, la identificación y origen preciso de cualquier alteración que ocurra en el sistema.

Normalmente, las refineras operan muy cerca de su capacidad de producción. Esto hace vulnerable el proceso con respecto a alteraciones que podrían ocasionar problemas de calidad del cátodo y disminución de la eficiencia de corriente, teniendo ambos parámetros efecto importante en el desempeño económico de la refinería.

Por lo anterior, para identificar y minimizar las alteraciones y poder tomar acciones correctivas, es necesario un monitoreo continuo y un buen control del proceso. El éxito del monitoreo y control depende del nivel de automatización e instrumentación, metodología de trabajo, métodos de supervisión, así como de disponer de una eficiente herramienta para procesar la información de proceso y de la operación monitoreada.

Normalmente en una refinería se hace un seguimiento a la composición del electrolito y del cátodo, observación visual de las condiciones físicas del cátodo y de los ánodos e identificación de los cortocircuitos entre éstos. Se controla el volumen de descarte para el control del nivel de impurezas. El control radica en mantener las variables monitoreadas dentro de un rango especificado por los criterios de diseño y realizar ajustes cuando se requiera.

Se han desarrollado nuevos métodos y conceptos para el monitoreo de las variables asociadas al proceso que sirven de base para la toma y control de decisiones, haciendo el sistema más eficiente. Siemens (Simatic PCS7) y Outokumpu (Procon 2100 lite) son empresas que han desarrollado sistemas de control que permiten monitorear las variables de proceso de interés.

El Simatic PCS7 de Siemens es un modelo de estructura modular que permite mediciones en línea y su almacenamiento en la base de datos, así como también información ingresada manualmente o vía traspaso de información mediante comunicación a través de fibra óptica, ya sea desde otra base de datos (como por ejemplo análisis químicos de laboratorio), o bien información desde otro subsistema. Entrega también gráficos de tendencias, de temperatura, composición del electrolito, flujos de agua de servicios, etc. Además, el control del proceso incorpora información del control local de los trafocorrectores y de los seccionadores cortocircuitadores.

El Simatic PCS7 puede calcular por sección parámetros como la edad del cátodo, tiempo real bajo corriente, promedio de densidad de corriente, temperatura promedio de electrolito y voltaje promedio. Las variables a monitorear y calcular se deciden entre el usuario y el diseñador. Los sistemas aceptan además datos externos ingresados manualmente o mediante comunicación por red, para que formen parte de la base de datos del sistema. El sistema de control de proceso puede ser integrado a una plataforma de automatización desde la cual se controlan y/o se realizan mediciones y/o se transfiere información desde y hacia los PLC de los equipos automáticos de movimiento de electrodos y máquinas preparadoras de electrodos.

Esta herramienta de control se ha incorporado en un proyecto EPCM el cual lidera SNC-Lavalin Chile en una importante compañía de cobre chilena.

El Procon 2100 Lite⁽⁶⁾ está estructurado en base a cuatro módulos: ánodos, celdas o sección, electrolito y cátodos. Cada uno de estos módulos entrega información, basada en mediciones standard de procesos y análisis, de manera que sea fácil analizar el estado en que se encuentra el proceso.

El desarrollo de los sistemas de control también es válido en el proceso de electroobtención de cobre.

Las principales ventajas de contar con un control automático son:

- Observación de la marcha del proceso en tiempo real, permitiendo visualizar tendencias y actuar sobre el funcionamiento de la refinera.
- Identificación de las secciones que se encuentren operando bajo el standard definido o en mala operación. Esto permite focalizar el esfuerzo de trabajo en esa sección.
- Identificación, en sus inicios, de alteraciones en el proceso.
- Permite realizar un mejor análisis del proceso, lo que redundará en un mayor conocimiento y mejor comportamiento del proceso.
- Trazabilidad del proceso

El control debe asegurar que se tengan las siguientes condiciones: una buena circulación del electrolito a lo largo de las caras de los electrodos, temperatura entre 60-65°C, alrededor de 40 gpl Cu en el electrolito, entre 180 gpl y 200 gpl de ácido sulfúrico, filtración del electrolito para asegurar a lo más 8 ppm de sólidos en el total de electrolito en circulación (las concentraciones y contenido de sólidos son características propias de cada refinera), alimentación de aditivos en solución homogénea y dosificación uniforme. La falta de dosificación de Cola y Tiourea o una dosificación deficiente produce un depósito catódico rugoso y nodular. La rugosidad del cátodo trae consecuencias negativas en la eficiencia de corriente, debido a que puede ser fuente de cortocircuitos y produce atrapamiento de electrolito y barro flotante, desmejorando la calidad química del cátodo. Estos aditivos se co-depositan en el cátodo e influyen en la morfología y cinética de crecimiento del cristal.

Para mantener una dosificación uniforme y estable en el tiempo, existen dos sistemas de control: Reatrol desarrollado por Asarco, en Amarillo, USA y Collamat desarrollado por Norddeutsche Affinerie, Alemania. El primero se utiliza para la tiourea y el segundo para la cola⁽³⁾.

Aún es mínimo el número de refineras que aplica procedimientos de monitoreo y control de aditivos, principalmente de cola, del orden del 20% de las refineras.

Las principales contaminaciones del cobre electrolítico se producen por la precipitación, arrastre u oclusión de compuestos de impurezas (barro flotante) en la superficie catódica, lo que se minimiza con el filtrado de una fracción del electrolito.

Actualmente el 63% de las refineras filtran entre el 15% y el 30% del total del electrolito. Los filtros utilizados son los filtros de finos con retrolavado (Larox ex-Scheibler, USfilter), filtros de tela aptos para gran cantidad de líquido con bajo contenido de sólidos (Figura 2).



Figura 2: Fotografía Filtro Larox y su medio filtrante.

Actualmente, algunas compañías y grupos de investigación⁽⁷⁾ están desarrollando trabajos para un posible futuro incremento de la densidad de corriente a 1000 A/m^2 . El desarrollo de la investigación ha indicado que sí es posible operar a esa densidad de corriente bajo condiciones especiales (electrodos bipolares, celdas con mayor flujo convectivo de electrolito) en electroobtención, pero no así en electrorefinación, en que estas condiciones especiales implican un alto costo de inversión y un alto costo del proceso en comparación a la tecnología y proceso existente. Los problemas de mayor relevancia en la electrorefinación de cobre a alta densidad de corriente son:

- Depósito dendrítico
- Sobrecrecimiento de los bordes
- Cortocircuitos
- Mayor concentración de impurezas en los cátodos de cobre
- Pasivación del ánodo
- Aumento del consumo específico de corriente
- Calentamiento del electrolito
- Estabilidad de los aditivos

CELDA DE ELECTROREFINACION

Desde el año 1974 se ha estado incorporando una nueva tecnología en celdas^(3,5,8). Las refineras existentes han ido reemplazado en forma paulatina las celdas construidas en: Concreto monolítico reforzado, Bloques de concreto precolado, Bloques de concreto precolado reforzado, Bloques de concreto reforzado, por nuevas celdas de concreto polimérico, las que tienen una mayor longitud, desde 3 hasta 6 metros de longitud, que una celda típica antigua y no requieren de revestimientos especiales para prevenir la corrosión (con excepción de refineras de China que han utilizado celdas de concreto revestidas en FRP).

La incorporación de las celdas de concreto polimérico al proceso de electrorefinación y electroobtención de cobre, se ha hecho más frecuente a partir de fines de los años 80 y en la década del 90, en paralelo con la implementación de la tecnología de cátodos permanentes.

Las celdas de concreto que comúnmente tienen revestimiento de polipropileno y PVC, o las revestidas en plomo, tienen fallas debido a daños mecánicos en el revestimiento, lo que ocasiona la contaminación del concreto.

Las celdas monolíticas (Figura 3), están fabricadas con un compuesto de resina éster vinílica y áridos seleccionados o capas continuas de resina éster vinílica reforzadas con mantas de fibras de vidrio. El diseño monolítico, la resistencia al ambiente corrosivo de una refinera entre otras consideraciones de diseño, permiten un requerimiento menor de mantención y mayor durabilidad. Se estima que tienen una vida útil de 15 años.

Los diseños monolíticos, varían entre los diseños patentados (CTI, Stoddart Bross, Supertank), pero en general incorporan el arreglo para la conexión a la tubería de alimentación de electrolito y la caja de rebose. De esta forma se eliminan juntas y como consecuencia requieren una menor mantención. Además, el diseño contempla protección de FRP para protección de la estructura que no provoca cortocircuitos.



Figura 3: Fotografías Celdas Monolíticas CTI-Ancor⁽²⁾

La caja de rebose permite controlar el nivel de electrolito en la celda, sin provocar alteraciones que impliquen arrastre de barro anódico. Además contribuye a la clarificación del electrolito en circulación y reduce el tratamiento posterior de filtración.

Las paredes de las celdas monolíticas poliméricas diseñadas por CTI Ancor, tienen menor espesor, lo que permite la instalación de un mayor número de celdas por área y están diseñadas para hasta 80 cátodos permanentes y hasta 81 ánodos de cobre, considerando un espaciamiento de 100 mm.

El diseño de Outokumpu⁽¹³⁾ para alimentar el electrolito a las celdas, considera dos puntos de alimentación: Una fracción de electrolito se alimenta por el lugar tradicional de alimentación y la fracción restante por el medio de la celda. De esta manera mantienen una mejor distribución de electrolito fresco y de aditivo activo en la celda.

Las refinерías nuevas y las que han realizado expansiones, han instalado celdas de concreto polimérico. Aproximadamente el 50 % de las refinерías utilizan celdas de concreto polimérico. Existe una clara tendencia a que las refinерías en expansión o en proceso de conversión hacia la tecnología de cátodos permanentes están instalando celdas de concreto polimérico⁽⁸⁾.

REACONDICIONAMIENTO DE CELDAS MONOLÍTICAS POLIMÉRICAS

Dependiendo del grado de deterioro de una celda, algunas de las reparaciones que pueden ser realizadas son:

- Cambio caja de rebose
- Reparación de fisuras
- Cambio de drenaje lateral y rebose
- Reconstrucción de barrera química
- Cambio de tapones
- Vertederos de flujo
- Aislamiento térmico
- Cambio de ladrillos base piramidales
- Cambio de ladrillos topes antisísmicos

La deformación remanente de una celda después de reacondicionada no es recuperable, lo que incidirá en el alineamiento de las celdas, alineamiento que es requisito indispensable para incorporar un sistema de manejo interno automático de electrodos.

Tanto para celdas nuevas como reacondicionadas se estima la misma vida útil de 15 años. Para las celdas reacondicionadas se debe considerar un costo adicional de mantención mensual.

En general, el costo asociado al reacondicionamiento de celdas es entre un 70% a 75% de su valor original.

El porcentaje de celdas a mantención depende de los años en operación y del manejo de electrodos durante las cosechas. Un manejo manual de electrodos (grúa manual) deteriora más frecuentemente las celdas que un manejo de electrodos automático.

TECNOLOGÍA DE CATODOS PERMANENTES

Aproximadamente 23 refinерías de cobre utilizan la tecnología de cátodos permanentes, las restantes siguen utilizando láminas iniciales.

Las ventajas principales de la tecnología de cátodos permanentes de acero inoxidable son ^(1, 2, 15):

- Mejora la calidad química del cátodo, pues el depósito liso con cátodo permanente tiene menor probabilidad de atrapar barro anódico y otras impurezas.
- Se elimina la necesidad de producir láminas iniciales de cobre y por lo tanto aumenta la productividad.
- Se pueden colgar más verticalmente y por lo tanto pueden ubicarse con un menor espaciamiento en las celdas.
- Elimina el prensado de cátodos
- Se puede operar con una mayor densidad de corriente, lo que implica un incremento de producción
- El área transversal de la barra que lo suspende puede ser mayor y permite la disminución de pérdidas de corriente.
- Mayor resistencia mecánica
- Mayor uniformidad geométrica
- Soldadura entre Acero inoxidable y Acero inoxidable
- Mayor protección contra la corrosión
- Disminuye depósito de sulfato de cobre
- Mayor resistencia al calor (resiste la deformación y degradación ocasionadas por el aumento de temperatura que provoca un cortocircuito)
- Posibilidad de reemplazar la placa dañada, repararla y reutilizarla.
- Cada cátodo tiene asignado un código de identificación que permite realizar la trazabilidad

KIDD Process y ISA Process son las principales empresas que han desarrollado la tecnología de cátodos permanentes, KIDD en Kidd Creek Refinery de Falconbridge Ltd, en Ontario, Canadá y ISA Process por Mount Isa Mines Ltd, en su refinera en Townsville, Australia. En el desarrollo de la ingeniería es una **decisión crítica** la elección de la tecnología a implementar. Esta decisión no sólo define el diseño de los cátodos permanentes, sino que además define la tecnología

de las máquinas preparadoras de electrodos y la tecnología de movimiento interno de electrodos. Se entiende por movimiento interno de electrodos todos aquellos movimientos y transporte de electrodos asociados a la cosecha en el interior del edificio de la refinera.

La barra de los cátodos Kidd es de cobre macizo, recubierta en acero inoxidable 316-L, posee baja resistencia eléctrica, resistencia al ambiente corrosivo, es fácil de reparar y tiene un bajo costo de fabricación. Ver Figura 4.



Figura 4: Corte Elevación de la Barra Conductora del Cátodo Permanente KIDD Process ⁽¹⁰⁾

En la Figura 4 se puede apreciar que en el cátodo KIDD, la placa de acero inoxidable se encuentra introducida en una ranura en la parte inferior de la barra maciza de cobre y soldada a ésta para asegurar el contacto eléctrico. La camisa de acero inoxidable que cubre la barra de cobre va soldada a la placa permanente. No tiene soldaduras entre distintos metales expuestas al electrolito. La cavidad entre la camisa y la barra de cobre está rellena con epóxico resistente al ataque químico. Posee baja pérdida de voltaje y tiene una integridad estructural mejorada. La eliminación de la corrosión del contacto eléctrico permite que el desempeño eléctrico se mantenga a lo largo de la vida del cátodo con un bajo costo de operación y de mantenimiento.

Las barras de los cátodos ISA son de acero inoxidable 316-L recubiertas con cobre electrodepositado con espesor promedio de 25 mm, lo que le da resistencia eléctrica y conductividad eléctrica. Ver Figuras 5 y 6.



Figura 5: Fotografía Cátodo Permanente ISA Process 2000 ⁽¹¹⁾

En la Figura 6 se puede apreciar la barra de acero inoxidable recubierta con cobre, la que se extiende hasta la parte inferior de la placa de acero inoxidable. De esta manera se minimiza el camino de alta resistencia eléctrica a través de la hoja de acero inoxidable. La soldadura entre placas de acero inoxidable de alta resistencia está protegida por el recubrimiento de cobre.

En sus inicios⁽¹¹⁾, el cátodo permanente ISA utilizaba cera como un agente protector del borde inferior de la placa catódica y para prolongar la vida útil del borde vertical de la lámina. Sin embargo, el uso del cátodo de tecnología KIDD, el cual no utiliza cera, remarcó las desventajas del uso de la cera y los clientes presionaron a los productores de cátodos de cobre electrorefinados para que eliminaran toda cera residual del cátodo de cobre. El uso de la cera generaba un problema de limpieza y manejo no deseado. Por este motivo, ISA desarrolló el ISA Process 2000, el que no utiliza cera y mantiene las ventajas que daba la cera a la operación de despegue de los cátodos, como es obtener dos cátodos separados del borde inferior.

Outokumpu⁽¹¹⁾ también ha desarrollado su propia tecnología de cátodos permanentes. La barra de cobre está recubierta con una camisa de acero inoxidable 316L, el cobre se encuentra descubierto solamente en el área que tiene contacto con los "busbars". Este

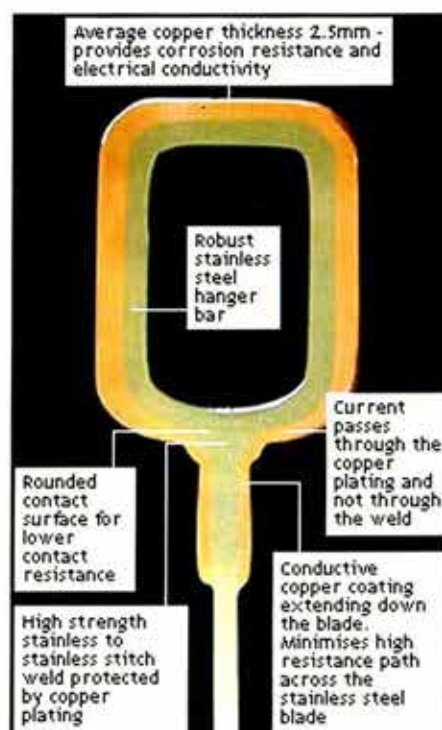


Figura 6. Corte Elevación de la Barra Conductora del Cátodo Permanente ISA Process 2000 ⁽¹⁴⁾

diseño provee resistencia mecánica, protección contra la corrosión, soldadura entre aceros inoxidables, resistencia a temperaturas altas ocasionada por los cortocircuitos y mejor inmunidad al crecimiento de cobre sulfatado. Los bordes plásticos se encuentran mecánicamente y químicamente unidos a los bordes verticales de los cátodos permanentes, lo que reduce los problemas en la operación de despegado de cátodos y minimiza el requerimiento de mantenimiento.

Otra empresa que suministra cátodos permanentes para reposición es Limpact Internacional Ltd, Ontario Canadá⁽¹²⁾. Su experiencia en soldaduras de cobre la han aplicado en la fabricación de cátodos para electrorefinación. El diseño incorpora en su fabricación, la soldadura mediante explosión ("explosion bonding" para unir o soldar metales), uniendo un tubo de acero inoxidable a la parte inferior de la barra maciza de cobre. Esto provee una unión íntima entre los dos metales distintos. Posteriormente se suelda la placa de acero inoxidable del cátodo al tubo de acero inoxidable, para producir así un cátodo que tiene soldaduras tan sólo entre metales similares, lo que permite lograr una larga vida útil en la refinera y eficiencia de corriente optimizada. Cuentan con varios diseños de bordes plásticos para proteger los bordes del cátodo. Estos cátodos ya están siendo utilizados en una refinera en Africa, otra en Estados Unidos y a modo de prueba en una refinera en Chile. En Canadá, llevan 10

años de servicios con un diseño que no tiene las mejoras del actual cátodo. Limpact fabrica además, cátodos permanentes de titanio y láminas madres para refinerías que poseen el proceso convencional de electrorrefinación de cobre, adapta o rehabilita cátodos. El costo de adaptar un cátodo, estiman que es un tercio del costo de un cátodo de acero inoxidable nuevo y un mayor ahorro en los cátodos de titanio el que depende del precio del titanio del momento. En la Figura 7 se muestra la barra típica de un cátodo permanente Limpact.



Figura 7. Fotografía de Diseño Base del Cátodo Permanente LIMPACT

En general, todos los fabricantes utilizan bordes plásticos para evitar el crecimiento de cordones de cobre alrededor de éstos, y estiman una vida útil de más de 12 años para los cátodos permanentes de acero inoxidable.

En relación al tamaño del cátodo, el mercado tiene una clara tendencia a preferir los cátodos de 1 m x 1 m. Esta preferencia se basa en los requerimientos técnicos para el óptimo manejo de los cátodos en las plantas de alambión y otras formas manufacturadas, en que se deben fundir los cátodos, principalmente en hornos verticales.

TECNOLOGÍA DE PREPARACIÓN DE ELECTRODOS

Para lograr una mejora en la productividad, una buena eficiencia de tiempo y mejorar las condiciones de seguridad, objetivos que persigue el desarrollo de la tecnología de cátodos permanentes, es necesario integrar a la refinería las tecnologías desarrolladas, asociadas a la preparación de electrodos: máquinas preparadoras

de ánodos, máquina lavadora y despegadora de cátodos, máquina lavadora de restos de ánodos y movimiento y manejo interno de electrodos: grúas automáticas y trenes de transferencia.

MÁQUINA PREPARADORA DE ANODOS

Una tecnología que complementa la tecnología de cátodos permanentes, ISA o KIDD, es la incorporación al proceso de la máquina preparadora de ánodos, aunque también éstas se han incorporado al proceso tradicional de láminas iniciales. Esta máquina posee, en general, los siguientes subsistemas. Ver las Figuras 8 y 9:

- Manipulación de lingadas
- Carga y pesaje
- Estaciones de preparación y transmisión
- Prensa de cuerpo
- Rechazo y muestreo
- Prensado de orejas
- Fresado de orejas
- Descarga
- Estación de verticalidad
- Transportadora espaciadora
- Carro de Transferencia
- Rieles de almacenamiento de lingadas de ánodos

La máquina preparadora de ánodos, que puede tener una capacidad de 500 unidades por hora, debe ser alimentada con ánodos provenientes de un mismo diseño de molde. Puede rechazar por peso y espesor de acuerdo al "set point" definido, además mide la verticalidad mediante un sistema láser y entrega un gráfico de tendencia de verticalidad para realizar la medida correctiva en la máquina cuando corresponda. Esta información, junto con las características químicas del ánodo, pueden ser almacenadas en una base de datos para realizar la trazabilidad del proceso y producto.

Esta máquina mejora la geometría de los ánodos, entrega ánodos de geometría y peso uniforme, permite mejorar la distribución de corriente y en conjunto con la mejor geometría de los cátodos permanentes permite un menor espaciado entre electrodos, lo que se traduce en mayor número de electrodos por celda y por ende mayor productividad por celda.



Figura 8. Máquina Preparadora de Anodos Aisco (tipo carrusel), alimentación de ánodos horizontal o vertical.

Actualmente un 60% de las refinерías poseen máquinas preparadoras de ánodos, aunque no todas cuentan con las estaciones principales de pesaje, prensa de cuerpo y fresado de orejas.

En general las refinерías que operan con láminas iniciales y cuentan con máquina preparadora de ánodos mejoran su eficiencia de corriente.

Al disminuir el espaciamiento entre electrodos sin contar con máquina preparadora de ánodos, aumentan los cortocircuitos y por ende disminuye la eficiencia de corriente.

La ingeniería debe contemplar, para asegurar la continuidad de la operación de la máquina preparadora de ánodos, y por lo tanto la continuidad del desarrollo de la operación de las cosechas, el almacenamiento diario de unidades de ánodos requeridos para el requerimiento máximo horario y los días de almacenamiento como respaldo a una eventual disminución de suministro de ánodos. Además, debe contemplar en el layout el área necesaria que facilite el movimiento de grúas-horquilla bajo condiciones de operación normal y eventuales mantenciones correctivas.

Las empresas que han desarrollado la tecnología de las máquinas preparadoras de ánodos son Outokumpu – Aisco de Canadá, Outokumpu –Wenmec de Suecia y Mesco Inc. de Japón.

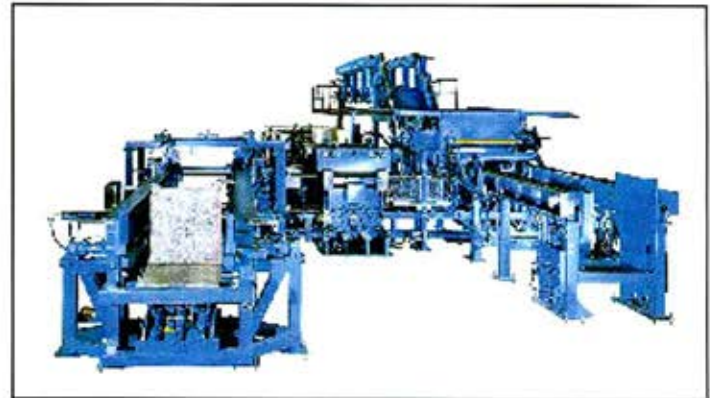


Figura 9. Máquina Preparadora de Anodos Outokumpu.

MÁQUINAS DESPEGADORAS - LAVADORAS DE CÁTODOS

El 35% de las refinерías cuentan con máquinas despegadoras - lavadoras de cátodos. Las empresas que han desarrollado esta tecnología son Mesco Inc. de Japón, Falconbridge de Canadá, Wenmec - Outokumpu y es válida tanto para el proceso de electrorefinación como para electroobtención. En general, la máquina Wenmec entrega los cátodos, producidos por un mismo cátodo permanente, separados, por lo que pueden ser ordenados en el paquete con la misma cara hacia un mismo lado, mientras que la tecnología Kidd entrega ambos cátodos unidos en la parte inferior, por lo que en el paquete quedan las mismas caras una frente a la otra.

El propósito principal de las máquinas lavadoras - despegadoras de cátodos es, como su nombre lo indica, lavar los cátodos para retirar restos de electrolito y restos de barro anódico, luego separar las láminas de cátodos de cobre del cátodo permanente, inspeccionar, rechazar los que estén fuera del estándar, apilar y empaquetar los cátodos. Además, prepara los cátodos permanentes para retornarlos al proceso, en caso que no hayan sido rechazados para mantención (falta de bordes por ejemplo).

Una máquina lavadora despegadora de cátodos cuenta con los siguientes subsistemas:

- Rieles y Racks de Almacenamiento y Carro de transferencia
- Transportadora de lavado y cámara de lavado



Figura 10. Máquina Lavadora - Despegadora de Cátodos KIDD

- Estructura en donde se ubican las estaciones de despegado y pesado, pueden ser tipo carrusel o línea. (El diseño de Outokumpu es lineal, Falconbridge posee ambos diseños)
- Apilamiento de cobre, enzunchado, etiquetado y manipulación de paquetes
- Sistema hidráulico/neumático
- Sistema de control eléctrico

La máquina puede rechazar por peso del paquete o por altura de paquete. Esta operación, sumada a la incorporación de la tecnología de cátodos permanentes y máquina preparadora de ánodos, implica producir cátodos geoméricamente más uniformes.

Además, la máquina lavadora despegadora de cátodos permite codificar cada paquete. El código permite realizar la trazabilidad del producto durante el proceso, como por ejemplo, se puede llegar a determinar la calidad del ánodo que generó el cátodo, celda de procedencia, densidad de corriente durante el ciclo de proceso, composición del electrolito entre otros.

Dependiendo de los requerimientos del cliente las máquinas lavadoras - despegadoras de cátodos pueden entregar paquetes de cátodos lisos, corrugados, remachados, o paquetes de cátodos mixtos.

El rango de capacidad está entre 60 y 650 unidades por hora.

La capacidad para la máquina lavadora despegadora de cátodos de diseño lineal Outokumpu es de hasta 600 cátodos por hora⁽¹¹⁾.

Falconbridge ha estado realizando un mejoramiento continuo del diseño de la máquina lavadora despegadora desde el año 1986(2), para lo cual han analizado ambos diseños, el tipo carrusel y el lineal. Las máquinas lineales tienen algunas ventajas sobre el diseño de carrusel, son más compactas, menos complejas y tienen un menor costo de instalación. La mayor desventaja del diseño lineal, era su menor capacidad. Producto de este análisis surgió un nuevo diseño, la "máquina lineal de alta capacidad" (máquina robotizada), en la que se mejoran las deficiencias encontradas, se incorpora lo mejor de ambos diseños y se mantienen las ventajas operacionales de ambas. Estas máquinas fueron adquiridas por LG Nikko.

El sistema de lavado de cátodos está compuesto por la máquina lavadora - despegadora de cátodos propiamente tal (Figura 10), un intercambiador de calor de placas, bombas de impulsión de agua y lavador de gases.

Para el lavado se requiere agua de buena calidad, vapor para la calefacción del agua de lavado y aire de planta para el lavado final mediante spray.

MÁQUINAS LAVADORAS DE RESTO DE ANODOS

El propósito de las máquinas lavadoras de restos de ánodos es recibir los ánodos, recuperar barro anódico lavándolos y generar un paquete para ser retirado por una grúa horquilla.

Si la refinera cuenta con máquina preparadora de ánodos, se generan restos de ánodos con una geometría y peso más uniforme.

Los restos de ánodos pasan por una cámara de lavado en contracorriente, de tres etapas, que elimina el barro anódico impregnado, luego de lo cual los restos de ánodos pueden ser apilados en paquetes. Las máquinas tienen una capacidad para 700 unidades por hora.

El Sistema de Lavado de Restos de Anodos incluye los siguientes grupos de equipos:

- Rieles de Almacenamiento de restos de ánodos
- Carro de transferencia
- Transportadora de Carga
- Cámara de Lavado
- Izador de Lavado de restos de ánodos
- Sistema de Cañerías del Proceso de Lavado
- Clarificador
- Estación de Descarga
- Rueda de Transferencia
- Transferencia Horizontal
- Estación de Apilamiento y Pesaje
- Transportador de Paquetes
- Unidad de Potencia hidráulica
- Sistema de Control Eléctrico

Para casos eventuales

- Las cargas de ánodos semicorroídas pueden ser procesadas por la máquina, pero a una menor velocidad de procesamiento.
- El sistema puede procesar el evento de un ánodo completo con un peso máximo definido por el criterio de diseño.

Outokumpu cuenta con tres tipos de máquinas lavadoras de restos de ánodos: tipo "túnel", tipo "L" y la de "múltiples etapas" para instalaciones de mayor capacidad.

El sistema de lavado de restos de ánodos está compuesto por la máquina lavadora de restos de ánodos propiamente tal, intercambiador de calor de placas, lavador de gases y filtro de finos para recuperar el barro anódico.

Los servicios que requiere son: vapor para calefaccionar el agua,

agua que puede ser proveniente de otro proceso, como por ejemplo desde el lavado de cátodos, y aire de planta.

La utilización de la máquina lavadora de restos de ánodos permite: una operación totalmente automatizada, obtener un mejor y eficiente lavado de los restos de ánodos, la recirculación de agua minimiza el consumo, una operación con óptimo standard de seguridad y control.

El número de máquinas preparadoras de ánodos, lavadoras despegadoras de cátodos y lavadoras de restos de ánodos que se requiere depende de la producción horaria máxima, velocidad de procesamiento de cada máquina en particular, eficiencia de tiempo de cada una de éstas y horas efectivas de operación diaria.

Las máquinas de preparación de electrodos son automáticas y por lo tanto en la etapa de ingeniería deben definirse procedimientos adecuados de seguridad a las personas.

Así como para la máquina preparadora de ánodos debe definirse la capacidad de almacenamiento óptimo necesario de ánodos de tal manera de asegurar la continuidad en las operaciones, para las máquinas lavadoras de restos de ánodos y máquinas despegadoras- lavadoras de cátodos, debe asegurarse un retiro expedito de los electrodos y el retorno de los cátodos permanentes al proceso.

Todas las máquinas de preparación de electrodos pueden ser incorporadas a una plataforma de automatización.

MANEJO INTERNO DE ELECTRODOS

Los equipos que conforman el manejo interno de electrodos forman parte integral de una refinera que opera automáticamente. Los puentes-grúa automáticos pueden levantar ánodos y cátodos en forma simultánea desde una misma celda, o levantar un tipo de electrodo desde dos celdas contiguas, o un tipo en una de las celdas y otro tipo en la celda adyacente. Los puentes-grúa automáticos poseen un sistema de localización, método que debe ser de mucha precisión, para que le permita posicionarse sobre las celdas para cargar o descargar electrodos. Durante la cosecha las grúas operan en modo semiautomático, por seguridad de las personas que se encuentran en el área de la cosecha. La operación de la grúa propiamente tal es rápida y exacta, lo que se traduce en menor tiempo de cosecha y por lo tanto contribuye al aumento de la eficiencia de corriente.



Figura 11: Puente Grúa Femont ("Bay Carrier") portando el riel para el "carro porta lingada" en el extremo derecho



Figura 12: Puente Grúa Femont portando en el riel el "carro porta lingada" con una lingada de ánodos y una lingada de cátodos permanentes.

En refinерías en las que movimientos semiautomáticos deben combinarse con operaciones manuales, como por ejemplo el desborde de celdas, hay que considerar el tiempo que los operadores requieren para realizar el desborde, limpieza de celdas y desplazamiento a lugar de seguridad, de tal forma que los operadores puedan realizar estas tareas entre los viajes de ida y vuelta de la grúa a las celdas. Cabe destacar que Outokumpu tiene en desarrollo un sistema automático de desborde de celdas, lo que podría simplificar la interacción entre las grúas automáticas y las operaciones de desborde.

Las empresas que han desarrollado esta tecnología son Femont y Kunz,

El diseño del sistema de manejo de electrodos Femont ⁽¹⁵⁾ posee una grúa totalmente automatizada la que es dirigida y controlada mediante un "joystick", comandada por un encargado especialista.

El diseño de la grúa contempla:

b) Un puente de estructura muy simple (" Bay Carrier"). Tiene dos tipos de movimientos: desplazamiento longitudinal en toda la

nave y desplazamiento transversal del "carro porta lingadas". Ver (Figura 11)

a) Una estructura móvil independiente, "carro porta lingadas", la que consiste en un riel para el soporte del "carro porta lingadas" ("Automatic Guide Carrier") el que incluye los juegos de gancho para portar la(s) lingada(s) de electrodos. Ver (Figura 12)

c) Método de localización y posicionamiento por laser

En conjunto con las grúas automáticas operan "trenes de transferencia automáticos" ("Transfer Carrier") (Figura 13) que reciben las lingadas de cátodos y restos de ánodos para transportarlos hasta la máquina respectiva de preparación de electrodos, o bien transporta carga de ánodos y cátodos permanentes desde las máquinas preparadoras y se los traspasa a la grúa automática para que ésta lo traslade a la(s) celda(s) en cosecha. Dependiendo del requerimiento y del diseño de los movimientos de traslado de lingadas, el carro puede ser simple, el que tiene capacidad para recibir una sola lingada de electrodos, o doble con una capacidad para recibir dos lingadas de electrodos.



Figura 13. Puente Grúa Femont portando el "carro porta lingada" en el extremo izquierdo. En Vía de Transferencia se ubica el "tren de transferencia doble"

Un requisito indispensable es que el manejo de electrodos con equipos automáticos, requiere de un alto grado de precisión en el posicionamiento de los equipos en las celdas y en los lugares de intercambio de las lingadas con el tren de transferencia, así como de éstos con las respectivas máquinas preparadoras, además de una buena coordinación y administración de los movimientos de los diferentes equipos y de los viajes involucrados desde y hacia las celdas.

La planificación de los movimientos de las grúas al operar en combinación con tareas manuales de limpieza de celdas, contempla sólo la operación automática cuando se encuentra fuera del área de seguridad para los operadores que realizan estas labores. En el interior de la zona de seguridad, el operador especialista autoriza el movimiento semi - automático de la grúa hacia y desde las celdas en cosecha.

En el caso de las grúas Kunz, el operador se ubica en una cabina adosada al puente-grúa mismo y posee un sistema de localización y de posicionamiento de forma piramidal, instalado y fijo en los vértices superiores de las celdas, para lograr precisión en el alineamiento de los electrodos. Ver Figura 14.

Con un sistema de grúas automáticas debe fortalecerse, de forma racional, las medidas de seguridad para el tránsito de personas, principalmente al sector en cosecha, en conjunto con un mayor compromiso personal de respetar las reglas de seguridad pertinentes.

La decisión de elección de tecnología y diseño debe tener en cuenta el sistema de cosecha, celdas continuas o celdas individuales, tipos de electrodos a cargar, de un solo tipo o tipos diferentes, mantenciones programadas y mantenciones para fallas típicas eventuales. Además, el diseño debe contemplar elementos auxiliares para realizar tareas de rutina no asociadas directamente con las cosechas. También, en el caso de refineras existentes, es de importancia tener en consideración el análisis estructural del edificio, alineamiento y luz que requeriría el puente-grúa, entre otros.

Normalmente, las tareas manuales relacionadas con una cosecha total y cosecha parcial están estandarizadas, siendo de importancia contar con un listado de cada una de estas tareas y de un estudio de tiempos asociado, para diseñar el manejo integral de movimiento de electrodos de tal manera de que éste se realice dentro de los tiempos disponibles.



Figura 14: Punte Grúa Kunz totalmente automatizada.

INTEGRACIÓN DE LOS EQUIPOS AUTOMATICOS (13, 15, 16)

Para aprovechar al máximo todas las ventajas de la tecnología de cátodos permanentes se debe considerar una planta completamente automatizada.

Al incorporar en una Planta existente o bien al diseñar una nueva refinera con la tecnología de cátodos permanentes y toda la tecnología asociada, como las máquinas automáticas preparadoras de electrodos (ánodos, restos de ánodos, cátodos y cátodos permanentes), manejo automático de electrodos y monitoreo y control del proceso, ello implica tener un alto grado de automatización. Este alto grado de automatización requiere necesariamente diseñar una plataforma de automatización que integre todos los sistemas automatizados, de tal manera de poder controlarlos y coordinarlos bajo la administración de un sistema experto con reglas claramente definidas.

Cabe destacar que con este nuevo concepto que se ha desarrollado, de integrar todos los componentes del sistema y el control de procesos en una plataforma de automatización, se logra introducir y asegurar la trazabilidad total, lo que permite la mejora continua de la operación, de su productividad y de la calidad del cátodo.

Dos empresas de ingeniería han aplicado, en conjunto, este nuevo concepto de plataforma de automatización para obtener el máximo de beneficios del proceso de cátodos permanentes, en una refinera instalada en Chile.

En la plataforma de automatización el elemento principal es el sistema experto, a través del cual se planifica la operación, se coordinan los movimientos de los otros componentes (manejo y tratamiento de electrodos), se definen opciones operacionales en el caso de falla, lo que permite asegurar la trazabilidad total. Es a través de esta plataforma que todos los componentes se comunican entre sí según los protocolos definidos por la plataforma.

El sistema experto contiene:

- El módulo "Planificador", que tiene interfases con el responsable de la planificación.
- El Coordinador.

El "Planificador" es un módulo que permite elaborar de manera preventiva el programa de las renovaciones a realizar, tomando en cuenta varios parámetros (edad de los electrodos, exigencias de producción, planificación de las tareas de mantenimiento).

Una vez aprobado el programa por el usuario, el Planificador lo manda al Sistema de Coordinación, que coordina los movimientos de los equipos del manejo interno de electrodos para ejecutar el programa.

En resumen, el Planificador permite la elaboración de una planificación global y el Sistema de Coordinación se encarga de su ejecución.

Para completar el sistema se puede agregar un programa de simulación, el que puede simular el efecto en el tiempo de la ocurrencia de un nuevo evento, un cambio en la planificación o en las reglas de operación. También es una ayuda para optimizar la planificación y programación del sistema experto. Además, es útil para la capacitación de los operadores, tanto en la puesta en marcha como durante la operación en régimen.

La plataforma de automatización se compone básicamente de dos subsistemas:

- Un sistema dedicado al manejo y movimiento de electrodos dentro de la refinera. Este contiene el sistema experto, un sistema para el monitoreo y control de las variables relacionadas con el manejo de los electrodos (equipos y máquinas) y una base de datos de trazabilidad de los electrodos dentro de la refinera.
- Un sistema dedicado al control de procesos para el control de las variables relacionadas con la circulación del electrolito por los diferentes circuitos y celdas, y los circuitos eléctricos asociados.

Estos dos subsistemas se conectan entre sí y a los PLCs respectivos mediante anillos construidos con tecnología de fibra óptica.

La configuración de la plataforma está organizada en tres niveles: supervisión, coordinación y ejecución.

En el nivel de ejecución se ubican los controladores de los equipos de manejo interno de electrodos y preparación de electrodos. Estos controladores se pueden comunicar entre sí y con el nivel de coordinación mediante la red industrial y si es necesario mediante señales. El nivel de coordinación lo compone el sistema experto y los controladores utilizados para la comunicación con el nivel de ejecución mediante la red de usuarios. Este nivel está conectado al nivel de supervisión para la comunicación con el sistema de control de proceso y la base de datos. El nivel de supervisión tiene la visión de todas las instalaciones. En la figura siguiente se indican esquemáticamente los diferentes niveles que conforman la plataforma de automatización.

Todos los beneficios esperados al implementar la tecnología de cátodos permanentes no se pueden lograr al aplicar sólo en forma parcial la automatización, lo que incide en lo siguiente:

- No se optimiza la producción
- La posición de los electrodos en la celda no se optimiza
- La coordinación entre todos los elementos que conforman el proceso y la operación de electrorefinación es incierta, lo que provoca un bajo rendimiento y puede poner en riesgo a las personas u ocasionar daños en los equipos
- Al ocurrir un evento no hay adaptación automática del programa de operación, por lo que se debe reprogramar en forma manual, con la consiguiente pérdida de tiempo y de productividad.
- No es posible implementar la trazabilidad del proceso y del producto.
- No es posible realizar mejoramiento continuo.

Este alto grado de automatización obliga a tener políticas de mantención fuertemente orientadas a una mantención de tipo preventiva y cumplir cabalmente con los programas entregados por los fabricantes. Fallas eventuales de tipo correctivas disminuyen la eficiencia de tiempo, no solo de las máquinas y equipos en forma individual si no que del proceso y de la operación en su totalidad.

Para una eficiente implementación de estas nuevas tecnologías, la capacitación de los ingenieros y operadores es fundamental, tanto para una refinera nueva como para la que realiza una modernización. Los involucrados deben estar abiertos y positivos frente a un cambio de nuevas formas de hacer las cosas. En la capacitación debe involucrarse a usuarios, proveedores e ingenieros que tuvieron participación en la ingeniería.

Las tecnologías desarrolladas en relación al manejo automático de electrodos y plataforma de automatización, también son válidas para el proceso de electroobtención.

DESBORRE DE CELDAS

Outokumpu⁽³⁾ ha desarrollado una máquina automática de limpieza de celdas, la que es transportada con una puente auxiliar la que se posiciona en la celda a limpiar. El diseño de la celda de concreto polimérico debe considerar los elementos necesarios para operar con el sistema automático de limpieza de celda. Esta máquina está siendo evaluada a nivel industrial en la refinera de cobre en Pori. Ver Figura 15.



Figura 15. Sistema de Desborre de Celdas.

BARRAS INTERCELDAS

De las barras interceldas existentes se puede mencionar las de AZSA de Asturiana de Zinc SA- España (Figura 16) y la más desarrollada recientemente por Outokumpu, barra intercelda de doble contacto. (Figura 17).⁽¹⁷⁾

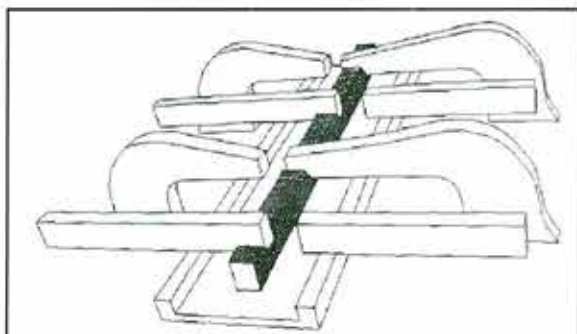


Figura 16. Sistema de Barras Interceldas de AZSA de Asturiana de Zinc.



Figura 17. Sistema de Barras Interceldas de doble contacto Outokumpu. En la Planta de demostración.

El diseño de la barra intercelda AZSA se basa en la configuración Walker. La barra intercelda posee ranuras uniformemente distribuidas, en donde se posicionan los electrodos, permitiendo dos puntos eléctricos por electrodo. De esta manera se logra una mejor distribución de corriente y se reducen las pérdidas de corriente. Además, el diseño permite lograr un buen posicionamiento de los electrodos.

La barra de doble contacto Outokumpu, fue patentada primero en Finlandia en el año 1998 y luego en el año 2002 en estados Unidos. El diseño se basa en la configuración Walter. Analizaron todas las desventajas de las barras convencionales, la "dogbone" y la triangular, y en su diseño contemplaron mejoras para disminuir esas desventajas.

El desarrollo del proyecto debe contemplar, pruebas a nivel piloto para comparar: eficiencia de corriente, el consumo específico de corriente y distribución de corriente.

MODELACIÓN PROCESO DE ELECTROREFINACIÓN

El modelo para la simulación del proceso de electrorefinación de cobre ha sido diseñado utilizando el software Metsim 11.07. El diseño es de tipo modular y tiene como estructura el balance de masa y energía en las áreas de:

- a) Celdas comerciales
- b) Descubrición
- c) Planta de Barros anódicos
- d) Área máquinas (sólo para efecto de consumo de agua, vapor, condensado)

CONCLUSIONES

En los últimos 10 años, las electrorefinerías han experimentado una modernización importante aplicando las nuevas tecnologías asociadas a esta área: celdas poliméricas, cátodos permanentes y toda la automatización asociada: control de proceso, tratamiento de electrodos y manejo automático de electrodos.

En cada uno de los temas mencionados se dispone en el mercado de alternativas en cuanto a tecnologías y equipos, que presentan ventajas relativas, sin haber una predominancia completa de algunas de ellas. Por ello es importante el análisis comparativo a profundidad en cada caso, para evaluar adecuadamente que equipos y procesos se adaptan mejor a las condiciones particulares del proyecto en estudio.

En todo caso, las tendencias más identificables son: la tecnología de cátodos permanentes, que podría considerarse desplazará a la convencional en cualquier nuevo proyecto, como también una creciente automatización y mecanización del manejo de electrodos.

Estas tecnologías están consideradas dentro del diseño estándar de las nuevas refinerías.

Este artículo fue elaborado por Jane Standen y Carlos Cuadra. Jane Standen es ingeniero civil químico, actualmente se desempeña como ingeniero de Process Senior en Aker Kvaerner Chile y anteriormente trabajó en SNC-Lavalin Chile. Carlos Cuadra es ingeniero civil metalurgista, gerente de Procesos de SNC Lavalin Chile.

REFERENCIAS

- 1.- The Isa Process and Its Contribution to Electrolytic Copper. Rautomed Conference, Scotland UK.august 1999, Wayne Armstrong, Copper Refineries.
- 2.- Falconbridge's Kidd Copper Refinery-Birthplace of the Kidd Process: An Update on the Refinery, and Latest Developments in the Kidd Process. P.E Donalson and J.J Detulleo, Kidd Thecnology Marketing, Falconbridge Limited, Kidd Metallurgical Division.
- 3.- Electrolytic Copper Refining-2003 World Tankhouse Operating Data, IV edición
- 4.- El Cobre Metalúrgica Extractiva, A.K. Biswas, W.G. Davenport, I Edición
- 5.- Extractive Metallurgy of Copper, Fourth Edition, W.G Davenport, M.King, M.Schlesinger, A.K Biswas
- 6.- Taking a Refinery to Control: New Techniques for Monitoring and Control of Copper Refinery. A. Rantala, Outokumpu Technology Oy, Automation, H. Virtanen and M. korpi, Outokumpu Research Oy.
- 7.- Investigations of Copper Electrorefining al High Current densities. M. Stelter and H. Bombach, TV Bergakademie Freiberg, Institutfur NE-Metalurgie und Reinststoffe.
- 8.- Electrolytic Copper Refining. World and 2001 CIS Tank House, Operating Data. CTI Ancor and University of Arizona.
- 9.- Virginia Fefferman. NI Development Institute
- 10.- Kidd Process High Perfomance (HP) Cathode. Marketing and Engineering. EPCM Services Ltda.
- 11.- Outokumpu: Technologies for Copper Electrorefining.
- 12.- Limpact International Ltd. Impact Bonding. Copper Refinery Products
- 13.- Advanced Tankhouse Systems by Outokumpu. T. Martilla and L. Palmu. Outokumpu Technology, Hidrometallurgy. H. Virtanen. Outokumpu Research
- 14.- ISA Process Stainkless Steel Technology website
- 15.- Modernization Proyects-Chuquicamata Copper Refinery. División Codelco Norte-Codelco, Chile. F. Coddou and J. Guzmán. Copper Refinery of Codelco Norte, Chile.
- 16.- Automation Plataform- Applications in Electrorefining and Future Developments. I.Brodeur, P. Guillaume and J.P. Youcken, Paul Wurth S.A.
- 17.- Perfomance of Intercell Bars for Electrolytic Applications: A Critical Evaluation. G.A Vidal, E.P Wiechmann, and A.J Pagliero, University of Concepción.

ACEROS RESISTENTES A LA CORROSION ATMOSFERICA

Konstantin Sipos y Nelson Burgos
Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.



RESUMEN

La Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., en el contexto de servir a las necesidades de acero del país, en particular a los requerimientos de acero resistente a la corrosión atmosférica para puentes y estructuras produce el acero CORCAP. Se hace un recuento de las propiedades mecánicas y de su comportamiento frente a la corrosión atmosférica, revisando los fenómenos químico-metalúrgicos involucrados.

INTRODUCCION

La Corrosión es un tema que ha sido tocado reiteradamente en la revista "Remetallica" del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la USACH. El número de Diciembre consagra un artículo al ensayo de niebla indicando que los metales se degradan inexorablemente con el tiempo debido a la corrosión.

Sin embargo estos fenómenos se combaten protegiendo el material de las más diversas formas: mediante revestimientos como cromados, zinc-aluminizados, galvanizados, niquelados, y de pinturas especiales, o vía composición química, como en el caso de los aceros autopatinables y los aceros inoxidables.

El uso de aceros autopatinables es una de las soluciones a las que se recurre a menudo por su gran versatilidad y fácil aplicación, especialmente en estructuras cuyo tonelaje lo hace económicamente recomendable: vigas en edificios y en puentes. Ejemplos hay muchos, como el edificio de la UNCTAD (actual edificio Diego Portales) y el Puente del Bicentenario del Canal de Chacao, en cuyas especificaciones se establece el uso de acero autopatinable.

PRODUCCION

Los aceros autopatinables estructurales son en general aceros de baja aleación, con adición de Cromo, Níquel y Cobre, aleantes que le confieren altas características mecánicas, con características estructurales de alta resistencia, y muy buena ductilidad.

Estos mismos aleantes, en particular el cobre y el cromo, le dan características especiales de resistencia a la corrosión atmosférica.

La producción de este tipo de aceros en acería de convertidores en la Compañía Siderúrgica Huachipato, bajo el nombre de COR-CAP, entrega un acero líquido bajo en residuales perjudiciales y bajo en contenido de Hidrógeno. Su preparación en los hornos de cuchara con burbujeo de argón y estrictos controles de temperatura permiten augurar una buena colabilidad del acero.

RESISTENCIA A LA CORROSION ATMOSFERICA

Mientras los aceros al carbono desarrollan capas de óxido que se desprenden con facilidad, los aceros "autopatinables" desarrollan en la zona cercana al metal, una capa de óxido densa y adherente que limita el avance de la corrosión. Esta habilidad de la capa de óxido depende de su composición química y del tipo de óxido presente.

Los Oxyhidróxidos FeOOH

En el caso de los aceros autopatinables, esta característica se desarrolla en la medida que su superficie se somete alternativamente a estados de humedad y secado, debido a las condiciones atmosféricas de períodos de lluvia y de sol. El agua presente en la superficie genera la presencia de oxyhidróxidos de fierro del tipo FeOOH. (1)

La Lepidocrocita u oxyhidróxido γ -FeOOH es la que se forma primero, y que gracias al ciclaje húmedo-seco se convierte en forma paulatina a su forma mas estable, la goethita o α -FeOOH, tal como se ilustra en figura 1.

La diferencia entre estos dos productos de la corrosión es que mientras la primera, el oxyhidróxido γ -FeOOH se presenta como una serie de estructuras octaédricas planas unidas entre sí solo por hidrógenos, mientras que la segunda, el oxyhidróxido α -FeOOH presenta una estructura de octaedros unidos entre sí en forma mas compacta.

La microestructura de la goethita depende también de la composición química, las adiciones de Cromo promoviendo una fase redondeada de dimensiones de algunos nano-metros. Esta presencia como una fase nanoestructural permite una densidad que favorece la impermeabilidad y con ello el avance de la corrosión.

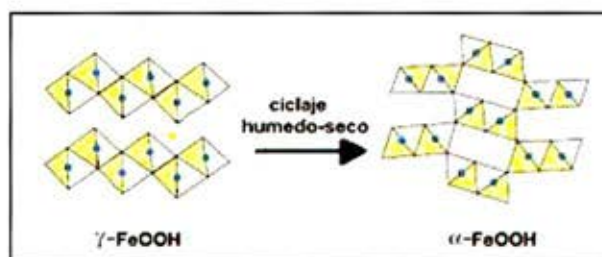


Figura 1: Oxyhidróxidos de Fierro

La adición de Níquel contemplada en la composición química de este acero permite superar eventuales problemas de fragilidad en caliente que pudieran surgir debido a la presencia de la adición de cobre.

De esta manera al mirar al microscopio un corte de los aceros autopatinables encontramos la presencia de dos capas de óxido diferentes, figura 2.

La capa de productos de oxidación mas cercana al acero es oscura a la luz polarizada, es fuertemente adherente, formada por goethita, mientras que la capa externa es más clara y rojiza, formada principalmente por una capa de lepidocrocita.

Un análisis químico vía EDS muestra que la capa oscura es rica en Cobre y Fósforo, y la capa clara en Cromo.

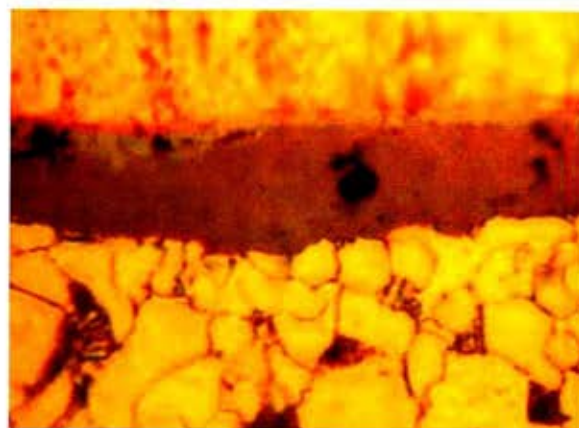


Figura 2: Las dos capas de productos de oxidación

La presencia de sal en la atmósfera impide la formación de la goethita, el ion Cloro participa como elemento central en la formación de estructuras de octaedros con un túnel central, tal como se ilustra en la figura 3. Este estado alotrópico del oxyhidróxido de Fe es la β -FeOOH, llamada akaganeita, y requiere una alta concentración de Cloro para su formación. Este compuesto colapsa con cierta facilidad, por lo que no presenta propiedades especiales contra la corrosión para el acero base.

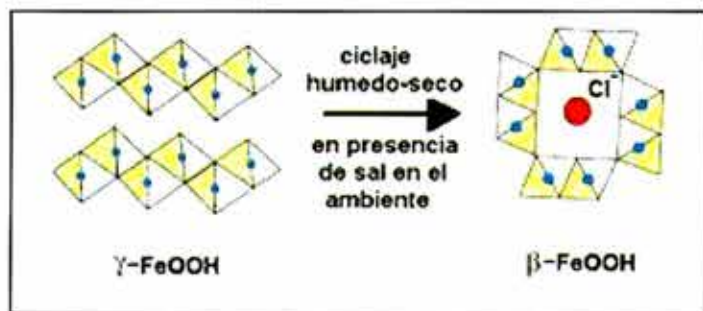


Figura 3: Oxyhidróxidos de Hierro en presencia de Ion Cloro

Aunque se menciona poco en la literatura sobre los aceros autopatinables, la basicidad del medio acuoso también juega un rol importante.

Adherencia de la capa de óxidos

Las capas de óxidos presentes en los aceros autopatinables tienen una buena adherencia al acero base, lo que no es el caso para los aceros estructurales, donde los óxidos se desprenden con facilidad.

La figura 4 ilustra un acero al carbono fuertemente oxidado en una cámara de niebla, mostrando capas de óxido de características frágiles y que presentan innumerables grietas. Estas capas se desprenden con cierta facilidad por cualesquier exigencia mecánica. Después de lavar la plancha en forma enérgica los óxidos se han desprendido en su mayor parte, presentando así una cara abierta para una nueva oxidación.

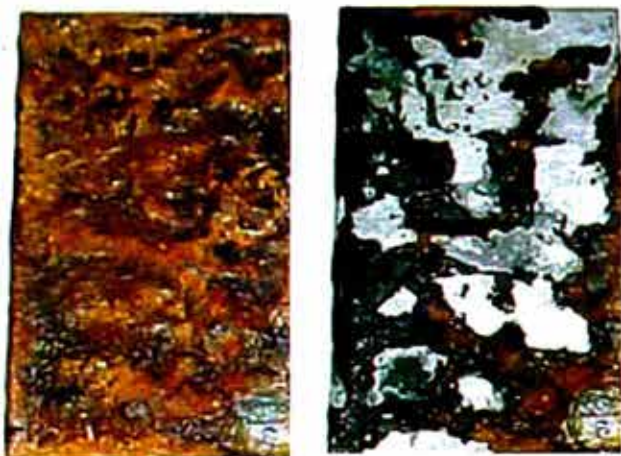


Figura 4: Acero estructural: superficie oxidada antes y después de lavado

Por otra parte los aceros autopatinables presentan una superficie oxidada mas firme, de manera que al ser sometido a exigencias mecánicas se desprende solo la capa externa de óxido, mientras que

la capa oscura interna se mantiene en su lugar.

Las fotografías de la figura 5 muestran el acero autopatinable, el que después de un lavado enérgico mantiene una capa de óxido oscuro que no se desprende, protegiendo así el metal base de una nueva oxidación superficial.

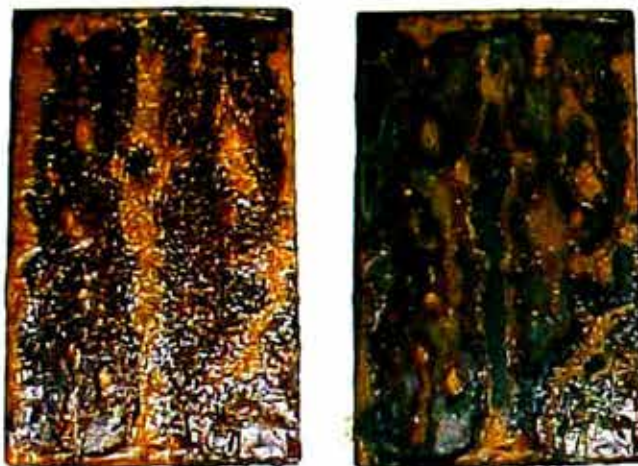


Figura 5: Acero COR-CAP: superficie oxidada antes y después de lavado

Los elementos de aleación

La influencia de los elementos de aleación es importante para mejorar la resistencia a la corrosión atmosférica, destacando el Cobre, el Fósforo, el Níquel, el Silicio, y el Cromo, tal como lo señala la norma ASTM G 101, que indica un cálculo de un índice que ilustra el efecto. La fórmula de la norma ASTM se muestra a continuación:

$$I = 26.01 (\%Cu) + 3.88 (\%Ni) \\ + 1.20 (\%Cr) + 1.49 (\%Si) \\ + 17.28 (\%P) - 7.29 (\%Cu)(\%Ni) \\ - 9.10 (\%Ni)(\%P) - 33.39 (\%Cu)^2$$

Los aceros autopatinables deben tener por norma un índice de resistencia a la corrosión superior a 6.1.

El Cobre y el Fósforo (2) se enriquecen en el óxido superficial que protege al acero de una oxidación adicional.

El Cromo (1) (2) es el elemento de aleación mas estudiado en su influencia de la formación de una fase nano-métrica de goetita. Las teorías indican la semejanza de los oxyhidróxidos de Cromo, tipo CrOOH , con los oxyhidróxidos de Hierro, con el Cromo

ocupando lugares diferentes al del Hierro en el FeOOH. La presencia de Cromo actuaría modificando la nucleación de oxyhidróxidos en la fase acuosa de la etapa húmeda del ciclo húmedo-seco, afectando la morfología de la goetita. La presencia de Cromo en un ambiente salino se considera detrimental porque baja el pH de la superficie de acero.

El Níquel (3)(4), es otro de los elementos mas interesantes en lo que se refiere al estudio de la mejora de la corrosión en los aceros autopatinables, en lo que se refiere a la corrosión en ambiente salino. El níquel tiene la propiedad de inhibir la permeabilidad de los iones Cloro hacia la capa de óxidos que se encuentra en contacto con el acero.

El Molibdeno (4) también juega un papel importante restringiendo la permeabilidad de los iones Cloro por transmisión selectiva de iones MoO_4^{2-} .

PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de los aceros autopatinables son, gracias a los elementos microaleantes introducidos, extraordinarias.

Sus propiedades mecánicas cumplen ampliamente las exigidas para un acero estructural A52-34 ES, presentando estos aceros valores típicos de fluencia de 400 MPa, una resistencia mecánica típica sobre los 560 MPa, con alargamientos superiores al 30%, es fácil de doblar, tal como se ilustra en la figura 6.

muestra	esp. (mm)	doblado 180 °	imagen de los ensayos de doblado
longitudinal			
12	4.0	O-K.	
13	4.0	O-K.	
14	10.0	O-K.	
15	10.0	O-K.	
transversal			
12	4.0	O-K.	
13	4.0	O-K.	
14	10.0	O-K.	
15	10.0	O-K.	

Figura 6: Ensayos de doblado

Las propiedades de este acero microaleado al impacto superan, a temperatura ambiente, los 200 Joule. Las probetas transversales presentan valores mas bajos, pero siempre superando los 100 Joule.

Al bajar la temperatura a -20°C , estos valores se mantienen altos, tal como se muestra en la Tabla 1, que se muestra a continuación.

Muestra	-20°C		0°C		20°C	
	Long (J)	Tran (J)	Long (J)	Tran (J)	Long (J)	Tran (J)
7014 CorCap	210	84	225	102	221	114
7015 CorCap	194	88	230	117	227	132

Tabla 1: Ensayos de impacto Charpy

Por el bajo contenido de Carbono, la soldabilidad es excelente.

COMENTARIOS

Los aceros microaleados autopatinables presentan buena resistencia a la corrosión atmosférica, gracias a la transformación de los oxyhidróxidos que se forman en la superficie por efecto de ciclaje húmedo-seco.

La goethita presenta características nano-estructurales que generan una capa de óxido muy adherente e impermeable al avance de la oxidación.

Las propiedades mecánicas de estos aceros cumplen ampliamente las exigencias de un acero A 52-34 ES, de ductilidad excepcional y de fácil soldabilidad. Asimismo este acero presenta características excepcionales al impacto, con valores al ensayo Charpy superiores a 200 Joule en probetas longitudinales, y superiores a 100 Joules en probetas transversales.

BIBLIOGRAFIA

1. KIMURA M., SUZUKI T., KIHIRA H., Fe(O,OH)₆ Network Nanostructure of Rusts formed on Weathering Steels, Nippon Steel Research 12C/2001C001.
2. KIMURA M., SUZUKI T., SHIGESATO G., KIHIRA H., TANABE K. Fe(O,OH)₆ Network Structure of Rust formed on Weathering Steel Surfaces and its Relationship with Corrosion Resistance, Nippon Steel Technical Report n°87, Jan 2003, pp. 17-20.
3. USAMI A., KIHIRA H., KUSONOKI T. 3%-Ni Weathering Steel Plate for uncoated Bridges at High Airborne Salt Environment, Nippon Steel Technical Report n°87, Jan 2003, pp. 21-23.
4. KAGE I, MATSUI K., KAWABATA E., JFE Technical Report n°5, Minimum Maintenance Steel Plates and their Applications Technologies for Bridge-Life Cost Reduction Mar 2005, pp. 37-44.

CARACTERÍSTICAS DEL EFECTO DE PLASTICIDAD INDUCIDA POR LA TRANSFORMACION

Patricia C. Zambrano ¹, Martha P. Guerrero Mata ¹, Alfredo Artigas ²,
Alberto Monsalve ² y Rafael Colás ¹

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,
A.P. 149-F, 66451 San Nicolás de los Garza, N.L., MEXICO.

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Casilla 10233, Santiago, CHILE.

RESUMEN

Se presentan las características del tratamiento térmico que permite a aceros de bajo carbono ligeramente aleados con silicio y manganeso presentar el efecto de plasticidad inducida por la transformación. El tratamiento se lleva a cabo en dos etapas; en la primera el material se calienta en el intervalo intercrítico para forzar la formación de una cierta cantidad de austenita de alto carbono, la segunda etapa comprende la permanencia del acero a una temperatura tal que parte de la austenita transforme en bainita, pero que retengan una cierta cantidad de austenita sin transformar. El ciclo térmico tiene como objetivo el que la austenita transforme a martensita al someter al acero a deformación plástica. La transformación estabiliza el flujo plástico al tiempo que se incrementa la resistencia del material. En el trabajo se presenta la forma en que este efecto es analizado a partir de la derivación numérica de la curva esfuerzo contra deformación.

Palabras clave: Acero, transformación, deformación, martensita, austenita.

ABSTRACT

The characteristics of the heat treatment that allows low carbon steels, alloyed with small amounts of silicon and manganese, to exhibit the transformation induced plasticity effect are presented. Heat treating takes place in two stages, the steel is heated within the intercritical range during the first one to promote the formation of a given amount of high carbon austenite; the second stage involves maintaining the steel at a temperature that will promote partial transformation of austenite into bainite, but will assure that a certain amount of austenite is retained. The aim of this cycle is to promote the austenite to martensite transformation while the steel is being deformed, and, with it, the plastic flow is stabilized at the time that the strength of the material is increased. The analysis of such effect is conducted by the numerical derivation of the stress-strain curve.

Keywords: Steel, transformation, deformation, martensite, austenite.

INTRODUCCIÓN

La crisis del petróleo de los años setenta impulsó la generación y desarrollo de materiales con una resistencia mecánica superior a la de los aceros convencionales y así reducir el peso y el consumo de combustible de los automóviles, sin poner en riesgo la integridad y seguridad de los ocupantes. Entre los materiales más promisorios se encontraban los aceros bifásicos, así llamados por consistir en una mezcla de martensita finamente dispersa en matrices de ferrita o bainita. Estos aceros se tomaron de interés por exhibir alta resistencia y alta ductilidad, Figura 1 [1-8], a la par de presentar una curva de fluencia continua, caracterizada por la ausencia de un punto abrupto de fluencia, típico en aceros recocidos de bajo carbono que promueve la presencia de marcas de fluencia en piezas deformadas [9]. Las características mecánicas de estos aceros se explican en base a la presencia de una fase dispersa que es dura y resistente (martensita) que incrementa la resistencia de una matriz dúctil (ferrita). La ausencia del punto de fluencia se atribuye a la alta densidad de dislocaciones producidas por la transformación de austenita a martensita [3-5].

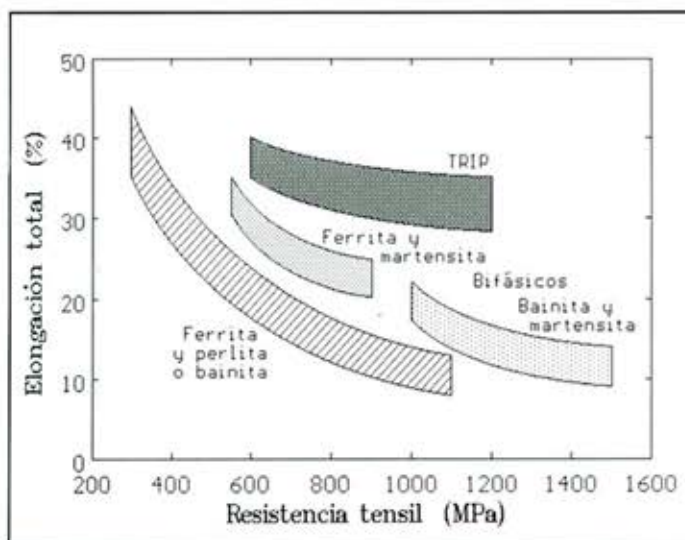


Figura 1. Valores típicos de resistencia y ductilidad de diversos tipos de aceros [1-8].

La búsqueda de nuevos y mejores materiales no se ha detenido; basta mencionar la sinergia entre las industrias automotriz y siderúrgica para evaluar y determinar las características y propiedades que deben tener los aceros destinados a la fabricación de los aceros que se estarán empleando en la manufactura de automóviles en el

futuro próximo. El programa, denominado **ULSAB** por sus siglas en inglés (*Ultra Light Steel Auto Body*) ha reconocido la necesidad de contar con aceros de alta resistencia mecánica y alta ductilidad que sean fácilmente formables y adaptables a las condiciones de fabricación de la industria automotriz [10].

OBTENCIÓN DE ESTRUCTURAS COMPLEJAS

La estructura de los aceros bifásicos se obtiene mediante el enfriamiento del material calentado en la región intercrítica (entre A_1 y A_3). Es práctica normal la adición de elementos como silicio y manganeso para expandir la región bifásica (α y γ) y retardar la transformación difusional de la austenita [1-5,11]. El tratamiento puede seguir dos rutas diferentes. La primera, Figura 2a, consiste en calentar al material por encima de A_3 por el tiempo requerido para la completa transformación a austenita, posteriormente el material se enfría a una temperatura dentro del intervalo intercrítico, para promover la transformación parcial a ferrita. El material se enfría rápidamente hasta temperatura ambiente para transformar la austenita en martensita. La segunda ruta de proceso, Figura 2b, consiste en calentar al material en el intervalo intercrítico para que los carburos y parte de la ferrita se transformen en austenita. Al igual que en el primer caso, la martensita surge del temple de la austenita.

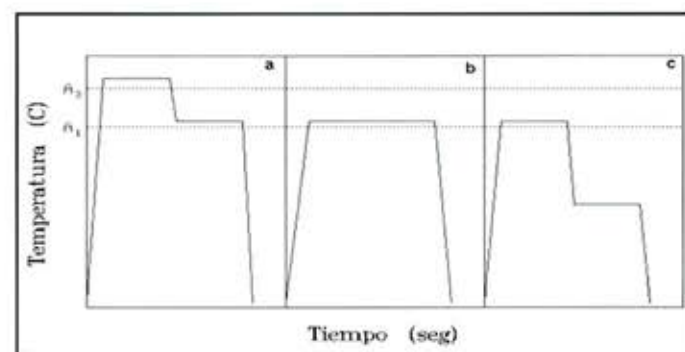


Figura 2. Ciclos térmicos que se usan para producir aceros bifásicos (a) y (b) o tipo TRIP (c).

La Figura 3 muestra la microestructura bifásica que se obtuvo de un acero Si-Mn templado en agua después de haber sido calentado por 10 minutos a 800°C siguiendo a la segunda ruta de proceso.

La evolución de los aceros bifásicos condujo a los llamados **TRIP** (por las siglas en inglés de *Transformation Induced Plasticity*)

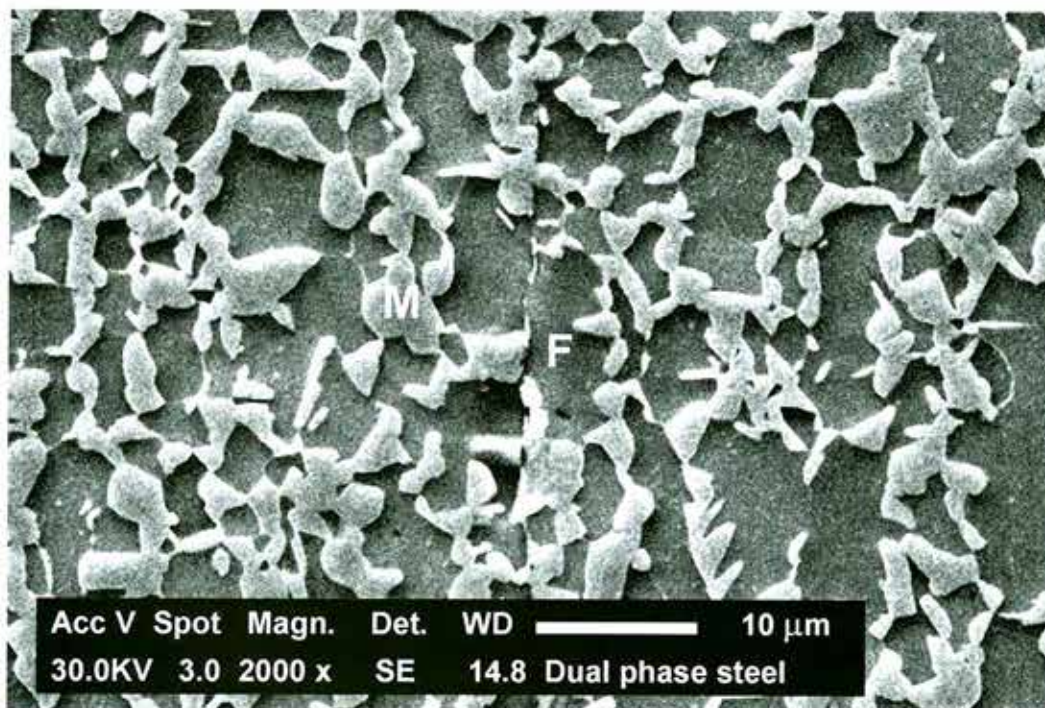


Figura 3. Microestructura de un acero Si-Mn (0.11 C, 1.26 Si, 1.53 Mn % peso) después de ser calentado por 10 minutos a 800°C y enfriado en agua, se indica la presencia de ferrita (F) y martensita (M).

susceptibles a presentar el efecto de plasticidad inducida por la transformación. Este tipo de aceros se caracteriza por la estabilización de la deformación plástica producto de la transformación de una cierta cantidad de austenita retenida en martensita. Este fenómeno permite alcanzar los altos valores de ductilidad y resistencia mecánica que se ilustra en la Figura 1. Los incrementos en resistencia y ductilidad se asocian con el aumento en la tasa de endurecimiento producto de la transformación de la austenita retenida a martensita. El incremento en la tasa de endurecimiento retarda la formación de la estricción o cualquier otro tipo de inestabilidad de índole mecánica [6-8].

La microestructura que permite obtener el efecto TRIP en aceros se obtiene mediante el ciclo térmico mostrado esquemáticamente en la Figura 2c, que consiste en el calentamiento del material a una temperatura comprendida entre A_1 y A_3 , seguido de la mantención a una temperatura que permita la transformación parcial de austenita en bainita. La transformación parcial permite retener a temperatura ambiente una cierta cantidad de austenita, que cuando se somete el acero a solicitaciones externas, se transforma a martensita. Las mejores características se obtienen cuando la cantidad de austenita retenida se encuentra entre el 7 y el 11% [7,8]. La Figura 4 muestra

el tipo de microestructura requerida para que un acero sea susceptible a presentar el efecto **TRIP**.

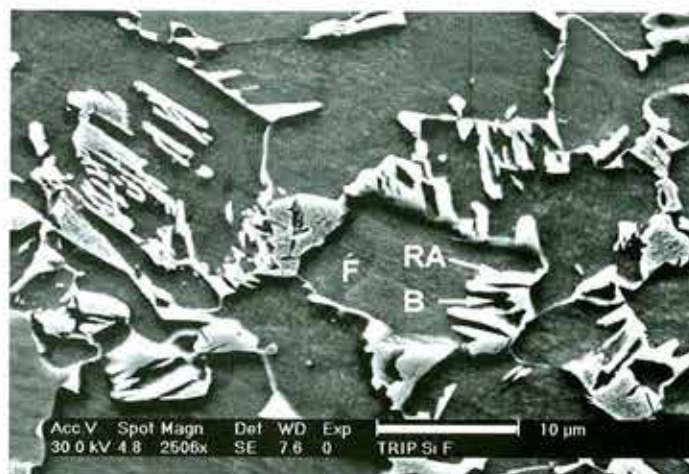


Figura 4. Microestructura de un acero Si-Mn (0.13 C, 0.78 Si, 1.66 Mn % peso) después de ser calentado por 5 minutos a 780°C, por 30 segundos a 410°C y enfriado en agua, se indica la presencia de ferrita (F) y bainita (B) y de austenita retenida (RA).

El ciclo de tratamiento térmico afecta fuertemente la cantidad de austenita que puede ser retenida. En la Figura 5 se muestra como se da esta variación en un acero al Si-Mn durante la permanencia a 410°C posterior al tratamiento intercrítico de cinco minutos a 760°C [12]. En la misma figura se muestra el cambio en el contenido de carbono disuelto en la austenita retenida. La cantidad de austenita retenida se determinó por medio de la comparación de la intensidad relativa de las señales de difracción características de dos familias de planos de la austenita, {220} y {311}, y de otras dos familias de la ferrita, {200} y {211}, [13]. La cantidad disuelta de carbono en la austenita se calculó a partir del desplazamiento angular de la difracción de los planos {220} de la austenita [14,15].

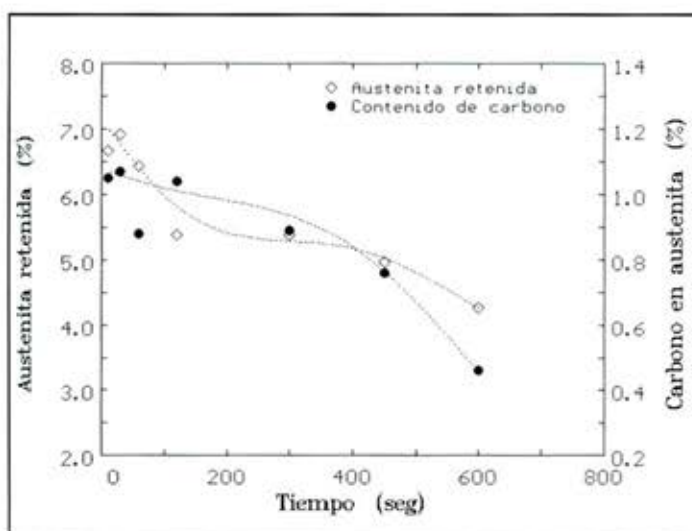


Figura 5. Variación de la cantidad de austenita retenida y en su contenido de carbono en un acero Si-Mn (0.13 C, 0.78 Si, 1.66 Mn % peso) en función del tiempo de permanencia a 410°C después de ser calentado por 5 minutos a 760°C [12].

EFFECTO DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Es práctica común caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales por medio del ensayo de tensión [16], prueba en la que el límite a la deformación plástica homogénea se alcanza en

el punto de carga máxima, lugar en el que la capacidad de soportar carga del material se satura [17]. Los aceros del tipo **TRIP** son capaces, tal y como se mencionó con anterioridad, de alcanzar los altos valores de resistencia mecánica y ductilidad mostrados en la Figura 1 gracias a la formación de martensita mecánica a partir de la austenita retenida [6-8,18-20].

En la Figura 6 se presenta como ejemplo el caso de un acero al Si-Mn deformado en compresión hasta diferentes niveles [20]. El acero se había tratado en el intervalo intercrítico por cuatro minutos a 800°C y por dos minutos a 450°C para obtener un 9.11% de austenita retenida. El análisis de los diagramas de difracción de la Figura 6 indica que la austenita retenida se reduce de su valor original a 3.43, 2.82 y 1.59, según el acero sufre una deformación equivalente del 0.25, 0.5 y 1%, respectivamente [20].

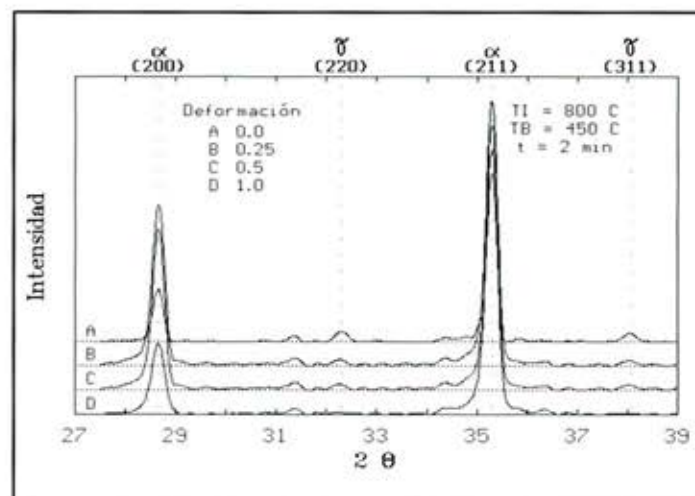


Figura 6. Patrones de difracción de rayos X obtenidos con radiación de Mo de un acero al Si-Mn (0.13 C, 1.24 Si, 1.62 Mn % peso) tratado por 5 minutos a 800°C y 2 minutos a 410°C antes de ser comprimido [20].

En la Figura 7 se presenta como la cantidad de austenita retenida se reduce en aceros tratados para producir el efecto **TRIP** en función de la deformación aplicada, independientemente de que el material se ensaye en tensión [18] o compresión [20].

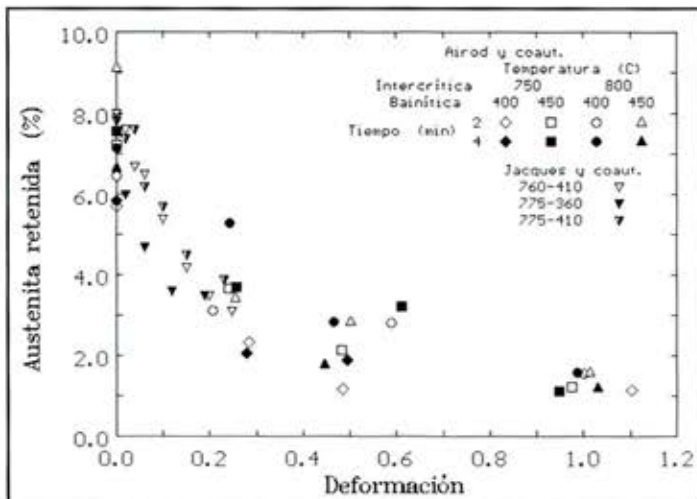


Figura 7. Reducción en la cantidad de austenita retenida en aceros deformados en tensión [18] y compresión [20].

En la Figura 8 se presentan las curvas esfuerzo-deformación de un acero al Si-Mn tratado térmicamente para obtener valores de austenita retenida de alrededor de 5 y 10%. En ambos casos se presentan las curvas experimentales y las ajustadas a curvas del tipo exponencial [21]:

$$\sigma = \sigma_o + (\sigma_s - \sigma_o) \cdot \exp(-C \cdot \varepsilon) \quad (1)$$

donde σ y ε expresan el esfuerzo y la deformación equivalentes, σ_s es el esfuerzo de saturación, σ_o el de fluencia y C es un parámetro característico de la deformación [20,22]. Las curvas esfuerzo contra deformación se ajustan a partir de la dependencia de la tasa instantánea de endurecimiento ($\delta\sigma/\delta\varepsilon$) con respecto al esfuerzo.

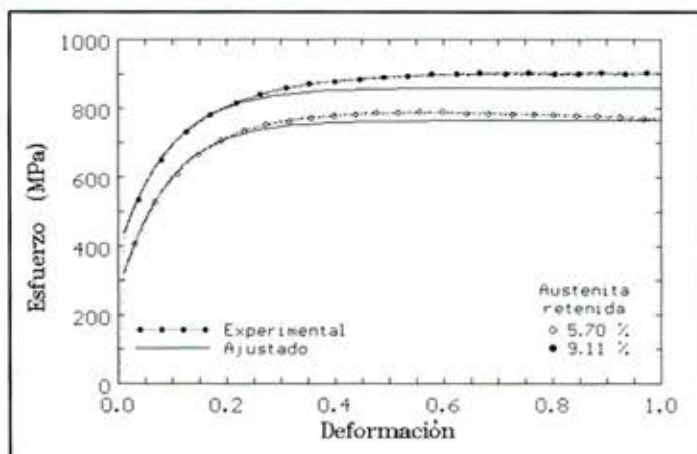


Figura 8. Curvas experimentales y ajustadas para un acero tipo TRIP deformado en compresión tratado térmicamente para obtener dos niveles cantidades de austenita retenida.

En la Figura 9 se muestra dicha dependencia para las curvas experimentales mostradas en la Figura 8. En la Figura 9 se aprecia la forma en que es posible ajustar una línea recta en el intervalo de los esfuerzos superiores a 400 MPa hasta poco antes de alcanzar el criterio de Considère [17], indicado por la relación $\delta\sigma/\delta\varepsilon = \sigma$. Dicha porción lineal sigue la relación:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = C \cdot (\sigma_s - \sigma) \quad (2)$$

La porción lineal descrita por esta ecuación ha sido asociada con el desarrollo del deslizamiento cruzado en monocristales, en tanto que la extrapolación a un esfuerzo de saturación implica el balance entre los mecanismos de aniquilación y generación de dislocaciones [23-25].

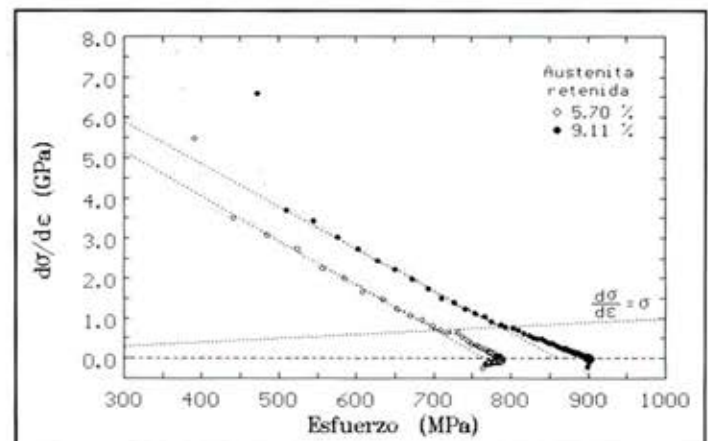


Figura 9. Variación de la tasa instantánea de endurecimiento en función del esfuerzo para el acero de la Figura 8.

El que no se cumpla la relación lineal a esfuerzos cercanos al de Considère, ver Figura 8, implica el cambio en el mecanismo responsable de la deformación plástica [26] y, al ser los valores experimentales mayores a los predichos, se produce un incremento en la densidad de dislocaciones. La línea discontinua describe el criterio de Considère y representa las condiciones bajo las cuales se iniciaría la estricción si el material se sometiera a un ensayo de tensión. La deformación a la que se iniciaría esta inestabilidad (ε_n) está dada por:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{C} \cdot \ln \left[\frac{\sigma_s}{(\sigma_s - \sigma)(1 + C)} \right] \quad (3)$$

Al observar con detenimiento la Figura 8 se aprecia que la in-

terpolación (línea punteada) no sigue los datos experimentales por encima del criterio de Considère, lo que resulta en la subestimación de la resistencia del material a altos valores de deformación, tal y como se aprecia en la Figura 7.

Es común describir las curvas esfuerzo-deformación de materiales ensayados en tensión por medio de la ecuación propuesta por Hollomon [27]:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (4)$$

donde k y n se conocen como el coeficiente y el exponente de endurecimiento, respectivamente. Se puede demostrar que si un material obedece esta relación, el exponente ($n = d \ln \sigma / d \ln \varepsilon$) debe ser constante e igual a la deformación a la que se inicia la estricción (ε_u). Las Figuras 10 y 11 muestran, respectivamente, la variación de $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon$ con respecto a la deformación y al esfuerzo. La línea punteada corresponde a la relación $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon = \varepsilon$ y, como se puede apreciar, $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon$ no es constante, por lo que no se justifica el uso de relaciones del tipo mostrado en al Ec. (4) para describir este tipo de materiales. En las Figuras 10 y 11 se muestra una porción horizontal, indicada por flechas, ya sea en deformación o en tensión. Esta porción horizontal, lo mismo que el ajuste en la Figura 8, indica un cambio en el mecanismo de deformación. El examen de la microestructura en aceros susceptibles a presentar este tipo de efecto [20] indica que la mayor parte de la deformación se concentra en la ferrita, al ser más blanda que las otras estructuras presentes (austenita y bainita). De esta forma, la ferrita se endurece hasta alcanzar los valores de esfuerzo que producen deformación en la austenita y su transformación en martensita, lo que dispara el efecto de plasticidad inducida por la transformación.

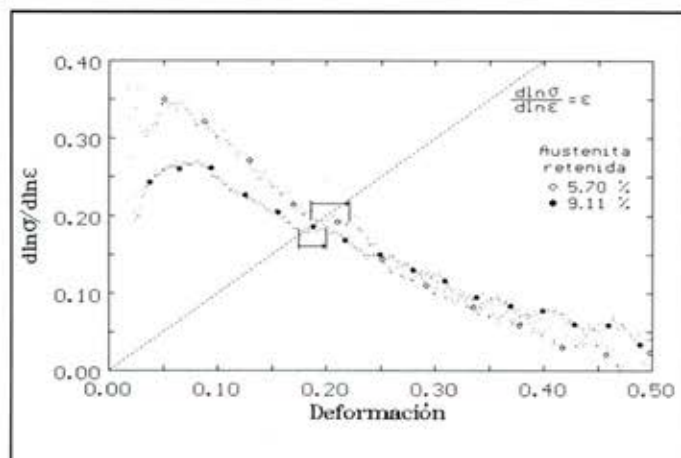


Figura 10. Variación de $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon$ con respecto a la deformación a partir de las curvas de la Fig. 8, la línea punteada, $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon = \varepsilon$, se asocia a las condiciones requeridas para el inicio de la estricción en tensión.

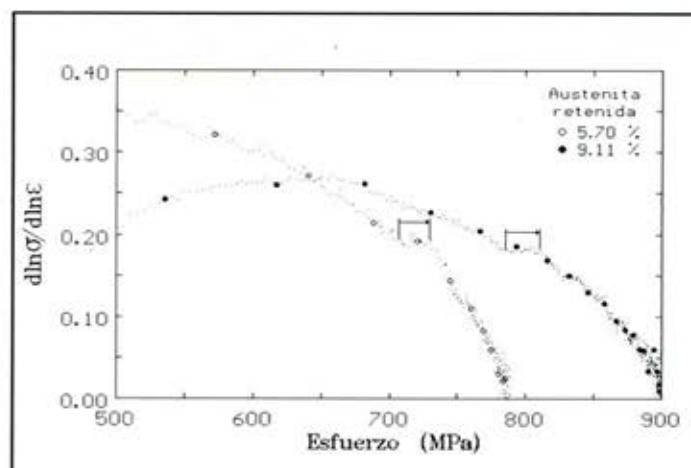


Figura 11. Variación de $d \ln \sigma / d \ln \varepsilon$ con respecto a la tensión.

COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se describió en forma somera las características microestructurales que le permiten a aceros al carbono con ligeras adiciones de Si y Mn exhibir el efecto de plasticidad inducida por la transformación. Se concluye que para que estos aceros sean susceptibles de presentar el efecto se debe de tener al menos de un 5% de austenita retenida. Así mismo, se describió la forma en que el ciclo térmico afecta la cantidad de esta fase.

Se presentó la forma en que el efecto puede ser analizado a partir de datos experimentales, ya que es posible detectar el incremento en esfuerzo en las curvas esfuerzo-deformación. La transformación de austenita a martensita provoca los cambios en la densidad de dislocaciones que altera la relación lineal entre la pendiente de la curva y el esfuerzo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), Chile, y el Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (PAICYT, UANL).

REFERENCIAS

1. R.G. Davies, Metall. Trans. A, 9A, 41 (1978).
2. W.S. Owen, Met. Technol., 7, 1 (1980).
3. N.J. Kim y G. Thomas, Scripta Metall., 18, 817 (1984).
4. D.T. Llewellyn y D.J. Hillis, Ironmaking Steelmaking, 23, 471 (1996).
5. L.G. García-Navarro, P. Rodríguez, A.J. Pérez-Unzueta, R. Colás, C.J. Lizcano, I. Alvarez y G. Thomas, 1st Int. Automotive Heat Treatment Conf., R. Colás, K. Funatani y C.A. Stickels (eds.), ASM International, 1999, 456.
6. V.F. Zackay, E.R. Porter, D. Fahr y R. Bush, Trans. Am. Soc. Met., 60, 252 (1967).
7. M. De Meyer, D. Vanderschueren y B.C. De Cooman, ISIJ Int., 39, 813 (1999).
8. R. Petrov, L. Kestens e Y. Houbaert, ISIJ Int., 41, 883 (2001).
9. W.C. Leslie, The Physical Metallurgy of Steels, McGraw Hill, Nva. York, 1982.
10. <http://www.autosteel.org>
11. K.J. He y T.N. Baker, Mat. Sc. Eng. A, A169, 53 (1993).
12. O. Covarrubias, M.P. Guerrero, R. Colás, R. Petrov, L. Kestens e Y. Houbaert, Int. Conf. TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, B.C. De Cooman (ed.), Grips, Aquisgrán, 2002, 227.
13. B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, 2nd Ed., Addison-Wesley, Nueva York, 1978.
14. R.C. Ruhl y M. Cohen, Trans. TMS-AIME, 245, 241 (1969).
15. D.J. Dyson y B. Holmes, J. Iron Steel Inst., 208, 469 (1970).
16. G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, Londres, 1988.
17. A. Considère, Ann. Ponts Chaus., 9, 574 (1885).
18. P.J. Jacques, J. Ladrière y F. Delannay: Metall. Mat. Trans., 32A, 2759 (2001).
19. E. Girault, P. Jacques, Ph. Harlet, K. Mols, J. van Humbeeck, E. Aernoudt y F. Delannay: Mat. Char., 40, 111 (1998).
20. A. Airod, R. Petrov, R. Colás e Y. Houbaert, ISIJ. Int., 44, 179 (2004).
21. E. Voce, J. Inst. Met., 74, 537 (1948).
22. A. Airod, H. Vandekinderen, J. Barros, R. Colás e Y. Houbaert, J. Mat. Proc. Techn., 134, 398 (2003).
23. U.F. Kocks, A.S. Argon and M.F. Ashby, Thermodynamics and Kinetics of Slip, Progress in Materials Science, Vol. 19, Pergamon Press, Oxford, 1975, 135.
24. H. Mecking, B. Nicklas, N. Zarubova and U.F. Kocks, Acta Metall., 34, 527 (1986).
25. L. Kaps and F. Haeflner: Plasticity of Metals: Experiments, Models, Computation, E. Steck, R. Ritter, U. Peil and A. Ziegenbein (eds.), Wiley-VCH, Weinheim, 2001, 1.
26. R. Colás, Scr. Metall., 19, 155 (1985).
27. J.H. Hollomon: Trans AIME, 162, 268 (1945).



**Bolas de Acero Forjado
para la Molienda de Minerales**

Oficina Central
Av. Pedro de Valdivia 0168.
Providencia, Santiago. Chile.
Teléfono: (56-2) 337 04 00
Fax: (56-2) 232 58 19

Planta Industrial Talcahuano
Av. Gran Bretaña 2075.
Talcahuano. Chile
Teléfono: (56-41) 44 05 00
Fax: (56-41) 54 20 68

Planta Industrial Mejillones
Camino a Chacaya 4100, Lote C.
Mejillones. Chile.
Teléfono: (56-55) 44 94 50
Fax: (56-55) 44 94 51

MAGNETIC DOMAIN OBSERVATION BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY

Tanya Ros Yáñez ⁽¹⁾, Alberto Monsalve G. ⁽²⁾, Alfredo Artigas A. ⁽²⁾ and Yvan Houbaert ⁽¹⁾

- ¹ Department of Metallurgy and Materials Science, Ghent University, Technologiepark 903, B-9052 Gent-Zwijnaarde, Belgium.
E-mail: tanya.rosyanes@ugent.be
- ² Department of Metallurgical Engineering, University of Santiago de Chile, Av. L. B. O'Higgins 3363, Santiago de Chile, Chile.
E-mail: amonsalv@usach.cl

ABSTRACT

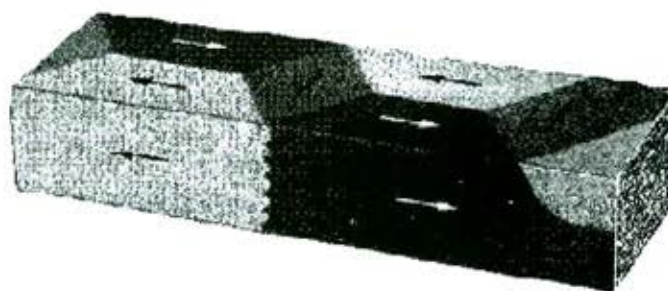
Magnetic Force Microscopy has found a remarkably widespread acceptance in the study of magnetic domains, particularly in the details studies of magnetic patterns because this technique offers the possibilities to obtain high resolution images. In this work the magnetic domains in three different materials have been observed: first the magnetic domains in a hard disk and in a Permalloy were visualised, and later, in two electrical steels, in a grain oriented and in a non grain oriented. Experimentally, it was demonstrated that convincing domain images using Magnetic Force Microscopy can be obtained even from non-oriented electrical steel.

RESUMEN

La Microscopía de Fuerza Magnética actualmente se ha extendido considerablemente en el estudio de dominios magnéticos, particularmente cuando se requieren imágenes con una alta resolución para estudiar detalles en la estructura de dominios. En este trabajo se estudió la estructura de los dominios magnéticos de tres tipos de materiales: primeramente en un disco duro y en un Permalloy, y luego en dos aceros eléctricos, uno de grano orientado y otro de grano no orientado. Experimentalmente se pudo comprobar que utilizando esta técnica se pueden visualizar los dominios magnéticos inclusive usando materiales magnéticamente blandos.

1. INTRODUCTION

Ferromagnetic materials at temperatures below the Curie temperature are composed of small-volume regions called domains. In the domain structures the spontaneous magnetisation takes different directions in different domains. The orientation of the magnetisation is practically uniform inside each domain, but varies from domain to domain (figure 1). Normally, domains are microscopic in size and for a polycrystalline specimen each grain may consist of more than a single domain.



*Figure 1: Domains observed from two sides of an iron whisker, combined in a computer to simulate a perspective view.
[taken from ref. 5]*

The interface layers separating one domain from the other are known as domain walls, where the magnetisation rapidly passes from one orientation to the other (figure 2). Most of the magnetic changes

under the action of weak and moderate magnetic fields occur at the domain walls and hence an understanding of domain-wall behaviour is essential to describe the magnetising process.

Domain walls are commonly classified according to the direction of magnetisation in the contiguous domains separated by the wall. One has a 180° domain wall when the wall separates domains of opposite magnetisation. In all other cases are called 90° domains walls, even if the magnetisation does not necessarily rotate by 90° when passing from one domain to the other.

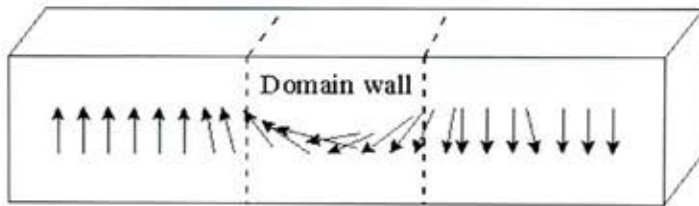


Figure 2: Gradual changes in magnetic dipole orientation across a domain wall

An important property of the domain walls is its mobility, which is a measure of magnetisability. The magnetisation changes induced by the external field are interpreted in terms of displacements of the domain walls. When a magnetic field or external stress is applied, changes occur in the domain structure which produce changes in the overall sample magnetisation. Changes in domain structure can occur by two principal means. Either the magnetisation within each domain can coherently rotate to a direction parallel to the applied field or the boundary between two domains can move causing the entire magnetisation change to be localised at the domain boundary.

There are several techniques available for observing magnetic domains. They can give information not only on the disposition of domains, but also on several properties of the magnetisation and on the detailed internal structure of domain walls.

In order to observe domains, one needs some probe that may be coupled to the magnetisation of the specimen and react in different ways, depending on the local magnetisation orientation. In the observation methods routinely used, the picture obtained with visible light, electrons, or some sort of external magnetic probe interacting magnetostatically with the specimen magnetisation. Some of the common used methods are:

- Powder-pattern method
- Magneto-optical methods:
 - Faraday effect
 - Kerr effect
- Lorentz method
- Magnetic Force Microscopy (MFM) using Atomic Force Microscope (AFM)

The introduction of Magnetic Force Microscopy using AFM has given a new impetus in the study of the magnetic microstructure with a good sensitivity to detect small variations in the magnetisation.

2. ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The Atomic Force Microscope (AFM, as it is also known) belongs to a family of instruments used for the study of the surface properties of materials from the atomic to the microlevel and has been successfully used for the characterisation of the surface topography of a very wide range of materials. In the recent past, topography and other surface information of hard surfaces was mainly characterised by techniques like scanning electron microscopy (SEM). The great advantages of AFM compared with SEM are: the possibility that surfaces can be imaged in different environments, without any vacuum or special sample treatment, with very high resolution and also its ability to evaluate quantitatively selected surface features, including statistical analysis of the surface roughness. Scanning Probe Microscopy SPM or AFM is a rather new technique, only just completing the first decade following its invention and it is emerging as an important means for determining changes in topography. Its application to metallurgical problems is relatively new.

2.1 PRINCIPLE OF OPERATION

The principle of operation of the AFM is simple: the surface of the sample is scanned with a very sharp tip, a couple of microns long and often less than 100\AA in diameter. The tip is located at the free end of a cantilever that is 100 to 200 μm long. Forces between the tip and the sample surface cause the cantilever to bend, or deflect. These movements of the tip are monitored by reflecting a laser beam from the back of the cantilever on to a position-sensitive photodetector (PSPD). A detector measures the cantilever deflection as the tip is scanned over the sample. The measured cantilever deflections allow a computer to generate a map of the surface topography. Several

forces typically contribute to the deflection of an AFM cantilever. The force most commonly associated with atomic force microscopy is an interatomic force called the Van der Waals force. Figure 3 gives a schematic representation of the working principle of AFM.



Figure 3: Working principle of the AFM

The AFM can work in different modes; the most important are the following:

- | | |
|-------------------------------|--------|
| • Contact AFM | C-AFM |
| • Non-contact AFM | NC-AFM |
| • Intermittent-contact AFM | IC-AFM |
| • Lateral Force Microscopy | LFM |
| • Magnetic Force Microscopy | MFM |
| • Force Modulation Microscopy | FMM |

2.2 MAGNETIC FORCE MICROSCOPY (MFM)

Magnetic force microscopy (MFM) images the spatial variation of magnetic forces on a sample surface. For MFM, the tip is coated

with a ferromagnetic thin film. The system operates in non-contact mode, detecting changes in the resonant frequency of the cantilever induced by the magnetic field's dependence on tip-to-sample separation (See Figure 4). MFM can be used to image naturally occurring and deliberately written domain structures in magnetic materials.

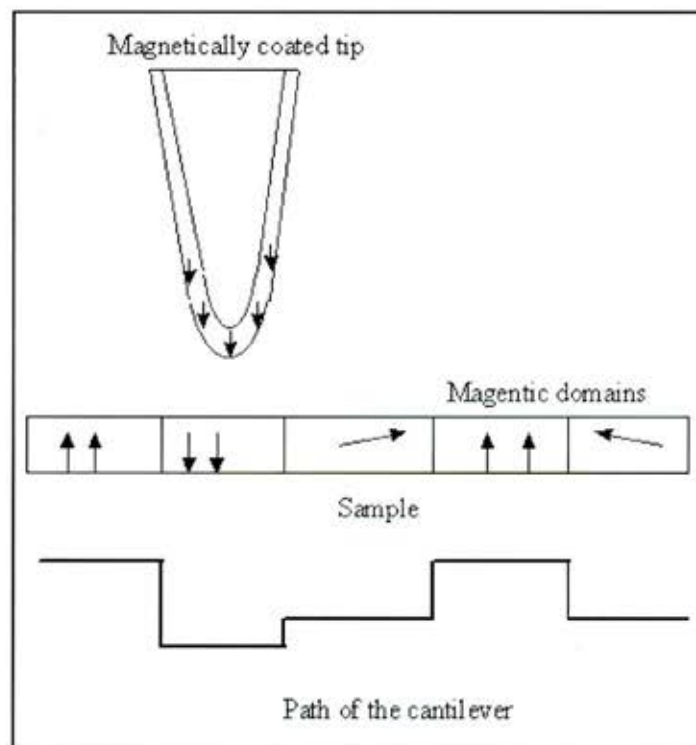


Figure 4: MFM maps the magnetic domains of the sample surface

An image taken with a magnetic tip contains information about both the topography and the magnetic properties of a surface. Which effect dominates depends upon the distance of the tip from the surface, because the interatomic magnetic force persists for greater tip-to-sample separations than the van der Waals force. If the tip is close to the surface, in the region where standard non-contact AFM is operated, the image will be predominantly topographic as is shown in figure 5a. As you increase the separation between the tip and the sample (figure 5b), magnetic effects become apparent until the magnetic images are separated from the topographic effects (figure 5c).

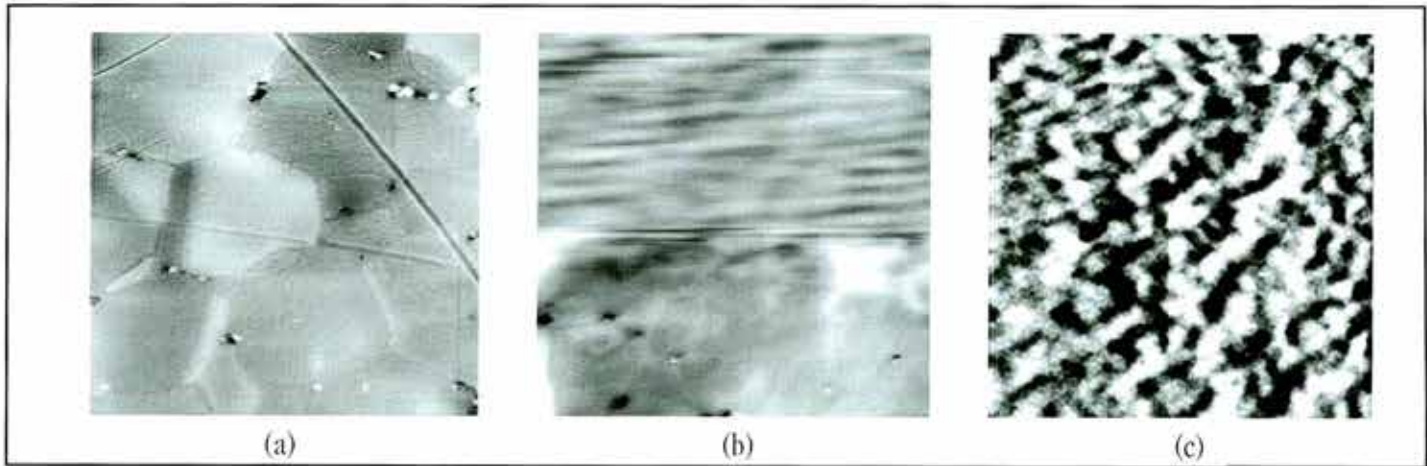


Figure 5: Influence of the distance between magnetic tip and specimen surface on image. (a) Topography NC-AFM, (b) topography/MFM, (c) MFM. Field of view $20\mu\text{m}$

3. EXPERIMENTAL WORK

A study of the domains structures observed in three different materials is presented. The materials to be discussed are: a hard disk surface in order to obtain the first calibration of magnetic contrast, a Permalloy for the first examination of metallic materials and two electrical steels.

3.1 HARD DISK

Magnetic disks are devices coated with a layer of magnetic medium to record analogue or digital signals magnetically by utilising

residual magnetisation. A magnetic pattern is written in narrow tracks into unstructured magnetic layer, the recording medium, when it moves past a writing head. The information is recovered by a reading head. The reading process leaves the written information unaffected. The information element can only be stable if the coercivity H_c is larger than the demagnetising field H_d . For a given medium thickness and a given coercivity, the smallest information element length (L) and thus the maximum recording density is therefore determined by a self-demagnetising effect.

Written tracks in this material can be conveniently observed with high-resolution AFM as shown in the figures 6b and 6c, where the bits at the trailing edge are aligned along the tilted columns.

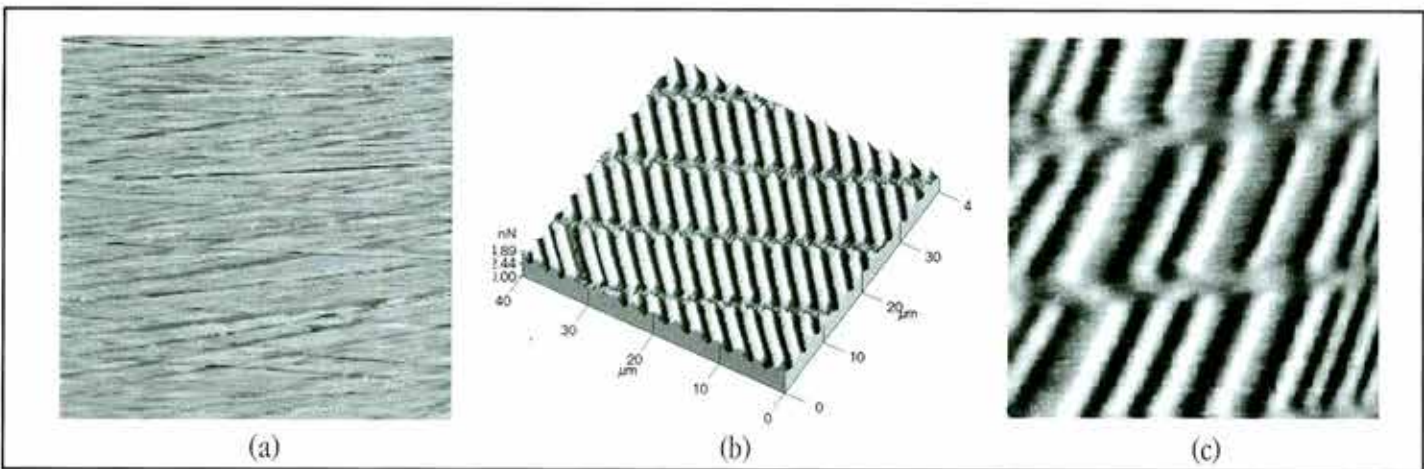


Figure 6: Images of a hard disk. (a) Topographic image in C-AFM, field of view $20\mu\text{m}$, (b) and (c) MFM images, field of view $40\mu\text{m}$ and $20\mu\text{m}$ respectively

Figure 6 demonstrate the ability of AFM to obtain both topography and magnetic force information from a surface. The MFM image clearly shows the location and characteristic shape of bits on a hard disk sample, while the topographic image shows the surface roughness of the disk.

3.2 PERMALLOY

It was discovered in 1923 that Ni-rich Ni-Fe alloy exhibit very high permeability, reaching a maximum at a composition of 21.5wt% Fe-Ni. This alloy is called Permalloy and has very small magneto-crystalline anisotropy. A Permalloy has a hysteresis loop which is very narrow compared to that of soft iron so that the magnetisation is easily reversed. This material may reach its saturation magnetisation with a relatively low applied field and has low hysteresis losses. The domain patterns in high-permeability alloy depend strongly on the grain size, and these differences have direct consequences for static and dynamic loss and noise properties. In the coarse grained material (>30 μm) the domains scale with the grain size, while in the fine-grained material the domains extend over many grains. The static coercivity is much smaller for the coarse-grained material because the domains walls can be displaced freely inside the domains.

In this material the magnetocrystalline anisotropy (K_1) is large; the domains are not fixed to crystallographic directions and may wander throughout the sample. Significant rotation occurs throughout magnetisation and the width of the domain walls is large.

Permalloy with 32wt% Fe-Ni was analysed. Figure 7 shows the microstructure using SEM where slight contrast in the grains is appreciated, the grain size is around 80 μm . MFM images were obtained on a polished surface.

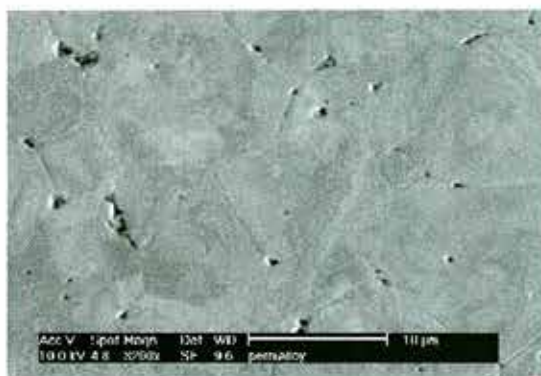


Figure 7: SEM micrograph of a Permalloy

Figure 8 shows a typical MFM image of the domains which were disturbed because of a strong magnetic field applied perpendicular to the original stripe domains.

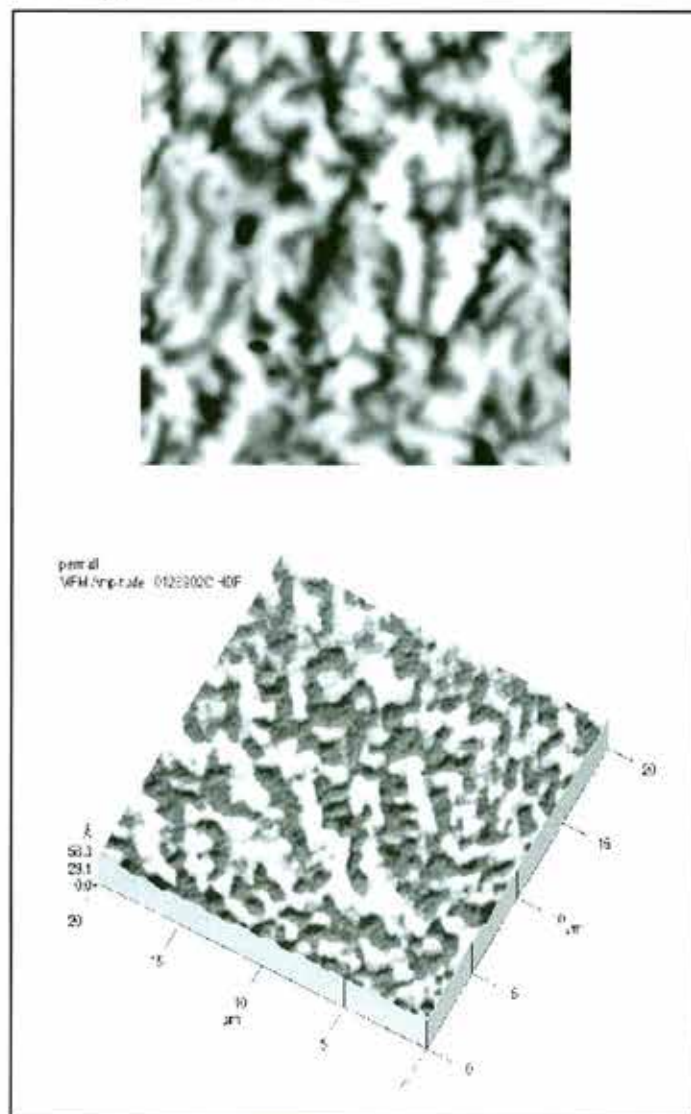


Figure 8: Magnetic domains observed on the surface of a Permalloy. Field of view 20 μm

3.3 ELECTRICAL STEEL

In the core of transformers, generators, motors and other inductive machinery various iron-based metallic alloys are used. The most common material is iron up to 3.5wt% of silicon. The addition of small amount of silicon to iron result in a higher maximum permeability, lower magnetic losses and substantial increase in electrical resistivity which lowers eddy current losses. The most important

qualities number for many larger applications of electrical steel is the loss per cycle and the permeability. Often a material with smaller losses is preferred even if the permeability is somewhat smaller. The reason is that the magnetic losses are the principal contribution to total losses in idling machines.

In some fields, such as in the cores of electrical machinery, domains and domain walls are essential. Electrical machines simply would not work without the easily displaceable domain walls providing the necessary permeability. The same is true for most inductive devices at medium and high frequencies.

The losses in electrical steel can be separated in:

a) Hysteresis losses that are connected with the pinning of domain walls on defects and surface imperfections. Supplementary domains contribute decisively to hysteresis losses because they can be attached to the basic walls, impeding their motions, and because

they must be annihilated and regenerated every time a basic wall sweeps through.

b) Equally important in transformers material are anomalous eddy currents losses. They are connected with domain-wall related eddy current effects and become important if the basic domain width is larger than the sheet thickness.

In soft magnetic materials the domain walls usually form complex networks, anchored at sample imperfections, corners or grain boundaries. Carefully prepared, perfect samples are needed to avoid these complications. The domain arrangement is primarily determined by the principle of flux closure and the magnetic anisotropy, and most details of the domain patterns are therefore determined by the surface orientation relative to the easy directions.

Two steel were used in the first series of experiments: a grain oriented electrical steel and a non-oriented electrical steel. Table I shows the chemical composition and the mean grain size for each one.

Table I Chemical composition (wt %) and mean grain size of the grain oriented (GO) and non-oriented (NO) electrical steel.

Steel	C	Si	Al	Mn	P	S	Grain size
GO	0.007	2.84	0.017	0.56	0.03	0.016	3 mm
NO	0.004	0.31	0.35	0.64	0.07	0.004	60 μm

3.3.1 GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL

Grain oriented transformer material consists of large grains of Fe 3wt%Si oriented within a few degrees deviation from the [100] easy direction along the preferred axis of the material. The domain structure is simple and it consists of striped domains magnetised parallel and antiparallel to the easy [001] direction. A zone with a simple domain pattern and a perfect domain structure is shown in figure 9.

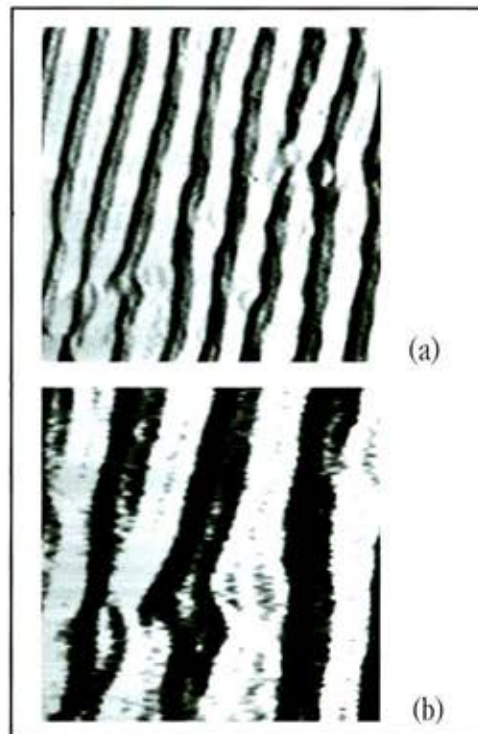


Figure 9: Magnetic domains (a) on a undisturbed grain oriented silicon steel zone, field of view 37 μm and (b) detail, field of view 17 μm

Probably the small kinks, as is shown in figure 9b, are connected with internal transverse domains. Other different kind of domains can be observed caused by defects or stresses, also the simple bar domain pattern is disturbed by grain boundaries where extra domains are introduced in the neighbourhood. Figure 10 shows an area where the domains are disturbed due to stresses. Figure 10b shows a example of the scratching effect on the domains. The stress introduced locally in this way interrupts the basic domains, acting like an artificial grain boundary.

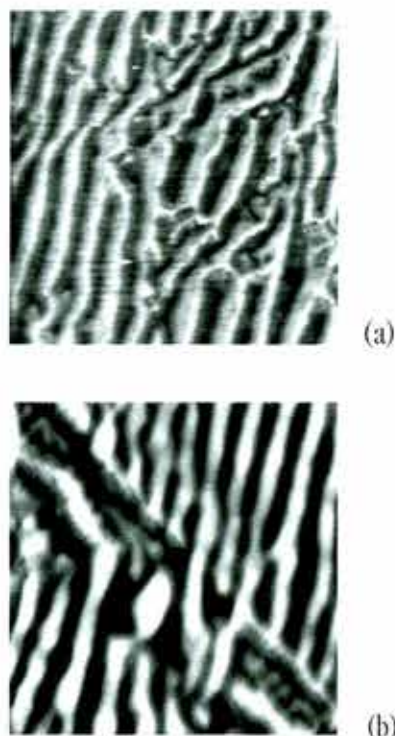


Figure 10: Patterns that can be found in grain oriented silicon steel produced by stresses. Field of view (a) $60\mu\text{m}$ and (b) $50\mu\text{m}$

3.3.2 NON-ORIENTED ELECTRICAL STEEL

The observation of magnetic domains in non-oriented steel is much more difficult, the domain patterns of such materials are of a heavily branched character for most grains and the pictures are not easy to interpret. Experimentally, the basic domains in these materials can hardly be visualised, some possibilities are using X-ray topography or Kerr microscopy in dynamic observations. MFM can be useful in the detailed studies of patterns offering better resolution.

An impression of the complexity of these patterns can be seen in figure 11a in an overview and in detail in figure 11b.

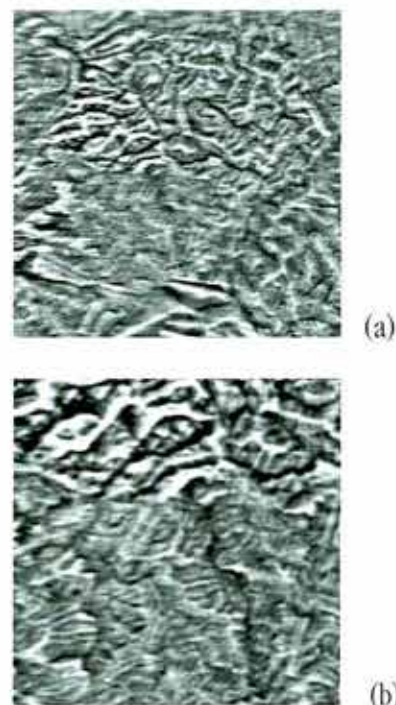


Figure 11: Magnetic domain patterns in a non-oriented electrical steel. Field of view (a) $80\mu\text{m}$ and (b) $40\mu\text{m}$

Figure 12 shows the domain patterns in different grains, probably with different surface orientation. One grain exhibits a simple bar domain pattern while the other grains show a different arrangement of the domains. Further studies combining images from AFM in magnetic force and using the orientation imaging microscopy (OIM) technique in the SEM, on exactly the same areas, will permit understand better the relationship between the orientation of the grain and the observed domain patterns.

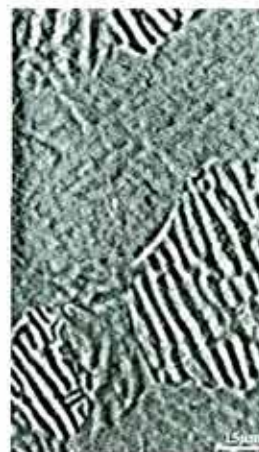


Figure 12: Magnetic domain pattern on different grains in a non-oriented electrical steel.

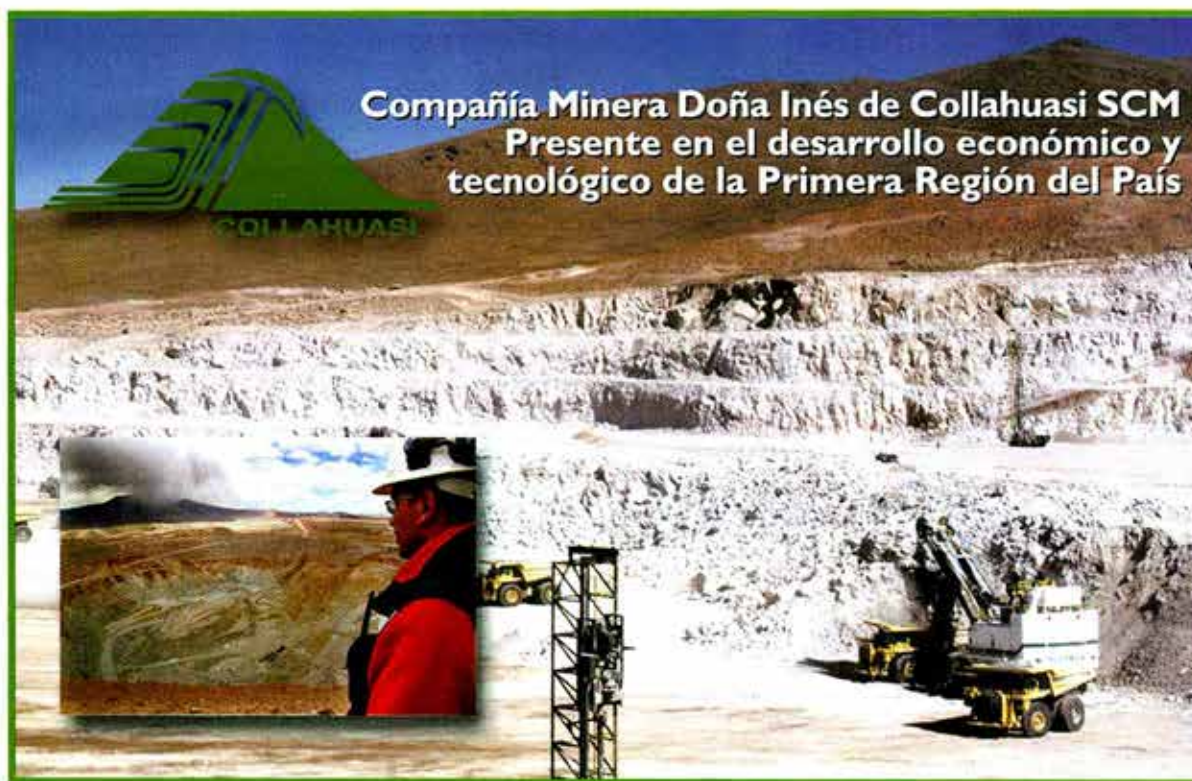
4. CONCLUSIONS

MFM has become a pre-eminent method for observing magnetic domains in electrical steel. In addition to its high resolution and sensitivity, it needs no complicated sample preparation.

With this technique neither the sample is modified by the probe nor the probe by the sample. Experimentally, it was demonstrated that convincing domain images can be obtained even from non-oriented electrical steel. Further studies combining MFM and OIM techniques will provide more information about the domain observation.

REFERENCES

1. S. Chikazumi, "Physics of ferromagnetism", Oxford Science Publications, Clarendon Press, 1997.
2. G. Bertotti ; "Hysteresis in Magnetism", Academic Press.
3. L. Solymar, D. Walsh, "Electrical properties of materials", Oxford University Press, sixth edition, 1998.
4. W. D. Callister, "Materials science and engineering", John Willey & Sons, Inc., fifth edition, 1999.
5. A. Hubert, R. Schafer; "Magnetic Domains", Oxford University Press, sixth edition, 1998.
6. R. Howland and L. Benatar, "A practical guide to scanning probe microscopy", Copyright 1993-1996 by Park Scientific Instruments.



LOS METALES Y SU ORIGEN ESTELAR



Dra. Paula A. Rojas Saperas
Pontificia Universidad Católica
de Valparaíso

1. INTRODUCCIÓN

Para todo metalúrgico, los metales son algo tan común como el día a día, sin embargo, si consideramos su abundancia en nuestro universo, podemos llevarnos una gran sorpresa. Efectivamente el universo está constituido en más de un 90% solo de dos elementos: hidrógeno y helio, del 10% restante, la mayor parte está conformada por: O, C y Ne, en otras palabras, los metales representan menos de un 1% en abundancia. Lo anterior convierte a los metales prácticamente en una "curiosidad" dentro del universo, lo cual puede resultar completamente contra intuitivo para el ser humano, sobretodo considerando que los ha empleado desde hace más de 6000 años.

Pues bien, es un hecho demostrado científicamente que los metales son muy escasos en el universo y es más, lo son a una escala mucho más pequeña pues en la corteza terrestre, O y Si representan más del 70% del total y en los organismos vivos que habitan dicha corteza, el asunto no difiere mucho pues los elementos predominantes son O, C, H y N. Y... ¿dónde están los metales?. Tratándose de elementos constitutivos, nuestro planeta al igual que los demás planetas internos, poseen metales, pero estos se localizan preferentemente hacia su interior. El hecho de que estos planetas tuvieran esta distribución preferencial de elementos condujo a la hipótesis de que dicha distribución debía estar vinculada con su génesis y con ella a la de génesis de nuestro sistema solar.

Gracias a los numerosos avances en el área de la física durante el siglo recién pasado, hoy tenemos la certeza de que efectivamente la composición de los planetas y satélites de nuestro sistema fue determinada por los procesos que intervinieron en su génesis, lo que nos lleva a los orígenes de nuestra estrella, el Sol. Efectivamente, para poder comprender el origen de los metales debemos dirigir nuestra atención a las estrellas.

2. ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

La observación realizada por los astrónomos en la actualidad, dista mucho de la imagen clásica del científico mirando a través de un gigantesco telescopio, de hecho, la mayoría de las observaciones que se realizan actualmente emplean rangos "no visibles" del espectro electromagnético, Tabla 1. Independientemente del sector del espectro empleado o de la señal requerida para la "observación" en astronomía, los telescopios de cualquier tipo, ópticos, radio, etc, han sido desarrollados para recoger la mayor cantidad posible de la radiación que emite un cuerpo en el espacio. Su finalidad es la de proporcionar una señal suficientemente intensa para facilitar su análisis por equipos auxiliares. Gracias a estos equipos es posible, por ejemplo, conocer los elementos químicos que contiene los astros y las propiedades físicas de las estrellas: temperatura, presión, campos eléctricos y magnéticos, etc.

Tabla 1. Áreas de la astronomía separadas según sector del espectro electromagnético empleado.

ÁREA	APLICACIONES
Radioastronomía: estudia radiaciones con una longitud de onda mayor que unos pocos milímetros.	Las ondas de radio suelen ser originadas por objetos fríos, incluyendo gas interestelar y nubes de polvo. La radiación cósmica de microondas de fondo es la luz del Big Bang con un corrimiento al rojo.
Astronomía infrarroja: estudia las radiaciones con longitudes de onda infrarroja.	Objetos más fríos que las estrellas como planetas, se estudian estas frecuencias.
Astronomía óptica (forma más antigua de observación): estudia radiaciones con longitudes de onda dentro del espectro visible.	La atmósfera terrestre interfiere con las observaciones ópticas, así que se utilizan ópticas adaptativas y telescopios espaciales para obtener la mayor calidad. En este rango, las estrellas son altamente visibles, y pueden observarse espectros químicos para estudiar la composición de estrellas, galaxias y nebulosas.
Astronomía de rayos ultravioleta, rayos X y rayos gamma.	Empleada en el estudio de procesos muy energéticos como púlsars binarios, agujeros negros, magnetars y muchos otros. Estos tipos de radiación no atraviesan la atmósfera terrestre, por lo que son estudiados desde telescopios espaciales como RXTE, el Observatorio de Rayos X Chandra y el Observatorio de rayos gamma Compton.

Los astrofísicos trabajan para dar una explicación física a los fenómenos observados por los astrónomos, haciendo uso de una variada gama de herramientas, que en la actualidad incluyen modelos analíticos y simulaciones numéricas. Los modelos analíticos son ideales para obtener un mayor entendimiento de la esencia de un proceso físico. Las simulaciones numéricas se aplican para estudiar sistemas descritos por ecuaciones muy complicadas. Algunos ejemplos de dichos procesos se muestran en la Tabla 2. Gracias al empleo de estas herramientas, los astrofísicos han cambiado radicalmente nuestro concepto del universo y particularmente el de las estrellas.

Durante muchos siglos la humanidad observó las estrellas pensando que eran enormes bolas de fuego perpetuo, posteriormente y

con la aparición de la ciencia moderna, se trató de explicar el origen de la energía que radiaban. Primero se pensó que se trataba del calor procedente del colapso gravitatorio, pero esta teoría no concordaba con la antigüedad de la Tierra, más de 4.500 millones de años. La conclusión era obvia, debía existir alguna fuente de energía que las mantuviera activas durante lapsos tan largos, pero no se sabía cual. La respuesta tardó en llegar pues fue necesario el desarrollo de la física nuclear para poder determinar dicha fuente. Después de esto y gracias al desarrollo alcanzado por la astrofísica durante el siglo XX, los científicos han demostrado que casi toda la vida de las estrellas estaba regida por procesos nucleares. A continuación se revisarán algunos aspectos de su formación, evolución y muerte y veremos como durante estas etapas se da origen a los metales.

Tabla 2. Procesos y herramientas estudiados por los astrofísicos².

PROCESO FÍSICO	HERRAMIENTA	EXPLICACIONES / PREDICCIONES
Gravitación	Raditelescopios	Generación de un sistema estelar
Big Bang	Telescopio espacial Hubble, COBE	Edad del Universo
Colapso gravitacional	Astronomía de rayos X	Agujeros negros
Fusión Nuclear	Espectroscopia	Luminosidad de las estrellas

3. FORMACIÓN, EVOLUCIÓN Y MUERTE DE ESTRELLAS

La astrofísica nos ha otorgado a una conclusión sorprendente: Las estrellas producen directa o indirectamente todos los elementos químicos más pesados que el hidrógeno y el helio. Lo anterior se realiza mediante reacciones nucleares que ocurren en el centro de las estrellas y otros procesos que actúan en diferentes fases de sus vidas. Por esta razón a continuación se describirán brevemente las tres de las etapas más importantes en la vida de una estrella.

3.1 FORMACIÓN DE ESTRELLAS

Para comprender la formación de las estrellas es necesario separarlas en función de su masa. Las estrellas masivas, es decir las que poseen una masa superior a 8 veces la masa del Sol, están en general a grandes distancias y por ello los mecanismos que gobiernan su nacimiento no son tan bien conocidos. Por el contrario, la formación de estrellas de masa solar se encuentra más documentada. Existen muchas de estas estrellas en nuestras vecindades y por consiguiente han podido ser observadas y estudiadas con detalle. El fragmento de nebulosa que producirá una estrella similar al Sol contiene del orden de dos masas solares y su tamaño es unas cien veces mayor que el del sistema solar. La contracción gravitacional de este fragmento produce calor aumentando la temperatura. Como consecuencia, el gas caliente emite radiación, pero como el medio es muy transparente no queda atrapada, sino que escapa al exterior. El proceso de contracción gravitacional hacia el centro produce un incremento de la densidad central del fragmento nebuloso y provoca la disminución de la transparencia del gas. Por ello, la radiación no puede salir tan fácilmente al exterior e interacciona con las partículas del gas aumentando su temperatura. Cuando han transcurrido varias decenas de miles de años del inicio del colapso, el fragmento adopta la forma de una esfera que tiene un tamaño cercano al de nuestro sistema solar. La región central, opaca y densa, alcanza los 10 000° y adquiere las características de una protoestrella. Su masa continúa aumentando ya que la materia de las regiones externas continúa cayendo hacia el centro. Además, este proceso libera energía que eleva la temperatura interna y genera una fuerza que contrarresta el peso. Sin embargo, es insuficiente para equilibrar la protoestrella que prosigue el colapso hacia el centro reduciendo su tamaño. La protoestrella es un objeto inestable y el motor que gobierna sus propiedades observadas es el gas, calentado por la contracción gravitacional. La temperatura superficial es inferior a la que tiene el

Sol pero su luminosidad es mucho más grande, ya que el tamaño de la protoestrella es aún cien veces mayor. En sus etapas finales, la protoestrella tiene un radio cercano al millón de kilómetros y su masa es similar a la del Sol. En el centro la temperatura alcanza los diez millones de grados y además, las condiciones necesarias para facilitar las reacciones nucleares de fusión del hidrógeno. Durante los siguientes 30 millones de años continúa la contracción. La densidad central aumenta así como la temperatura, que sube hasta los 15 millones de grados. Sin embargo la temperatura superficial ronda los 6000 grados. La energía liberada en los procesos nucleares detiene el colapso, la protoestrella alcanza la estabilidad y aparece "observacionalmente" como una estrella.

Desde que comienza la contracción del fragmento hasta que nace la estrella de tipo solar, transcurren entre 40 y 50 millones de años. Puede parecer mucho tiempo, pero representa tan sólo el 1% de la vida del Sol en la secuencia principal, su etapa evolutiva actual, cuya duración estimada es del orden de 10 mil millones de años. Cuando la masa del fragmento es pequeña, inferior al 7.5% de la masa del Sol, la energía generada por la contracción gravitacional no es suficiente para que el interior de la protoestrella pueda completar las reacciones nucleares que transforman H en He. No se convertirá nunca en una estrella sino en un objeto denominado *enana marrón*.

La primera etapa de la vida de una estrella está caracterizada el modo en que consigue su estabilidad: mediante reacciones nucleares de fusión de hidrógeno, el elemento más abundante. Es la fase más estable y en la pasa una cantidad de tiempo que es inversamente proporcional a la masa. Unos millones de años en el caso de las que tienen mayor masa, que puede ser cien veces la del Sol. Miles de millones de años cuando las estrellas son de masa solar o más pequeña.

3.2 SECUENCIA PRINCIPAL

Al calentarse una protoestrella, se inicia el proceso de combustión nuclear y esta emite luz. Una vez estabilizada la fusión del hidrógeno, se considera que la estrella está en la llamada secuencia principal, fase que ocupa aproximadamente un 90% de su vida. En términos muy simples, después de su infancia, una estrella entra en su madurez, etapa que se caracteriza por ser un período largo de estabilidad en la cual el hidrógeno que almacena en su centro se va convirtiendo

en helio liberando enormes cantidades de energía. En su madurez, una estrella es un cuerpo gaseoso con dos fuerzas en equilibrio: la gravitacional que empuja hacia el centro y la combustión nuclear con empuje hacia fuera. En esta etapa la estrella consume hidrógeno y, como residuo, genera núcleos de helio. La duración de la secuencia principal por tanto depende de la masa de la estrella. Para estudiar la energía liberada por las estrellas y la temperatura de la superficie visible de las mismas (expresada en unidades de temperatura, colores o clase espectral) se emplea un diagrama conocido como diagrama de Hertzsprung-Russell. En este diagrama, Figura 1, la secuencia principal comprende una región diagonal en el diagrama, región en la que se ubican la mayoría de las estrellas conocidas y estudiadas de nuestro universo.

Una vez que la estrella empieza a conformarse como tal, debe respetar dos equilibrios fundamentales durante toda su vida, el térmico y el hidrostático. El equilibrio térmico, puede ser visualizado

como el que toda la energía producida en su interior debe estar balanceada con la energía que es radiada al exterior, y además con su temperatura interna. El segundo equilibrio es el equilibrio hidrostático; en este caso la presión a cualquier profundidad de la estrella debe ser suficiente para compensar el peso de las capas superiores. Ambos equilibrios se mantienen a lo largo de millones de años, hasta que el combustible nuclear empieza a agotarse, cuando esto ocurre la estrella está a punto de entrar en una nueva etapa de su vida y se aproxima a su muerte, esta última etapa esta determinada por una de las características más importantes de una estrella, su masa. Lo anterior se debe a que el tiempo que una estrella requiere para agotar el hidrógeno en su núcleo depende de la masa de la estrella; así por ejemplo, las estrellas de masa extraordinariamente grande, es decir, alrededor de 70 masas solares ($>70M$) requieren de 300.000 años para agotarse, las estrellas de menor masa, menor a las del sol ($<M$), disponen de aproximadamente 200.000 millones de años para agotar sus reservas de hidrógeno.

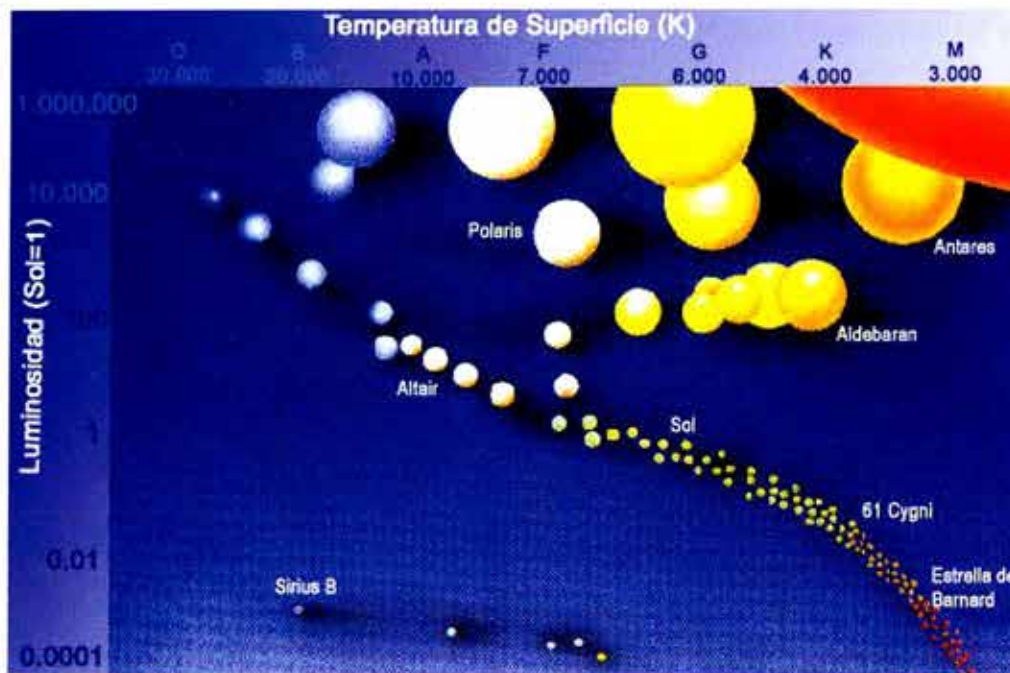


Figura 1. Diagrama de Hertzsprung-Russell.

3.3 MUERTE DE ESTRELLAS

La etapa final de las estrellas, es decir, su ancianidad, transcurre como una Gigante Roja, pero su muerte, más bien, el modo en que mueren, depende decisivamente su masa.

Una estrella, en dependencia de su masa, puede terminar su vida apaciblemente como una enana blanca, pero si tiene mayor masa puede llegar a ser (después de una supernova) una estrella de neutrones o en un caso extremo convertirse en un agujero negro. Lo que ocurre inevitablemente es que las estrellas de algún modo se deshacen de parte de su material; formando las llamadas nebulosas planetarias (quedando luego una enana blanca en su centro), o de otro modo liberan violentamente su material al exterior mediante una supernova. La evolución de nuestro sol, el cual después de convertirse en una gigante roja se convertirá en una enana blanca, se representa en la Figura 2. Las diferentes alternativas de estrellas se describen en la Tabla 3.

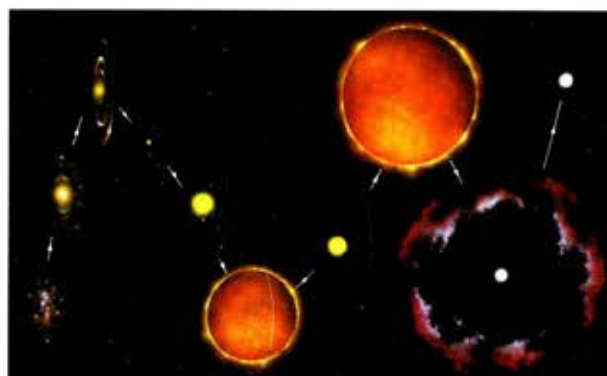


Figura 2. Nacimiento y muerte de nuestro sol: Tras permanecer largo tiempo en la secuencia principal, el Sol pasará por una fase de gigante roja y acabará sus días como una enana blanca.

Tabla 3. Tipos de estrellas y sus características.

ESTRELLA	CARACTERÍSTICAS
Enana Blanca	En la etapa final de una Gigante roja, si la estrella es masiva, la región central de la estrella se contrae y arroja al espacio las capas externas. En su interior queda un tipo de estrella llamada enana blanca la cual tiene el tamaño de la tierra pero la masa del sol.
Supernova	Las estrellas de mayor masa, después de convertir su hidrógeno, pueden seguir quemando los demás componentes para formar elementos más pesados (carbono, oxígeno, neón, magnesio, silicio, y finalmente hierro). Cuando la estrella trata de extraer energía del átomo de hierro, sucede una reacción que absorbe la energía de la estrella. En ese momento la estrella se colapsa, produciendo una gran explosión que la destruye. Su brillo es considerable y puede ser hasta diez mil millones de veces más brillante que el sol. A esto se le llama Supernova.
Estrella de Neutrones	Cuando la estrella sobrepasa el límite de 1.4 masas solares, en su etapa final, la materia se comprime aún más que en una enana blanca y la estrella se vuelve una estrella de neutrones. Su tamaño se reduce a alrededor de 10 kilómetros de diámetro, con mil millones de toneladas por centímetro cúbico de densidad.
Agujeros Negros	Podemos tener una estrella de neutrones en el rango de 1 y 3 masas solares. Si una estrella esta colapsando y tiene más de 3 masas solares, la gravedad no podrá ser contrarrestada de ningún modo. De acuerdo con la teoría de la relatividad, ni siquiera la luz puede escapar de este cuerpo. Es por ello que se les llama agujeros negros.

4. NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL Y ESTELAR

La Nucleosíntesis es el proceso mediante el cual se forman nuevos elementos químicos a partir de reacciones atómicas. La nucleosíntesis primordial se refiere específicamente a la formación de los elementos durante los primeros minutos que siguieron a la Gran Explosión y la nucleosíntesis estelar es este mismo proceso pero realizado en el interior de las estrellas desde la formación del universo material y hasta nuestros días.

Los procesos que condujeron a la nucleosíntesis primordial fueron consecuencia de los sucesos acaecidos en el universo en los primeros instantes de su historia, antes de la formación del universo material Figura 3, y su descripción escapa a los objetivos del presente artículo, por lo tanto continuaremos con la nucleosíntesis estelar.

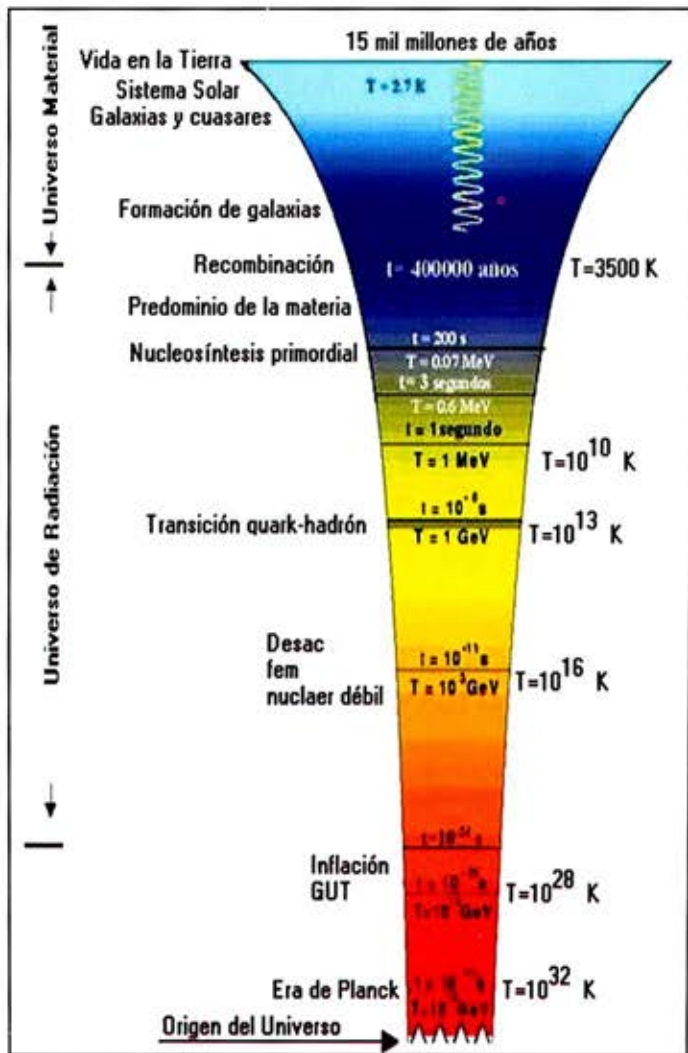


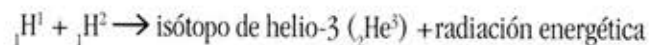
Figura 3. Evolución térmica del universo²

4.1 NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR

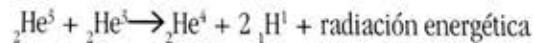
Las reacciones nucleares que se generan en el interior de la estrella, son responsables de los cambios de propiedades que experimenta a lo largo de su vida. El nacimiento de una estrella ocurre cuando la energía interna es capaz de contrarrestar su peso. Para ello, la temperatura en las regiones centrales debe superar los siete 7 millones de grados, condiciones en las que todo el hidrógeno está ionizado, y comienzan las primeras reacciones de fusión que implican a los protones, que son los más abundantes. Por ello este proceso recibe el nombre de **cadena protón-protón (PP)**, la reacción son de la forma:



De los productos de la cadena PP, solamente el deuterio (${}_1\text{H}^2$) participará en futuras reacciones. La segunda reacción importante implica al deuterio y produce un isótopo del helio isótopo (${}_2\text{He}^3$) es:



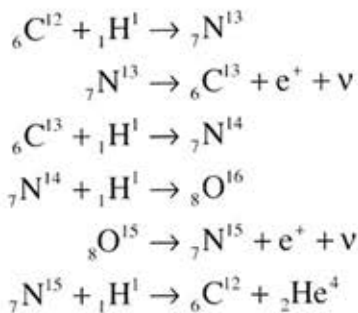
Cuando la temperatura del interior de la estrella alcanza los 16 millones de grados, ocurre la reacción final de la cadena, que origina un núcleo de helio (${}_2\text{He}^4$):



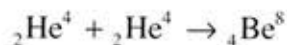
Esto es, son necesarios seis núcleos de hidrógeno, de los que se devuelven dos, para producir un núcleo de helio, conocido también como partícula alfa. Sin embargo el helio no aparece en cantidades significativas en la nucleosíntesis estelar. Hasta tal punto, que modifica poco la abundancia primordial de este elemento. Desempeña más bien un papel de intermediario en la síntesis de núcleos más pesados.

4.2 NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR: MÁS ALLÁ DEL H Y EL HE

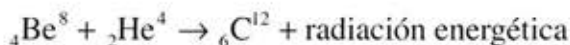
Cuando la nebulosa protoestelar está contaminada por materiales producidos en generaciones de estrellas precedentes, y la protoestrella tiene una masa significativamente mayor que la del Sol, la síntesis del helio recurre a unas reacciones nucleares distintas, conocidas como ciclo CNO (carbono, nitrógeno y oxígeno). Las reacciones son las siguientes:



El carbono producido en la reacción final es utilizado de nuevo. Es un catalizador. Una vez que el reactor ha transformado todo el hidrogeno central en helio, esto es, una vez que ha consumido el combustible, el reactor deja de funcionar, no produce energía. Ninguna fuerza contrarresta el peso de la estrella y deja de estar en equilibrio. Como consecuencia de la inestabilidad ocurre un colapso en el interior que aumenta la densidad hasta los 100000 gramos por centímetro cúbico y la temperatura central asciende a los 100 millones de grados. En estas condiciones ya es posible utilizar el helio como combustible nuclear. Comienza una cadena de reacciones que concluirá con la síntesis de cantidades importantes de carbono.



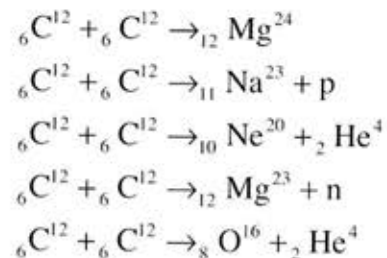
El Be^8 no es estable en la naturaleza. La información sobre sus propiedades proviene, en gran medida, del análisis de muestras introducidas en los aceleradores de partículas. Teniendo en cuenta la alta densidad de los interiores estelares, lo más probable es que reaccione inmediatamente con otro núcleo de helio para producir un núcleo estable de carbono (${}_6\text{C}^{12}$):



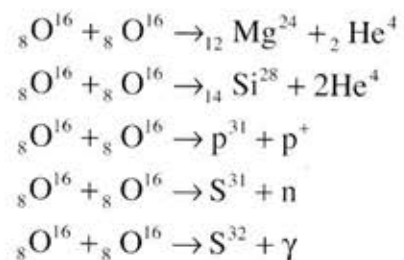
El carbono es uno de los constituyentes más importantes para la vida en la Tierra. Las reacciones anteriores indican que para su creación son necesarios tres núcleos de helio. Por ello, este proceso recibe el nombre de **triple alfa**. La probabilidad de que ocurra mediante reacciones de fusión ordinarias es muy baja y no puede explicar la abundancia de carbono en el universo. Este inconveniente se soslaya si la tercera partícula alfa es capturada mediante una reacción resonante. Ocurre cuando la energía de la partícula capturada es igual a la energía mínima requerida para iniciar la

reacción. Este proceso incrementa grandemente la probabilidad de que un núcleo de Be^8 capture otra partícula alfa. Esta teoría ha sido verificada experimentalmente. La teoría de las reacciones triple alfa facilita la comprensión de muchos otros procesos astrofísicos. Por ejemplo, sabemos que influye en propiedades observadas de las estrellas gigantes y también que es relevante para entender la formación de las primeras estrellas del universo.

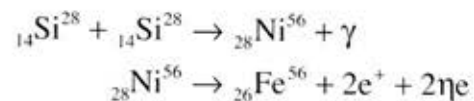
Agotado el helio del núcleo central vuelven a ocurrir contracciones gravitacionales que aumentan la temperatura del interior. A los 600 millones de grados las condiciones son suficientes para producir la fusión del carbono. Así, mediante las siguientes reacciones sucesivas ocurre la síntesis del magnesio, sodio, neón y oxígeno:



El paso por las diferentes etapas evolutivas de la estrella aumenta la densidad y temperatura del interior, facilitando la fusión de núcleos progresivamente más pesados. Así ocurre una cadena de reacciones de las que seleccionamos las siguientes



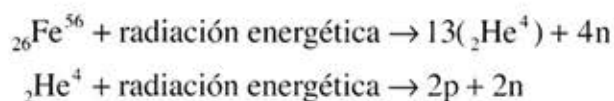
A temperaturas superiores tienen lugar la síntesis del Ni y del Fe:



El níquel-56 se desintegra sucesivamente produciendo finalmente hierro-56 que es estable y aquí debemos hacer un alto pues algo muy particular sucede con el hierro-56.

El núcleo del hierro-56 contiene 26 protones y 30 neutrones que se mantienen juntos gracias a una fuerza nuclear intensa. La energía total de enlace de un núcleo se define como la necesaria para separar sus partículas constituyentes. Pues bien, he aquí la particularidad, *cuando se representa la energía de enlace de un núcleo atómico en función del número de nucleones (protones + neutrones) hay un aumento progresivo hasta alcanzar el hierro-56, disminuyendo luego para los átomos más pesados que este.* La disminución de la energía de enlace más allá del hierro es atribuible a que, en los núcleos más grandes, es más débil la capacidad de la fuerza intensa para contrarrestar la fuerza electrostática entre los protones. Es decir, mediante esta representación se determina claramente que el hierro es el elemento más estable del sistema periódico. Pero ser el más estable no siempre es un atributo positivo. A causa de su gran estabilidad, *el hierro no puede participar en procesos de fusión con otros núcleos.*

Cuando en la estrella, el níquel-56 se desintegra sucesivamente produciendo finalmente hierro-56, el interior de la estrella queda, por consiguiente, constituido por un material inerte que no puede ser utilizado como combustible. Consecuentemente, la estrella como ocurrió ya en otras épocas de su vida, entra en una fase de inestabilidad y las capas internas colapsan hacia el centro que aumenta su densidad y temperatura. Cuando ésta última alcanza valores cercanos a los 5000 millones de grados, la radiación es tan intensa que rompe los núcleos de hierro en un proceso conocido como **FOTODES-INTEGRACIÓN DEL HIERRO**, el cual deshace en un segundo todos los efectos de la fusión nuclear desarrollados durante los millones de años anteriores. Las reacciones del proceso son:



A diferencia de las reacciones de fusión que producen energía, la fotodesintegración la sustrae del medio, enfriándolo y haciéndolo más inestable, hasta el punto que la estrella acaba explotando. Este fenómeno, conocido como **supernova**, es muy luminoso y si la estrella es muy masiva, lanza al medio interestelar una cantidad de materia que equivale al 90% de su masa. La explosión es muy luminosa y la energía en juego equivale a la liberada por el Sol a lo largo de toda su vida. Por ello es posible observar las supernovas que explotan en galaxias muy lejanas, Figura 4.

La creación de los restantes elementos, más pesados que el hierro, tiene lugar mediante la captura de neutrones, que pueden ser lentos, denominados "procesos s", o rápidos, "procesos r". Los primeros intervienen en de forma exclusiva en la producción de elementos comprendidos entre el hierro y el plomo (Pb^{208}) o bismuto (${}_{83}\text{Bi}^{209}$). Pueden transcurrir centenares o miles de años entre capturas sucesivas de neutrones, pero el resultado final es la creación de elementos como el estroncio-88, bario-138, plomo-208. Las condiciones más favorables para que ocurran estas acciones son las estrellas gigantes y las frías. Los procesos r son responsables de la formación de elementos más pesados que el bismuto y el plomo. Son frecuentes en medios donde existe un flujo importante de neutrones, los cuales, antes de desintegrarse, son capturados en gran número por los núcleos. Así ocurre, por ejemplo, durante la explosión de una supernova, y los instantes inmediatamente posteriores. El europio es el elemento más abundante creado mediante procesos r y es fácil de identificar en las estrellas deficientes metálicas, que pueblan el halo que rodea nuestra Galaxia. Hay unos isótopos ricos en protones que no pueden ser producidos en los procesos r ni s, por ejemplo Pt^{190} e Yb^{168} , su síntesis tiene lugar por la captura de protones durante las explosiones de supernovas.



Figura 4. Imagen de la supernova 1987a obtenida en el Observatorio Angloaustraliano. A la derecha la imagen del campo estelar antes de la explosión. La flecha indica la posición que ocupaba la estrella que explotó. A la izquierda, el mismo campo mostrando el incremento de luminosidad producido por la supernova¹.

En estos últimos años se han descubierto dos estrellas, HE0107-5240 y HE1327-2326, que tienen abundancias de hierro que son, respectivamente, 200000 y 300000 veces más pequeñas que la del Sol. HE0107-5240, situada a 36000 años luz, tiene una masa que es un 80% de la del Sol y su edad es del orden de los 13700 millones de años. Fue descubierta en el Observatorio Europeo del Hemisferio Sur, Chile. La distancia a HE1327-2326 es aproximadamente de 4000 años luz y su masa también es inferior a la del Sol. Ha sido observada con el telescopio Subaru. El estudio de las abundancias distintas del hierro es también muy interesante. A pesar de la extrema deficiencia de la abundancia de hierro, las dos estrellas muestran abundancias de carbono que son 25 veces más pequeñas que la del Sol. Otros datos de interés es que la abundancia de litio de HE1327-2326 es significativamente inferior a la de otras estrellas deficientes metálicas y la de nitrógeno 60 veces mayor que en HE0107-5240. Los resultados anteriores apoyan que estas estrellas son muy viejas sin embargo su composición química no es primordial. No pertenecen a la primera generación ya que su formación tuvo lugar en nubes interestelares que ya estaban ligeramente enriquecidas por estrellas aún más primitivas.

5. CONCLUSIONES

Después de un viaje por el universo y hacia la formación, vida y muerte de las estrellas, se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- Las estrellas, en el transcurso de su vida, alteran sustancialmente la composición del gas primigenio inyectándole

material procesado por la nucleosíntesis estelar. Así, el gas comprendido entre las estrellas, el medio interestelar, incrementa progresivamente su contenido en metales. Esto es, todos los elementos excepto el hidrógeno y el helio de acuerdo con la terminología al uso en astrofísica.

- La composición química de las estrellas refleja la del medio en que nacen, las nebulosas del medio interestelar. Al analizar detalladamente la radiación obtenemos información no sólo de los elementos que contienen las atmósferas estelares sino también sobre los que constituían las nebulosas primitivas. Las estrellas con abundancias metálicas extremadamente bajas son muy interesantes por que suministran información sobre las propiedades de las generaciones estelares más primitivas, que generaron los primeros metales.
- La explosión de supernovas es, de lejos, el modo más eficaz de aumentar la abundancia metálica del medio interestelar. Una supernova lanza al medio las capas superiores de la estrella, que fueron procesadas por reacciones de fusión. La materia eyectada durante la explosión contendrá evidentemente hierro, pero no en las cantidades que cabría esperar ya que mayoritariamente permanece en el interior acaba siendo fotodesintegrado.

6. REFERENCIAS

¹ <http://es.wikipedia.org>

² <http://www.cnice.mecd.es>

³ <http://perso.wanadoo.es>

