



revista

remetallica

Departamento de Ingeniería Metalúrgica • Facultad de Ingeniería • Universidad de Santiago de Chile

Año 28, N°17 Septiembre 2008

SANTIAGO • CHILE

ISSN 0790 - 291X





## EDITORIAL

Saludamos afectuosamente a todos nuestros lectores y presentamos un nuevo número de la Revista Remetallica, órgano de difusión de las actividades de los académicos, alumnos y profesionales egresados de nuestro departamento. Como ya es habitual contamos también con la colaboración de profesores invitados de otras universidades del país y del extranjero

En este número presentamos interesantes artículos de divulgación en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales y la metalurgia extractiva. Algunos de ellos fruto de las investigaciones que realizan los académicos del departamento.

Como es reconocido por el medio nuestro departamento presenta una apreciable actividad en el campo de la investigación y desarrollo. Un gran número de proyectos están actualmente vigentes y los productos de estas investigaciones se publican en revistas de alto impacto o se generan patentes de invención.

Junto con lo anterior el Departamento de Ingeniería Metalúrgica cubre todos los aspectos en la formación de Ingenieros Civiles y de Ejecución en Metalurgia además de los Grados de Doctorado y Magíster. Diplomados, Postítulos y cursos de capacitación forman también parte de la gran oferta de educación continua disponibles para los profesionales metalurgistas y de especialidades afines. Los invitamos acercarse a nuestro departamento e informarse al respecto.

Finalmente reiteramos nuestra invitación a participar en nuestra revista ya sea con artículos, notas breves o noticias de interés para el mundo de la metalurgia y los materiales.



# BIO-OXIDACIÓN DE SOLUCIONES PROVENIENTES DE LIXIVIACION ACIDA DE ESCORIAS

C. Vargas y J. Simpson

*Departamento de Ingeniería Metalúrgica – Facultad de Ingeniería  
Universidad de Santiago de Chile, USACH  
Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 3363  
Santiago, Chile  
cristian.vargas@usach.cl*

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue obtener información acerca de un proceso combinado de lixiviación ácida de escoria y bio-oxidación de la solución resultante para producir una solución de sulfato férrico con 30 g/L de Fe, la cual se podría utilizar para la precipitación de arsénico.

Las pruebas se realizaron utilizando mini-columnas de lixiviación de escoria con ácido sulfúrico a 20°C y 2 sistemas de bio-oxidación de la solución de sulfato ferroso, uno correspondiente a 4 bio-reactores agitados en forma mecánica y operados en serie (escala de banco de 60 L, 25°C), y otro correspondiente a 4 columnas de burbujeo operadas en serie (bio-reactores agitados con aire a escala piloto de 360 L, 20°C).

La velocidad de bio-oxidación observada en las columnas de burbujeo fue significativamente menor que la obtenida en las pruebas realizadas en bio-reactores con agitación mecánica. También se observó una disminución de la velocidad de bio-oxidación del Fe(II) en la medida que aumentó la concentración de Fe(III) en cada etapa de reacción. Las mayores velocidades de oxidación observadas correspondieron a los reactores que contenían una mayor población de microorganismos.

La solución ferrosa obtenida de la lixiviación de escoria se puede oxidar para formar sulfato férrico utilizando para ello cepas autóctonas de bacterias acidófilas hierro-oxidantes aisladas de un tranque industrial.

Como conclusión general se puede mencionar que en este estudio se han obtenido resultados muy promisorios que permiten respaldar el diseño de un proceso de lixiviación ácida de escoria para obtener soluciones de sulfato ferroso. Se requiere usar una solución lixivante de 70 g/L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para obtener una solución de sulfato ferroso a pH 1,5-2, cuya concentración sea 32 g/L de Fe (II). Sin embargo, se deberán hacer desarrollos adicionales a los presentados en este estudio, de modo de aumentar la velocidad de biooxidación del sulfato ferroso mediante el aumento de población bacteriana en los bioreactores.

**Palabras claves:** bio-oxidación, escoria, lixiviación ácida, sulfato férrico, sulfato ferroso.

## 1. INTRODUCCION

Entre el 80 y el 90 % de los recursos cupríferos nacionales se encuentran en la forma de sulfuros de cobre, por ello gran parte del metal producido en el país se obtiene a través de procesos pirometalúrgicos. De ello dan cuenta las 7 fundiciones de cobre que existen en la actualidad en Chile, estas exhiben una de las mayores densidades de este tipo de industrias en el mundo en relación a su superficie y población.

Todas estas fundiciones registran importantes niveles de producción, que llevan asociados la generación de un gran volumen de desechos, residuos y subproductos, siendo las escorias de fundición uno de los más importantes. Por cada tonelada de cobre obtenido, se generan 2,2 toneladas de escorias pirometalúrgicas. Se estima que cada año se producen 4,5 millones de toneladas de estos residuos y que el volumen histórico acumulado bordea los 50 millones.

El manejo de estas escorias supone costos significativos para las empresas –mano de obra, transporte, movimiento de maquinaria pesada– a la vez que representan un problema ambiental por los impactos que pueden ocasionar. Dentro de las técnicas de precipitación de arsénico, la precipitación como arseniato férrico básico con Fe (III) es la más usada. Para bajar el contenido de As a < 0,05 mg/L la relación molar Fe/As debe ser mayor de 3, por lo que la principal desventaja de este proceso es la adición Fe (III). Además, la presencia de fosfatos, sulfatos, carbonatos y especies orgánicas influye en la separación de As. Otros métodos como la encapsulación con cal o cemento, o la fijación a alta temperatura en materiales cerámicos, son cuestionables por su elevado costo y dudable estabilidad a largo plazo.

De acuerdo a los estudios de caracterización, entre los compuestos de las escorias es posible encontrar cobre (1%), hierro (40%), sílice (30%),

molibdeno (0,3–0,4%), oro (0,05 g/ton) y plata (0,2 g/ton). Estos productos que pueden ser aprovechados de diversas formas: el cobre puede ser reutilizado en fundición; el hierro, en concentrados, sirve para la fabricación de acero; la sílice tiene aplicaciones en materiales cerámicos y lanas minerales y el molibdeno, en aceros de corte y filamentos; y en lubricantes sólidos y pigmentos, en la forma de sulfuros.

Además de esto, y dado que el contenido de hierro en las escorias alcanza porcentajes de 40% en promedio, surge la iniciativa de lixiviar escorias para la solubilización de hierro. En cuanto a la utilización de estas soluciones, una alternativa a estudiar sería la bio-oxidación de las soluciones provenientes de la lixiviación, para obtener una determinada concentración de ión férrico que pudiera utilizarse como un agente para la precipitación de arsénico.

En los últimos tiempos, la biotecnología se ha convertido en una alternativa viable para la extracción de los valores presentes en las menas, así como para la recuperación de metales presentes en soluciones acuosas contaminantes. En el sector minero metalúrgico, los procesos biotecnológicos han logrado ser aplicados con éxito en la lixiviación de cobre y uranio, y en el pretratamiento de sulfuros auríferos refractarios.

La bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans* es una bacteria del género *thiobacilli* quimiolitotrófica, que es capaz de oxidar ion ferroso y compuestos reducidos de azufre en soluciones de ácido sulfúrico en presencia de oxígeno. En ambientes anóxicos es capaz de utilizar ión férrico como oxidante para la oxidación de azufre (Brock y Gustafson, 1976), sulfuros (Das y Mishra, 1996), hidrógeno (Drobner et al., 1990) y de algunos compuestos orgánicos (Pronk et al., 1991). La energía obtenida de los procesos oxidativos se utiliza en la fijación de dióxido de carbono, mantenimiento celular y de crecimiento.

Estos microorganismos se han estudiado ampliamente al comprobarse su contribución en la bio-lixiviación de una variedad de minerales sulfurados (Brierley and Brierley, 1999; Hansford and Vargas, 2001). En muchos casos, la bio-lixiviación ofrece ventajas económicas, técnicas y genera menor impacto ambiental que los procesos pirometalúrgicos de tratamiento de sulfuros. Plantas comerciales de bio-lixiviación para concentrados refractarios de pirita/arsenopirita operan en Sudáfrica, Ghana, Australia y Brasil; y bio-lixiviación en pilas de minerales de cobre se realiza en Chile, Estados Unidos, Australia y Bulgaria (Brierley and Brierley, 1999).

Además de la disolución de sulfuros metálicos, la habilidad de *Acidithiobacillus ferrooxidans* para oxidar ión ferroso ha sido explotada en bioprocesos con relación al tratamiento de aguas (drenajes) ácidas de mina, en procesos de desulfuración de carbón mineral, oxidación de H<sub>2</sub>S en

gas natural y tratamiento de residuos orgánicos (Nemati et al., 1998). Estas aplicaciones muestran que la oxidación biológica de sulfato ferroso es una operación unitaria de relevancia industrial. Dada su importancia creciente la oxidación bacteriana de sulfato ferroso ha sido estudiada en las últimas décadas.

En este trabajo se evalúa la lixiviación ácida de escorias y la utilización de bacterias para la oxidación del hierro presente para obtener sulfato férrico en solución, posible de utilizar en la precipitación de arsénico desde soluciones acuosas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron diversas pruebas de caracterización de escoria, curado y lavado de escoria, lixiviación de escoria en columnas, adaptación y propagación de inóculo bacteriano y bio-oxidación.

### 2.1 Caracterización de escoria.

Se trabajó con muestras de escoria granallada proveniente de una Fundición de Cobre Nacional. Una muestra inicial de escoria de 500 kg fue homogenizada y cortada para luego sacar ordenadamente, las diversas cargas para realizar los respectivos ensayos posteriores. Se cortaron dos sub-muestras, una se pulverizó a 100% -150# (104 micrones) para realizar análisis químico de cabeza y a la otra se le realizó una caracterización mineralógica la cual fue analizada por medio de microscopía óptica.

### 2.2 Curado y lavado de escoria.

Se realizaron 9 pruebas de curado en botellas utilizando muestras de 1 kg de escoria, 2 dosis de ácido sulfúrico concentrado (50 y 200 kg/ton) y 3 tiempos de curado (1, 2 y 4 días). Las condiciones experimentales se muestran en la Tabla I. De acuerdo a antecedentes de ensayos previos para la lixiviación de escoria se conocía que este material era un gran consumidor de ácido, luego las dosis de ácido definidas para el curado se eligieron en forma conservadora para minimizar el consumo de ácido, reducir también la solubilización indeseada de la sílice y lograr también el agotamiento del ácido adicionado, de modo de tener soluciones con un pH en el rango 1,5-2,0 una vez lixiviado el material, las cuales son adecuadas para una posterior operación de bio-oxidación.

### 2.3 Lixiviación en mini-columnas.

Se realizaron 5 pruebas de lixiviación de escoria en mini columnas de 30 cm. de altura y 2" de diámetro, con carga de 1,0 kg. de escoria previamente curada, en las siguientes condiciones:

- 1) Columna cargada con escoria fresca
- 2) Columna cargada con escoria humectada (Kg. agua/ton definida en la humectación)
- 3) Columna cargada con escoria curada con 50 Kg. ácido/ton más adición de agua.
- 4) Columna cargada con escoria curada con 125 Kg. ácido/ton más adición de agua.
- 5) Columna cargada con escoria curada con 200 Kg. ácido/ton más adición de agua.

Para cargar las columnas las muestras de escoria previamente curadas con ácido se dejaron reposar considerando el mejor tiempo obtenido en las pruebas de curado respectivas, antes de comenzar el riego (el tiempo de curado se definió entre 1 y 4 días, de modo que el pH de la solución de lavado fuera >1,5. Las columnas fueron regadas con solución acuosa de ácido sulfúrico (70 g/L con una tasa de riego de 12 L/h/m<sup>2</sup>).

#### 2.4 Lixiviación de escoria en columna de 1 metro.

Se realizaron pruebas de lixiviación de escoria en columnas pequeñas de 15 cm. de diámetro, las cuales fueron cargadas con 15 y 20 kg. de escoria, generando alturas de carga de 54 y 71 cm., respectivamente. También se realizó una prueba en una columna de 19 cm. de diámetro y de 1 metro de altura, la cual fue cargada con 65,66 kg. de escoria. A todas se les aplicó una tasa de riego de 12 L/h/m<sup>2</sup> utilizando una solución de riego con concentración de ácido de 70 g/L.

#### 2.5 Crecimiento y propagación de inóculos.

El crecimiento de los microorganismos se realizó en frascos con volúmenes de cultivo entre 100 y 300 cm<sup>3</sup>, agitados sobre una mesa de rodillos. Cada frasco se alimentó con una cierta cantidad de inóculo de bacterias (10-100 cm<sup>3</sup>), luego se agregó Fe (II) generado por lixiviación de escoria con ácido sulfúrico en concentraciones de 2 a 20 g/L. El pH de control se fijó en 1,8 y la temperatura en 25°C.

La estrategia de propagación del inóculo para lograr un gran volumen de microorganismos activos consistió en realizar trasпасos y cultivos feedbatch desde las botellas agitadas sobre rodillos a reactores agitados con aire. La alimentación de Fe(II) en el rango 2-15 g/L se realizó en forma gradual a cada botella/reactor para lograr mantener así la fase de crecimiento exponencial de los microorganismos en el tiempo y a un pH definido en 1,8, en la medida que se fue aumentando el volumen de reacción. El volumen de reacción se fue aumentando en forma gradual en la medida que se desarrollaron los microorganismos utilizando para ello

medio de cultivo MS9B y también agua de tranque.

#### 2.6 Bio-oxidación en reactores agitados.

Se realizó un conjunto de pruebas de bio-oxidación para una solución de alimentación que contiene 30 g/L de Fe (II), procedente de la lixiviación de escoria con ácido sulfúrico. Estas pruebas se realizaron en un sistema de 4 reactores agitados, operados inicialmente en forma feedbatch para generar las condiciones de operación óptimas (15 L de solución por reactor e inóculo adaptado). Posterior a ello, se definieron cuatro etapas de operación, consistentes en:

**Etapas I:** en régimen batch se operó hasta alcanzar el nivel de Fe total de 30 g/L en cada uno de los reactores por medio de adición de solución de lixiviación de escoria y sal de sulfato ferroso.

**Etapas II:** inicio de operación continua con un programa de 15 puntos de medición con los siguientes parámetros de operación:

- Fe III salida = 30 g/L
- Fe total entrada = 32 g/L
- T° reactor = 25 °C
- Flujo Alimentación = 2 L/día
- pH reactor = 1.5
- [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = ajustado para obtener un pH = 1,5 en reactores
- Flujo O<sub>2</sub> = 1 VVM cte.
- RPM = 350 – 450 cte

**Etapas III:** Fin de régimen continuo e inicio de operación batch. Tiempo de operación de 5 días, con dos muestreos por día.

**Etapas IV:** operación en continuo con un flujo de alimentación de 4 L/día, mediciones dos veces por día durante 7 días.

Las pruebas de bio-oxidación en reactores agitados se realizaron en condiciones controladas de temperatura (23-26°C), de pH (1,4-1,8) y de aireación (1 VVM).

#### 2.7 Bio-oxidación en columnas de burbujeo.

Se realizó un conjunto de pruebas de bio-oxidación para una solución de alimentación que contiene 30 g/L de Fe(II), procedente de la lixiviación de escoria con ácido sulfúrico. Estas pruebas se realizaron en un sistema de 4 columnas agitadas, operadas inicialmente en forma feedbatch para generar las condiciones de operación óptimas (90 L de solución por reactor e inóculo adaptado). Posterior a ello se definieron cuatro etapas de operación, en forma análoga a la operación del sistema de 4 bio-reactores agitados como se presentó anteriormente. Estas pruebas se realizaron en condiciones controladas de temperatura, pH y aireación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1 Caracterización de la escoria.

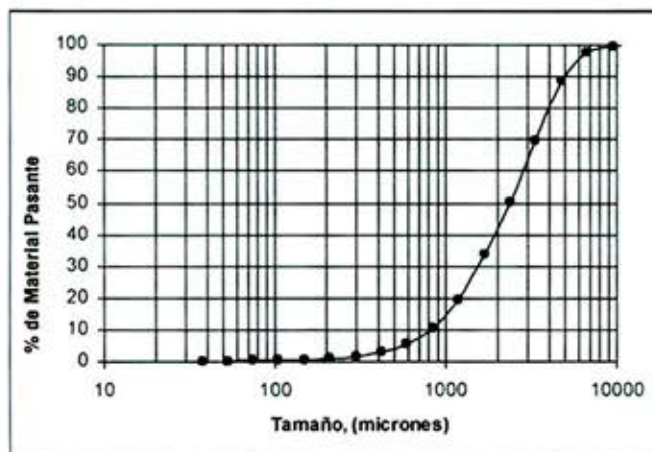
La composición química de la muestra de escoria se puede observar en la tabla I. El contenido de hierro soluble en ácido es 36,8%, observándose que el hierro disuelto correspondía principalmente a hierro ferroso. Además, se puede observar que entre los elementos más representativos están el hierro, silicio, calcio, aluminio, cobre potasio, sodio, azufre, magnesio, molibdeno, titanio, zinc, y fósforo. Los principales componentes trazas de la escoria correspondieron a cromo, plomo, arsénico, antimonio y cobalto.

Tabla I. Composición química de la muestra de escoria

Especie	Unidad	Valor Medido	Especie	Unidad	Valor Medido
Fe (tot)	%	52,26	As(To)	gr/ton	147
Fe (soluble)	%	36,77	Ba	gr/ton	140
Si	%	13,60	Sb	gr/ton	140
Al	%	2,00	Co	gr/ton	134
Cu	%	1,25	Mn	gr/ton	129
K	%	0,61	V	gr/ton	74
S	%	0,46	Bi	gr/ton	68
Mg	%	0,41	Sr	gr/ton	67
Mo	%	0,38	Ni	gr/ton	27
Ti	%	0,36	W	gr/ton	20
Na	%	0,26	Ag	gr/ton	2,4
Zn	%	0,14	Ca	gr/ton	1,9
P	%	0,11	Be	gr/ton	<0,5
Cr	gr/ton	351	Cd	gr/ton	<0,5
Pb	gr/ton	231			

El análisis granulométrico de la escoria entregó la curva que se presenta en la figura 1. La muestra de escoria presentó una distribución granulométrica caracterizada por un P80 de 4 mm y con un bajo contenido de finos (20% < 1,2 mm).

Figura 1. Análisis granulométrico de la muestra de cabeza de escoria.



#### 3.2 Curado y lavado de escorias.

Los resultados de las pruebas de curado y lavado de escoria se presentan en la figura 2. Estos resultados muestran una mayor extracción del hierro presente en la escoria en la medida que se incorporó mayor cantidad de ácido. Sin embargo, una mayor adición de ácido requiere un mayor tiempo de curado, de modo de lograr una solución de lavado con un pH >1,5, la lixiviación de la escoria debe permitir la compatibilidad de la solución resultante con la operación posterior de bio-oxidación del sulfato ferroso disuelto. De acuerdo a estos resultados, la mejor tasa de adición de ácido sería de 140-160 g/L, con un tiempo de curado máximo de 1 día.

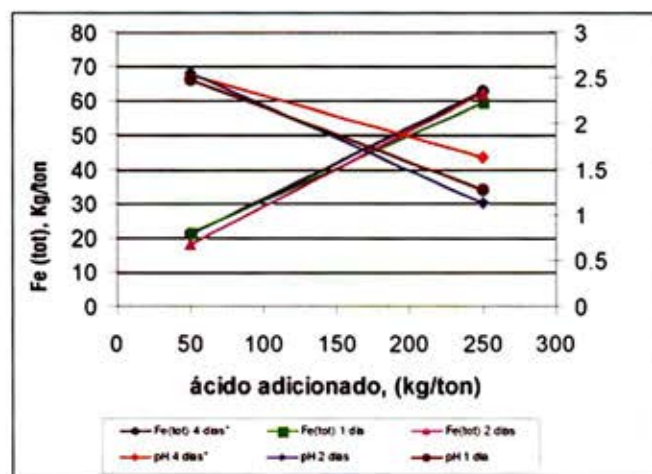


Figura 2. Resultados de las pruebas de curado de escoria.

#### 3.3 Lixiviación en mini-columnas.

En la figura 3 se presentan los resultados de la lixiviación de escoria en mini-columnas de 30 cm de altura y 2" de diámetro con el material fresco y previamente curado. Se realizaron pruebas en 5 columnas. Las columnas 3 y 4 fueron cargadas con material previamente curado con 50 y 125 kg ácido/ton, estas columnas presentaron efluentes de alta concentración de Fe(II) durante los primeros dos días de operación en riego, mostrando el efecto favorable de la sulfatación producto de la adición inicial de ácido. Se observó que a partir del tercer día de operación las columnas presentaron una dinámica muy similar, variando la concentración efluente entre 20 y 40 g/L.

Se observó una mejor operación y disolución de hierro en las columnas cargadas con escorias previamente curadas. La columna 4, cargada con escoria curada con 125 kg ácido/ton, presentó una alta compactación que impidió su lixiviación, por lo cual no se obtuvieron resultados en esta prueba por la cual tampoco se agregó al gráfico de datos de la figura 3 (el resultado de esta prueba fue completamente inesperado y no se tiene una explicación. Se piensa que esta consolidación del material podría también ocurrir en el interior de una pila, alterando su funcionamiento hidráulico normal).

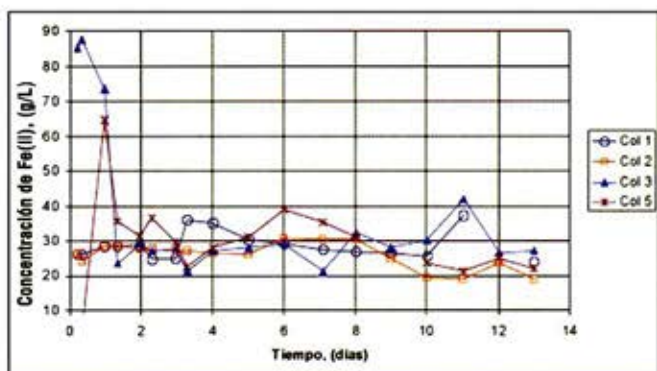


Figura 3. Resultados de la lixiviación de escoria mini-columnas.

A continuación, se presentan los resultados de dos pruebas de lixiviación de escoria, realizadas en columnas pequeñas de 15 cm. de diámetro, las cuales fueron cargadas con 15 y 20 Kg. de escoria cada una, generando alturas de carga de 54 y 71 cm., respectivamente. Se aplicó una tasa de riego de 12 L/h/m<sup>2</sup> utilizando una solución de riego con concentración de ácido de 70 g/L.

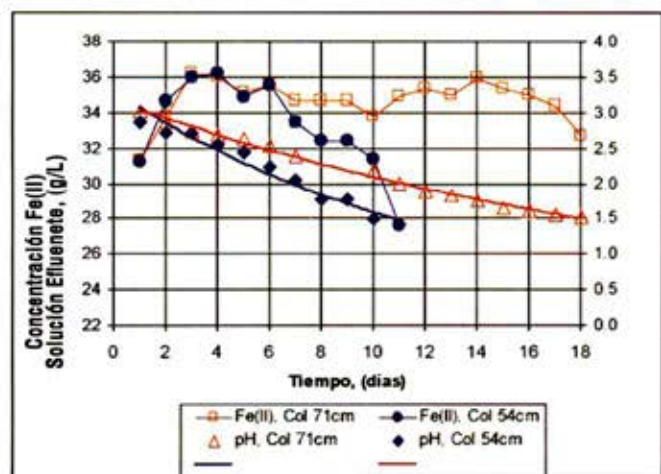


Figura 4. Resultados de la lixiviación de escoria en mini columnas de 54 y 71 cm. de altura.

Los resultados de estas pruebas mostraron que inicialmente se produjo el mayor consumo de ácido, con una consiguiente baja de la concentración de sulfato ferroso en la solución efluente de las columnas junto con el pH de éstas. En la medida que se prosigue con el riego de ambas columnas el efluente se va acidificando cada vez más, junto con la reducción en la concentración de Fe (II), en el efluente, producto del agotamiento paulatino de la escoria con el tiempo de operación de esta columna. La columna de 71 cm. operó en forma relativamente estable por un periodo de 18 días de operación, observándose concentraciones de Fe(II) superiores a los 32 g/L. Los consumos de ácido para ambas columnas considerando 10 días de operación en la columna de 54 cm de altura y 18 días de operación en la columna de 71 cm. de altura fueron 313 y 415 Kg. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton de escoria, respectivamente.

A continuación se presentan los resultados de una pruebas de lixiviación de escoria, realizada en columna de 19 cm. de diámetro y 1 m de altura, la cual fue cargada con 65,66 Kg. de escoria. Se aplicó una tasa de riego de 12 L/h/m<sup>2</sup> utilizando una solución con concentración de ácido de 70 g/L. Los resultados cinéticos de lixiviación de la escoria se presentan en las figuras 4.6 y 4.7.

El comportamiento cinético de estas columnas fue similar al presentado en las pruebas de lixiviación anteriormente mencionadas. En este caso la operación se extendió hasta 63 días de riego, fijando como término de la prueba un pH = 1,3 en la solución efluente de la columna. Los resultados cinéticos presentados en las figuras anteriores muestran un consumo de ácido lineal, llegando a un consumo final de 458 kg de ácido/ton de escoria. En el periodo inicial de operación se observó un efluente de muy baja acidez (pH > 3), observándose también un bajo potencial redox (525 mV), lo cual se asociaría a una disminución en la concentración de Fe(III) posiblemente por hidrólisis dentro de la columna de escoria. A las 2 semanas de operación, el pH se reduce a 2.5 y comienza una disolución paulatina del férrico precipitado, lo cual se evidencia por el aumento de potencial redox de la solución efluente. La operación de esta columna mostró que es posible disolver parcialmente la escoria con ácido sulfúrico y lograr un efluente de concentración de Fe(II) mayor que 30 g/L durante 50 días de operación.

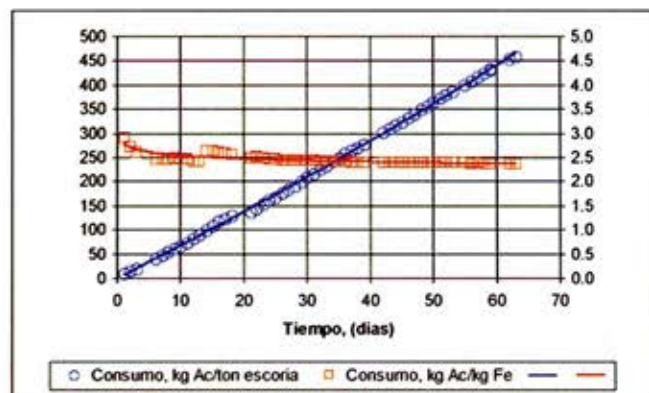
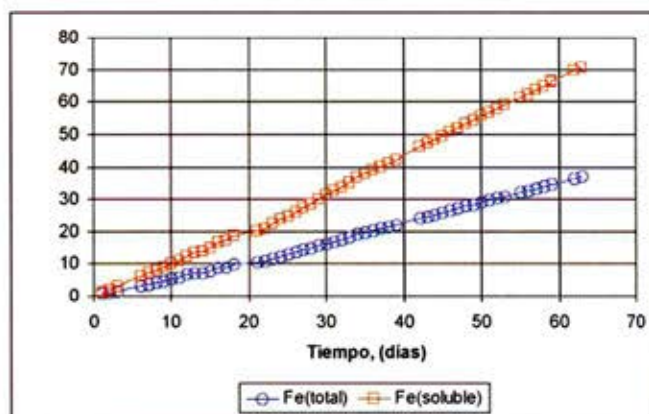


Figura 5. Resultados de la Lixiviación de Escoria en Columna de 1m de altura y 0,19m de diámetro (continuación).

### 3.4 Crecimiento y propagación de bacterias.

El crecimiento y propagación inicial de bacterias se estudió en rodillos agitados. El objetivo de esta etapa fue corroborar el crecimiento de las bacterias. En la tabla II se presentan los resultados de las pruebas de crecimiento y propagación de inóculos.

**Tabla II. Resumen de resultados de pruebas crecimiento y propagación de inóculos en frascos agitados sobre rodillos.**

Inóculo 1					
Frasco agitado	día	pH	Potencial, mV	Fe(II), g/L	N° bact/cm3
9	1	1,2	475		
cultivo original	9	0,69	704	1,31	
5	1	1,76	614	4,6	
5cc Inoc + Fe(II)	4	1,79	629	4,6	5,00 E+05
6	1	1,84	615	4,16	
5cc Inoc Conc+ Fe(II)	4	1,81	631	4,16	
Inóculo 2					
Frasco agitado	día	pH	Potencial, mV	Fe(II), g/L	N° bact/cm3
8	1	2,88	758	< 0,06	
cultivo original	7	1,8 (ajust)	805		
1	1	1,81	594	2	
180cc Inoc + Fe(II)	4	1,87	632	1,36	3,75 E+06
2	1	1,77	582	4,93	
180cc Inoc + Fe(II)	4	1,84	618	4,6	
3	1	1,70	578	9,41	
180cc Inoc + Fe(II)	4	1,81	618	7,66	
4	1	1,58	578	17,62	
180cc Inoc + Fe(II)	4	1,77	618	14,45	3,50 E+06
7	1	1,86	584	4,27	
5cc Inoc conc + Fe(II)	4	1,79	616	4,16	9,20 E+07

En la tabla anterior se observa que para obtener una buena cantidad de bacterias (106 bacterias/cm3 y superior) se puede trabajar con 5cm3 de inoculo concentrado en conjunto el ión ferroso.

El crecimiento y propagación final de los microorganismos hierro oxidantes se realizó en cada uno de los 4 bio-reactores, para ello se fue aumentando el volumen de cada reactor y la concentración de sulfato ferroso en forma periódica, de acuerdo al ritmo de crecimiento de los microorganismos. El tiempo total fue de 45 días para tener los bio-reactores activos, en las condiciones de proceso requeridas, este tiempo se considera como el periodo de puesta en marcha.

A los 18 días de operación se observó una población de microorganismos en los reactores, conteo obtenido mediante recuento directo al microscopio, de 3,5x106 – 3,6x107 bacterias/cm3 en la solución.

Al término del periodo de puesta en marcha de los bio-reactores, se observó un pH = 1,38-1,42 y una concentración de Fe(tot) = 30,3-31,8 g/L. La concentración de ferroso alcanzada en cada uno de los bio-reactores fue:

- Bio-reactor 1, 17 g Fe(II)/L
- Bio-reactor 2, 12 g Fe(II)/L
- Bio-reactor 3, 8,6 g Fe(II)/L
- Bio-reactor 4, 2 g Fe(II)/L.

### 3.5 Pruebas de bio-oxidación en sistema de 4 reactores agitados en serie y en continuo (flujo 2 L/día).

El sistema de 4 reactores agitados conectados en serie fue operado en forma continua por 8 días, utilizando un flujo de alimentación fresca de 2 L/día con una solución ferroso proveniente de la lixiviación de escoria, la cual tenía un pH = 1,5-1,6 y una concentración de Fe(total) = 31-33 g/L. En la Tabla III se presenta la composición de la solución final a los 8 días de operación y las velocidades de bio-oxidación logradas en cada bio-reactor. Se observó también una disminución de la velocidad de bio-oxidación del Fe(II) en la medida que aumentó la concentración de Fe(III) en cada etapa de reacción.

**Tabla III. Composición de la Solución Final de Operación de Bio-reactores Agitados en Operación Continua con un flujo de 2L/día.**

Variable	Solución Reactor 1	Solución Reactor 2	Solución Reactor 3	Solución Reactor 4
Fe(tot), (g/L)	27,3	27,2	19,6	27,1
Fe(II), (g/L)	17,9	9,1	0,6	0,0
Fe(III), (g/L)	9,4	18,1	19,0	27,1
pH	1,46	1,48	1,55	1,45
Eh, (mVolts)*	648	678	752	839
Bacterias, (bact/cm3) Recuento microscópico	1,4x108	3,3x108	3,5x109	4,2x108
Velocidad de bio-oxidación, (kg Fe(II)/m3 reactor/día)	2,0	1,9	1,3	0,5

La solución obtenida luego del paso de la solución por los 4 reactores presenta un contenido final de ión férrico de 27,1 g/l, muy cercano a 30 g/L que es el valor que se desea lograr. Esta concentración es igual a la del hierro total, por lo que estas pruebas entregan que al final de los ensayos todo el contenido de hierro es a la forma de ión férrico. Esto también se corrobora con los valores de potencial electroquímico el cual se incrementa al avanzar la solución a través de los reactores. Asimismo

la velocidad de bio-oxidación va disminuyendo a medida que la solución avanza; esto es consistente pues la cantidad de ión ferroso presente va disminuyendo hacia el cuarto reactor.

### 3.6 Pruebas de bio-oxidación en sistema de 4 reactores agitados en serie y en continuo (flujo 4 L/día).

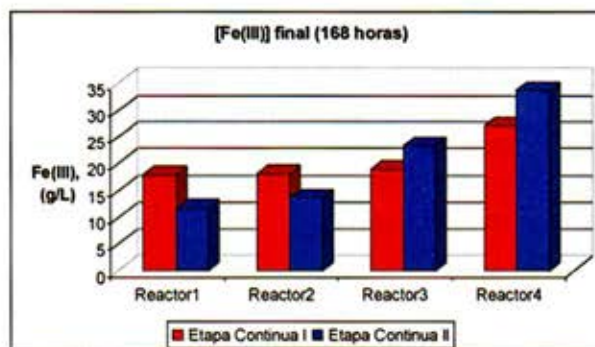
En la tabla IV se presenta la composición de la solución final a los 8 días de operación y las velocidades de bio-oxidación logradas en cada bio-reactor.

**Tabla IV. Composición de la solución final de Operación de Bio-reactores Agitados en Operación Continua con un flujo de 4L/día.**

Variable	Solución Reactor 1	Solución Reactor 2	Solución Reactor 3	Solución Reactor 4
Fe(tot), g/L	33,0	23,0	29,7	34,7
Fe(II), g/L	21,2	9,3	6,4	1,0
Fe(III), g/L	11,8	13,7	23,3	33,7
pH	1,30	1,32	1,30	1,30
Eh, mVolts *	660	689	705	764
bacterias, bact/cm3 Recuento microscopio	1,6x10 <sup>8</sup>	1,6x10 <sup>8</sup>	4,2x10 <sup>8</sup>	5,5x10 <sup>8</sup>
velocidad de bio-oxidación, (Kg. Fe(II)/m3 reactor/día)	4,5	3,8	1,8	1,0

Se observó un aumento en la concentración de sulfato férrico en cada etapa de reacción. El primer bio-reactor fue capaz de oxidar entre el 40 y el 50% del sulfato ferroso contenido, lográndose efluentes de esta etapa con concentraciones entre 12 y 16 g/L. El resto de las etapas presentó una menor productividad debido al aumento en la concentración de sulfato férrico (agente inhibidor del desarrollo de microorganismos hierro-oxidantes), requiriéndose de 3 etapas de bio-oxidación para llegar a niveles de 20 g Fe(III)/L y de 4 etapas para llegar a los 30 g Fe(III)/L. Se observó también una disminución de la velocidad de bio-oxidación del Fe(II) en la medida que aumentó la concentración de Fe(III) en cada etapa de reacción.

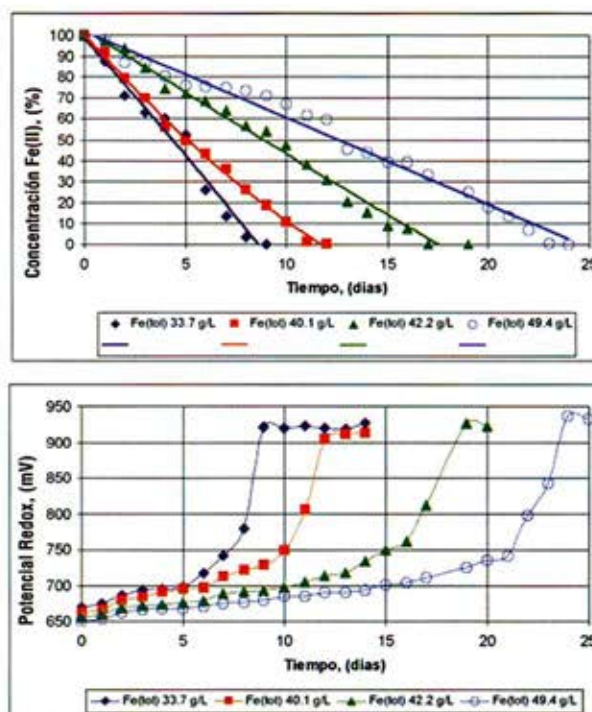
En la figura 6 se presenta una comparación en el contenido de ión férrico de la solución final en función del flujo de solución. Se observa que en los 2 primeros reactores la concentración de ión férrico es menor cuando se trabajó con un flujo de 4 L/día, pero en los 2 últimos reactores la concentración de férrico fue mayor cuando se trabajó con el flujo antes descrito. Con este flujo se alcanzó una concentración final de 33,7 g/l de férrico, valor adecuado a los objetivos planteados.



**Figura 6. Resultados de operación de los Bio-reactores en Continuo (Valores de concentración de Fe(III) a los 7 días de operación estable).**

### 3.7 Pruebas de determinación de inhibición de la actividad bacteriana.

Las pruebas se realizaron en frascos agitados con 100 cm<sup>3</sup> de solución total. Para ello se tomaron 50 cm<sup>3</sup> de inoculo y se completaron con 50 cm<sup>3</sup> de una solución de sulfato ferroso cuya concentración alcanzaba al valor final necesario. El ajuste en las concentraciones se realizó mediante la adición de sulfato ferroso recristalizado. El sistema se dejó evolucionar en el tiempo y se midió Eh, Fe(II) y Fe(tot), adicionalmente el pH se ajustó a 1,3 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Los resultados de estas pruebas se presentan en la Figura 7, donde se observa una disminución significativa de la velocidad de oxidación, en la medida que se aumentó la concentración de Fe(total) en la solución. Esto se debe a una inhibición por la presencia de sulfato férrico en cantidades crecientes al aumentar el tiempo de operación.



**Figura 7. Resultados de pruebas bio-oxidación batch para concentraciones crecientes de Fe(total)**

### 3.8 Pruebas de bio-oxidación en columnas de burbujeo.

Se realizaron nuevas pruebas de bio-oxidación pero esta vez en columnas de burbujeo. Los resultados de estas pruebas se presentan en las tablas V y VI.

**Tabla V. Resumen de Resultados de la Bio-oxidación en Columnas (Operación en continuo, flujo de alimentación 10 L/día)**

TIEMPO OPERACIÓN (Horas)	Col.1 pH	Col.2 pH	Col.3 pH	Col.4 pH	Col.1 POTENCIAL (mV)	Col.2 POTENCIAL (mV)	Col.3 POTENCIAL (mV)	Col.4 POTENCIAL (mV)
0	1,28	1,53	1,58	1,46	650,2	684,0	719,4	880,3
24	1,40	1,34	1,64	1,56	645,2	674,9	715,5	887,8
48	1,24	1,28	1,52	1,38	648,8	676,0	712,8	882,2
72	1,29	1,26	1,50	1,39	655,1	679,5	726,7	819,5
96	1,29	1,26	1,49	1,36	656,0	679,9	724,6	884,0
120	1,32	1,25	1,48	1,38	657,9	682,0	725,6	878,1
144	1,29	1,24	1,47	1,38	649,9	676,2	715,7	894,3
168	1,32	1,28	1,39	1,38	657,7	683,4	722,9	907,0
192	1,35	1,32	1,50	1,43	648,4	672,5	704,6	916,3
216	1,36	1,29	1,47	1,40	650,5	675,8	712,3	910,9
240	1,41	1,25	1,29	1,47	647,4	673,9	697,9	867,4
264	1,26	1,25	1,26	1,40	644,0	668,4	692,7	892,7
288	1,26	1,30	1,27	1,40	647,3	670,3	692,6	852,5
312	1,31	1,30	1,26	1,38	651,1	671,7	695,0	838,5
336	1,36	1,33	1,27	1,33	650,6	672,8	697,7	819,5

**Tabla VI. Resumen de Resultados de la Bio-oxidación en Columnas (Operación en continuo, flujo de alimentación 10 L/día), Continuación.**

TIEMPO OPERACIÓN (Horas)	Col.1 Fe (Total) (g/L)	Col.2 Fe (Total) (g/L)	Col.3 Fe (Total) (g/L)	Col.4 Fe (Total) (g/L)	Col.1 Fe (II) (g/L)	Col.2 Fe (II) (g/L)	Col.3 Fe (II) (g/L)	Col.4 Fe (II) (g/L)
0	34,68	34,01	34,74	34,11	20,55	10,05	2,01	1,23
24	35,71	35,05	34,32	33,37	21,11	12,62	1,68	0,22
48	32,41	32,80	32,27	32,63	21,78	12,96	2,57	1,34
72	31,96	32,27	32,63	32,71	21,22	13,07	4,13	1,23
96	32,02	33,19	33,59	33,75	19,77	13,07	2,79	0,34
120	31,05	31,42	32,86	31,79	21,00	13,18	2,90	0,45
144	30,91	32,54	31,72	30,81	19,32	13,07	3,13	0,34
168	32,33	31,55	30,33	31,06	18,43	13,52	2,79	0,11
192	32,21	31,54	30,54	31,74	19,21	12,96	3,35	0,34
216	30,76	31,63	29,67	31,08	21,11	12,62	3,80	0,11
240	31,79	31,13	31,56	33,07	21,11	14,07	6,81	0,78
264	30,90	32,02	33,35	32,03	21,11	13,96	7,37	0,22
288	30,35	31,70	31,06	29,44	20,55	14,41	7,48	0,67
312	33,62	34,56	34,09	33,43	21,22	13,96	7,60	0,45
336	33,57	34,60	33,47	34,24	21,33	14,97	8,15	0,56

Las velocidades de bio-oxidación promedio logradas para cada reactor operado en forma continua fueron: Etapa 1, 1,6 Kg. Fe (II)/m<sup>3</sup> reactor/día; Etapa 2, 0,83 Kg. Fe(II)/m<sup>3</sup> reactor/día; Etapa 3, 1,14 Kg. Fe(II)/m<sup>3</sup> reactor/día; y Etapa 4, 0,83 Kg. Fe(II)/m<sup>3</sup> reactor/día. Estos valores fueron inferiores a los obtenidos en las pruebas de bio-reactores agitados, debido a la menor población de bacterias que se observó en las pruebas en columna de burbujeo.

Se debe destacar que los resultados presentados para la operación de la columna de burbujeo corresponden a la fase inicial de puesta en marcha de este sistema de bio-oxidación. Debido al gran volumen del sistema se observó que se requiere mayor tiempo de operación que el definido en este trabajo, de modo de lograr el desarrollo de una mayor población bacteriana activa dentro de los reactores y hacer operaciones con mayor flujo de alimentación de modo de optimizar la bio-oxidación en el sistema. En este sentido los resultados presentados deben considerarse como un primer estudio, y se recomienda operar este sistema a tiempos prolongados (por ejemplo, varios meses), para evaluar la sustentabilidad del proceso y medir la actividad de los microorganismos en el largo plazo.

## 4. CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos son los siguientes:

- La escoria en estudio presentó un contenido de hierro soluble en ácido de 36,8%, con una distribución granulométrica caracterizada por un P80 de 4mm y un bajo contenido de finos (20% < 1,2mm).
- Para la escoria estudiada, la mejor concentración de ácido en el curado fue de 140-160 g/L con un tiempo de curado máximo de 1 día.
- La lixiviación de escoria en mini-columnas indicó que los mejores resultados se obtienen al tratar la escoria previamente curada, obteniéndose recuperaciones de hierro de 34,7%.
- Al trabajar con columnas de 1 m de altura, se encontró que es posible disolver parcialmente la escoria con ácido sulfúrico y lograr un efluente de concentración mayor que 30 g/L durante 50 días de operación.
- Las mejores condiciones de crecimiento y propagación inicial de bacterias ferro-oxidantes se logró utilizando 5cm<sup>3</sup> de inóculo concentrado y en presencia de ión ferroso.
- La etapa final de crecimiento y propagación de bacterias ferro-oxidantes, para lograr una adecuada cantidad de ellas (106-107 bacterias/cm<sup>3</sup> de solución), fue 18 días en 4 bio-reactores agitados.
- La bio-oxidación en reactores agitados entregó mejores resultados que aquella en columnas. En este caso, se logró una concentración final de 33,7% de ión férrico, valor adecuado para poder utilizar las soluciones para la precipitación de arsénico.
- La bio-oxidación en columnas no entregó resultados satisfactorios.

## REFERENCIAS

[1] Ahonen L. and O.H. Touvinen, "Microbiological oxidation of ferrous iron at low temperatures", Applied and Environmental Microbiology 55(2),1989,pp 312-316.

[2] Boon M., C. Ras and J.J. Heijnen, "The ferrous iron oxidation kinetics of *Thiobacillus ferrooxidans* in batch cultures", Applied Microbiology and Biotechnology 51, 1999c,pp 813-819.

[3] Demetrio S., Ahumada J., Duran A., Mast E., Rojas U., Sanhueza J., Reyes P. and Morales E. "Slag Cleaning: The Chilean Copper Smelter Experience", August, 2000,pp110-125.

[4] Espejo, R., Escobar, B., Jedlicki, E., Uribe, P., Badilla-Ohlbaum, R., 1988, "Oxidation of ferrous iron and elemental sulfur by *Thiobacillus ferrooxidans*", Applied and Environmental Microbiology 54, 1988,pp 10-21

[5] Gómez J.M., I. Caro and D. Cantero, "Kinetic equation for growth of *Thiobacillus ferrooxidans* in submerged culture over aqueous ferrous sulphate solutions", Journal of Biotechnology 48, 1996, pp 147-152.

[6] Lazaroff, N. ; Sigal, W. ; Wasserman, A., "Iron oxidation and precipitation of ferric hydroxy sulfates by resting *thiobacillus ferrooxidans* cells", Applied and Environmental Microbiology. Apr., 1982, pp 924-938.

[7] Meruane, G., "Oxidación bacteriana de sulfato ferroso con *Acidithiobacillus ferrooxidans*", Ph. D. Thesis, Universidad de Chile, 2002, pp 1-35.

[8] Meruane, G.; Vargas T., "Bacterial oxidation of ferrous iron by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the pH range 2.5-7.0". Hydrometallurgy,71, 2003, pp149-158.

[9] Nakamura, K., Noike, T., Matsumoto, J., "Effect of operation conditions on biological Fe<sup>2+</sup> oxidation with rotating biological contactors", Water Resource, 20(1),1986, pp 73-77 .

[10] Sanchez M., Parra R., Imris I. and Gonzalez C., 2004, "Direct Reduction of Chilean Copper Slags: A Waste Treatment Alternative". Proceedings of the VI International Conference on Clean Technologies for the Mining Industry. University of Concepción, Chile. 18th – 21st April, 2004 pp 1-15.

[11] Valenzuela A., Balladares E., Sanchez M. and Cordero D., "Arsenic Management in the Metallurgical Industry: The Chilean Experience", Sohn International Symposium, Advanced Processing of Metals and Materials, Volume 9 – Legal, Management and Environmental Issues, F. Kongoli and R.G. Reddy (Editors), TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006,pp. 407-422.

# CONCEPTOS BÁSICOS DE QUÍMICA Y ALGO MAS...

**Dr. Gerardo Cifuentes Molina**

*Departamento de Ingeniería Metalúrgica*

*Universidad de Santiago de Chile*

*gerardo.cifuentes@usach.cl*

Dentro del estudio de cualquier disciplina y en especial en el área de la química, todo lo referente al conocimiento del átomo respecto de su estructura, elementos que lo componen, propiedades de éstos, etc., así como las características de cada elemento químico que se desprende de esa estructura, muchas veces en la academia el como entregar estos conceptos, así como también, el como se entiende por parte de los que reciben estos mismos conceptos no es de fácil trámite, de ahí entonces, como una manera de poder cooperar en esta tarea es el como se debe entender estas letras y figuras que forman este trabajo en particular.

## TEORÍA ATÓMICA

Los orígenes de la teoría atómica se remontan al año 400 A.C., con el "atomismo" de los filósofos griegos (átomo en griego significa lo que no se puede dividir), que continúa durante 2.000 años con especulaciones ineficaces y contradictorias. La base lógica para creer en la existencia del átomo nace con los trabajos publicados por Dalton, Gay-Lussac y Avogadro hacia los comienzos del 1800. Los resultados de innumerables experiencias realizadas posteriormente permiten al científico actual aceptar que la materia está constituida por átomos, lo que en su tiempo no fue exento de ácidas polémicas al respecto. Tratar de seguir el desarrollo histórico y cronológico de la química en un artículo de este tipo, no es lo más adecuado, ya que fueron muchos los estudios que se realizaron simultáneamente y su mutua influencia es complicada de entrelazar. En este artículo se describen las características esenciales del concepto actual del átomo, los elementos y de los compuestos.

## PARTÍCULAS DEL ÁTOMO

El modelo atómico actual se establece a partir de los trabajos desarrollados por varios científicos, en particular: Planck, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac y otros, y es capaz de explicar de forma satisfactoria la constitución del átomo y las propiedades de los compuestos que se forman por combinación de dichos átomos.

En estricto rigor se considera el átomo constituido por dos partes bien diferenciadas: **Núcleo y Corteza electrónica.**

El núcleo es la parte central del átomo y en ella se encuentran los protones y los neutrones. La corteza es la parte exterior y contiene los electrones, no describiendo órbitas (como habían previsto Rutherford y Bohr en sus modelos respectivos) sino distribuidos en niveles energéticos (capas) ocupando orbitales atómicos (regiones del espacio donde la probabilidad de encontrar al electrón es muy grande).

La física moderna ha descubierto más de 100 partículas subatómicas (protón, neutrón, electrón, positrón, neutrino, mesón, muón, etc.). De éstas sólo tres son de interés en la ciencia química: el electrón ( $e^-$ ), el protón ( $p$ ) y el neutrón ( $n$ ), (Tabla 1). El protón y neutrón, ubicados en el núcleo, tienen casi exactamente la misma masa y son mucho más pesados que el electrón (1.836 veces), ubicado este último alrededor del núcleo. El protón y el electrón tienen carga eléctrica, el neutrón es neutro. La carga del electrón es igual a la del protón, pero del signo opuesto; como en el átomo el número de  $p$  es igual al de  $e^-$  éste es eléctricamente neutro.

La carga del electrón es la unidad elemental de carga eléctrica, u.e.; es decir, la carga eléctrica más pequeña que existe en la naturaleza. Por lo tanto, la carga total de un cuerpo debe ser un número entero, múltiplo de la carga del electrón (o protón). La unidad elemental de carga es sumamente pequeña:  $1,60 \cdot 10^{-19}$  culombios (C), por lo tanto en particular, la carga de un mol de electrones ( $6,023 \cdot 10^{23}$  electrones) es la conocida constante  $F$  de Faraday (aprox. 96.500 coulomb). Al núcleo del átomo pertenece casi toda la masa de un átomo pero sólo una pequeña fracción del volumen; tiene por lo tanto una densidad extraordinariamente alta: un  $\text{cm}^3$  que contuviera exclusivamente núcleos de átomos de hidrógeno, que son los más livianos entre todos los conocidos, pesaría aproximadamente un millón de toneladas (106 t). Esto se puede comprender por los diámetros aproximados de un átomo y un núcleo:

Diámetro del átomo  $10^{-8} \text{ cm} = 1 \text{ \AA} (\text{Angstrom})$

Diámetro del núcleo  $10^{-12} \text{ cm} = 10^{-4} \text{ \AA}$

Tabla 1.- Partículas Elementales del átomo

Partícula	Símbolo	Masa	Carga	Ubicación
	g	C		
Protón	p, H+	$1,6729 \cdot 10^{-27}$ g	$+1,601864 \cdot 10^{-19}$	Núcleo
Neutrón	n	$1,6751 \cdot 10^{-27}$ g	0	Núcleo
Electrón	e-	$9,1085 \cdot 10^{-31}$ g	$-1,601864 \cdot 10^{-19}$	Corteza

En las Figuras 1 y 2 se muestra de manera didáctica y comparativa algunas dimensiones en nuestro Universo como una forma de comprender los tamaños relativos de las cosas que nos rodean y que podemos dimensionar fácilmente, los que poseen valores de sus longitudes características (diámetros) con valores de potencia en base diez positivos, no así objetos muy pequeños como el átomo, ya indicados anteriormente, con dimensiones de potencias de diez negativos y por consiguientes más complicado de internalizar.

La razón entre el diámetro del átomo respecto del tamaño del núcleo de éste es 104 veces, es decir, esa es la razón de tamaños entre ambos.

Por otro lado, si hacemos la razón entre el diámetro del sol respecto del diámetro de la tierra, se tiene un valor de 102, es decir el sol es 102 veces más grande que la tierra, valor inferior a la razón entre el tamaño del átomo respecto de su diámetro, es decir, con este simple ejemplo de tamaños se debería entender que la diferencia de tamaños entre el átomo y su núcleo es todavía más extremo respecto del sol y la tierra en cuanto a sus tamaños relativos.

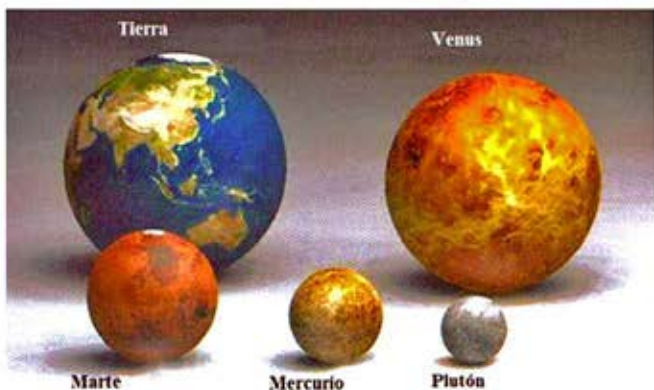


Figura 1.- Modelo comparativo de tamaños de planetas del sistema solar. Diámetro de la tierra 109 cm.

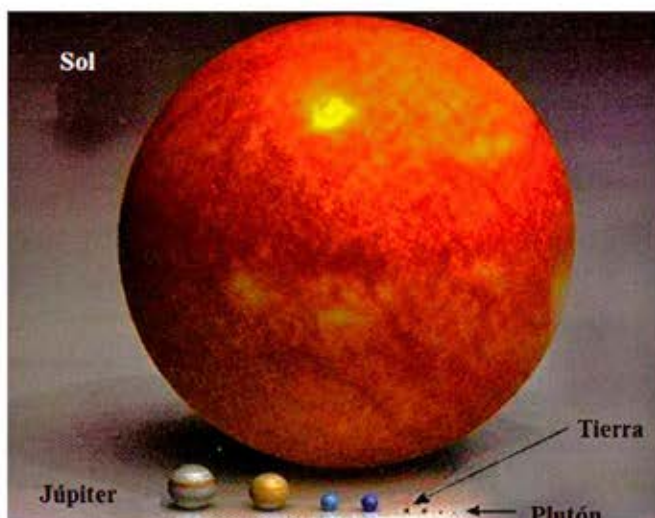


Figura 2.- Diagrama comparativo de dimensiones referido a nuestro sol y sus planetas. Diámetro del sol 1011 cm, radio del universo conocido 1027 cm.

**El número atómico** de un elemento, simbolizado por (*Z*), indica el número de protones que hay en el núcleo. En un átomo neutro, el número de protones es igual al número de electrones, de tal manera que el número atómico también indica el número de electrones. El protón tiene 1.836 veces masa que el electrón y su carga positiva neutraliza exactamente la carga negativa del electrón. El neutrón tiene la misma masa que el protón, pero es eléctricamente neutro.

#### Ejemplo:

El número atómico del Cobre (*Cu*) es 29, esto significa que un átomo neutro de Cobre tiene 29 protones y 29 electrones, o visto a la inversa, si un átomo tiene 29 protones se trata de un átomo de Cobre.

**El número de masa (*A*)** es la suma de los protones y neutrones que un átomo tiene en su núcleo. Por consiguiente, el número de neutrones de un átomo resulta ser igual a:

$$\text{Número de neutrones} = A - Z$$

Por ejemplo, el Cobre tiene número de masa igual a 64 (g/mol) y número atómico igual a 29, por lo tanto:

$$\text{Número de neutrones} = 64 - 29 = 35$$

En la mayoría de los casos, no todos los átomos de un elemento dado tienen la misma masa. Por ejemplo, existen tres tipos de átomos de Hidrógeno, que difieren entre sí solo en el número de neutrones. Ellos son el **protio** con un protón y sin neutrones; **deuterio** con un protón y un neutrón y el **tritio**, con un protón y dos neutrones. Los átomos que tie-

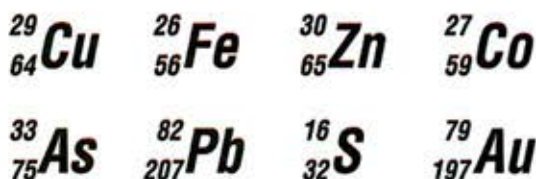
nen el mismo número atómico, pero diferente número de masa se llaman **isótopos**. Un ejemplo de esto es el Uranio 235 y Uranio 238.

Por lo tanto con el conocimiento de la existencia de los isótopos, no es suficiente con dar el símbolo de un elemento para identificarlo, hay que dar información con respecto a la composición de sus núcleos atómicos. Una manera fácil de hacerlo es la indicación de su número atómico (**Z**) y número de masa (**A**) junto al símbolo:



Esta notación representa a una especie atómica llamada **núclido** del elemento **X**.

Ejemplo:



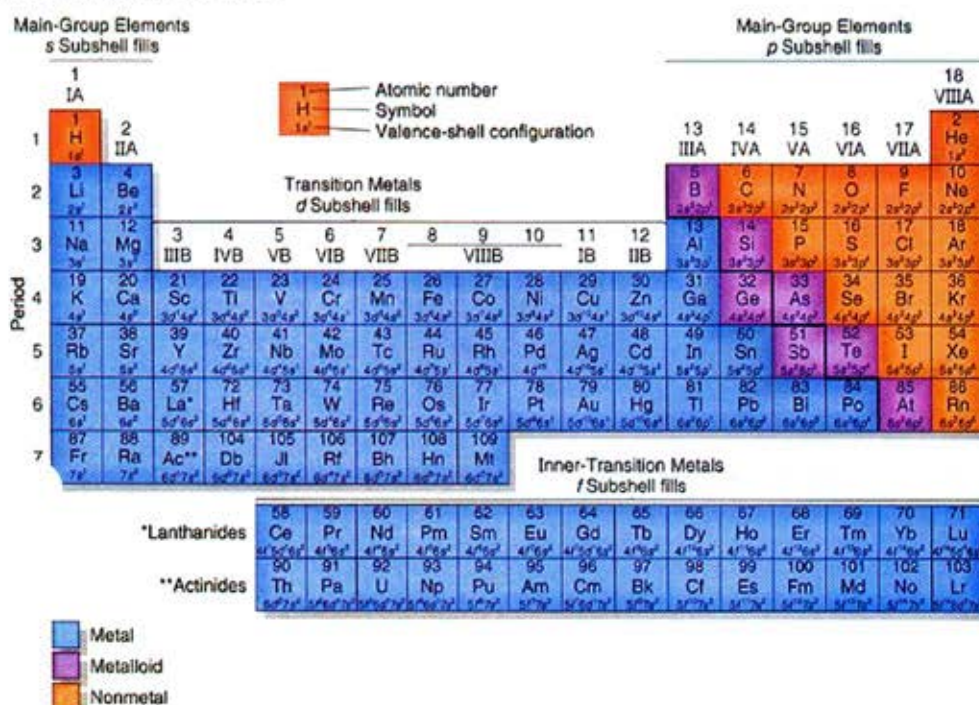
En 1864 el químico inglés John Newlands observó que al ordenar los elementos de acuerdo a su masa atómica creciente, cada 8 elementos se obtenían propiedades semejantes (Ley de las Octavas), pero resultó inadecuada para elementos con masas mayores a la del Calcio.

En 1869 el químico ruso Dimitri Mendeleev y el químico alemán Lothar Meyer propusieron en forma independiente un arreglo de los elementos basado en la repetición periódica y regular de sus propiedades. La proposición de Mendeleev superó ampliamente a la de Newlands principalmente en dos aspectos:

- a) Agrupó los elementos en forma más exacta de acuerdo a sus propiedades y
- b) Permitió la predicción de las propiedades de elementos que aún no se conocían, lo que facilitó su posterior descubrimiento. Al considerar las propiedades de los elementos, se producían algunas anomalías con respecto al ordenamiento en función de la masa, lo que permitió deducir que otra propiedad, diferente de la masa era la responsable de la periodicidad observada.

Posteriormente la Tabla Periódica resultó ser el ordenamiento de los elementos en función del Número Atómico. En ella se pueden distinguir filas (horizontales) que corresponden a los Períodos o Niveles de Energía que poseen los átomos, y Columnas (verticales), que corresponden a los distintos Grupos del Sistema Periódico. Los elementos que se encuentran en un mismo período se caracterizan por tener el mismo número de niveles energéticos. El número del período corresponde al número de niveles energéticos que tienen los átomos de ese período, como se aprecia en la tabla periódica adjunta, Figura 3.

Figura 3.-  
Tabla Periódica de los Elementos.



Los elementos que se encuentran en el mismo grupo del Sistema Periódico se caracterizan por tener la misma configuración electrónica externa. Por ejemplo la configuración electrónica externa (CEE) de los elementos del grupo 1 (Convención IUPAC) es ns1 en que n representa el número cuántico principal y corresponde al número del período, los del grupo 2 tienen una CEE igual a ns2. Debido a que todos los elementos de un grupo tienen la misma CEE es que también tienen propiedades químicas similares, ya que son los electrones de la última capa (electrones de valencia) los que participan en las reacciones químicas.

Esta información es de especial interés para los metalurgistas, ya que permite correlacionar la configuración electrónica de cada elemento con los tamaños de éstos, información vital para comprender y entender el como se comportarán diferentes elementos al conformar aleaciones metálicas por ejemplo, en el contexto de su interacción a la forma de elemento de aleación sustitucional o intersticial.

En la Figura 4 se presenta un diagrama esquematizando los tamaños relativos de los elementos químicos con su distribución en la Tabla Periódica.



Figura 4.- Diagrama comparativo de dimensiones en la Tabla Periódica.

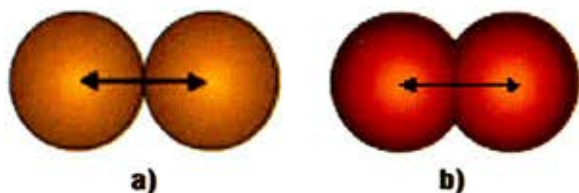


Figura 5: (a) radio atómico de un metal, (b) radio atómico para átomos que forman moléculas biatómicas.

El radio atómico se define como la mitad de la distancia que separa los centros de dos átomos metálicos adyacentes Figura 5(a), o como la mitad de la distancia que separa los centros de dos átomos que forman una molécula con enlace covalente, Figura 5(b).

El radio iónico es el que posee un anión (átomo que capta uno o más electrones quedando cargado negativamente), en cuyo caso aumenta su volumen; o un catión (átomo que cede uno o más electrones, quedando cargado positivamente), en cuyo caso disminuye su volumen. Figura 6.

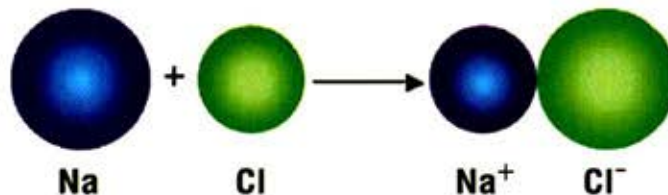


Figura 6: Variación de tamaño en los átomos de Na y Cl al formar NaCl.

En la Figura 4 se puede apreciar que la variación que experimentan los radios iónicos con el número atómico, sigue la misma tendencia que la variación de los radios atómicos con el número atómico.

Actualmente se conocen más de 100 elementos químicos, de los cuales 88 se encuentran en la naturaleza y el resto ha sido sintetizado por el hombre. A cada elemento se le ha dado un nombre y un símbolo. Los símbolos químicos de los elementos son una forma de lenguaje en el que se representan los átomos de los elementos.

Un símbolo está formado por una letra mayúscula o por mayúscula y una minúscula del nombre del elemento en latín o griego. Si el nombre de los elementos comienza con la misma letra, el símbolo consta entonces de dos letras, una mayúscula y otra minúscula como se muestra en la tabla 2 siguiente.

Tabla 2.- Simbología de elementos que comienzan con la letra C.

Elemento	Símbolo
Carbono	C
Cesio	Cs
Calcio	Ca
Cobre	Cu
Cadmio	Cd
Cobalto	Co

Los nombres y, por consiguiente, los símbolos de los elementos se han asignado atendiendo a diversos motivos; por ejemplo: el bromo es un líquido de olor muy desagradable y de ahí que se le nombrara con la palabra griega bromos que significa "mal oliente". Otros se han bautizado

según su color característico, como el cloro, un gas de color amarillo verdoso, cuyo nombre proviene del griego chloros que significa "verde". En las tablas 3 a 9 se presentan los nombres de elementos con sus respectivos símbolos, además del origen del nombre asociado a ese elemento.

**Tabla 3.- Elementos nombrados por su color.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Cesio	Cs	Caesius, del latín azul claro
Circonio	Zr	Zargun (circón), del árabe
Cromo	Cr	Chroma, color en griego
Indio	In	Índigo, azul intenso
Iridio	Ir	Iris, del griego arcoiris
Praseodimio	Pr	Prasios, del griego verde fuerte
Rodio	Rh	Rhodon, del griego rosa
Rubidio	Rb	Rubidius, del latín rojo oscuro
Talio	Tl	Thalios, del latín ramita verde
Yodo	Y	Iodes, del griego violeta púrpura

**Tabla 4.- Nombre de elementos del latín.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Antimonio	Sb	Stibium
Cobre	Cu	Cuprum
Estaño	Sn	Stannum
Hierro	Fe	Ferum
Mercurio	Hg	Hydrargyrum
Oro	Au	Aurum
Plata	Ag	Argentum
Plomo	Pb	Plumbum
Potasio	K	Kalium
Sodio	Na	Natrium
Tungsteno	W	Wolfram

**Tabla 5.- Elementos con nombre derivado de países y continentes.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Americio	Am	América
Escandio	Sc	Escandinavia
Europio	Eu	Europa
Francio	Fr	Francia
Galio	Ga	Galia, del latín Francia
Germanio	Ge	Alemania
Polonio	Po	Polonia
Rutenio	Ru	Rutenia, Rusia
Tulio	Tm	Thule, nombre antiguo del extremo norte

**Tabla 6.- Elementos con nombre derivado de estados y ciudades.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Berkelio	Bk	Berkeley, California
Californio	Cf	California
Erbio	Er	Itterby, Suecia
Estroncio	Sr	Estroncia, Escocia
Hafnio	Hf	Hafnia, antes Copenhague
Holmio	Ho	Estocolmo, Suecia
Itrio	Y	Itterby, Suecia
Lutecio	Lu	Antiguo nombre de Paris
Magnesio	Mg	Magnesia, antigua ciudad griega
Terbio	Tb	Itterby, Suecia
Yterbio	Yb	Itterby, Suecia

**Tabla 7.- Elementos nombrados en honor de personajes famosos.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Curio	Cm	Marie y Pierre Curie, físicos
Einstenio	Es	Albert Einstein, físico
Fermio	Fm	Enrico Fermi, físico nuclear
Gadolinio	Gd	Johan Gadalin, químico finlandés
Hahnio	Ha	Otto Hahn, científico alemán
Laurencio	Lw	Ernest O. Lawrence, inventor del ciclotrón
Mendelevio	Md	Dimitri Mendeleiev, científico ruso
Nobelio	No	Alfred Nobel, inventor de la dinamita
Rutherfordio	Rt	Ernest Rutherford, físico inglés
Samario	Sm	Coronel Samarsky, ingeniero ruso

**Tabla 8.- Elementos con nombres derivados de dioses de la mitología.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Mercurio	Hg	Mercurio, mensajero de los dioses
Niobio	Nb	Niobio, diosa griega hija de Tántalo
Niquel	Ni	Nick, el diablo alemán
Prometio	Pm	Prometeo, portador griego del fuego
Selenio	Se	Selene, diosa griega de la luna
Tantalio	Ta	Tántalo, dios griego de la frustración
Titanio	Ti	Titanes, hijos de Urano y Gea (la tierra) en la mitología griega
Torio	Th	Thor, dios escandinavo de la guerra
Vanadio	V	Vanadis, diosa escandinava de la belleza

**Tabla 9.- Elementos con nombres derivados de planetas y cuerpos celestes.**

Elemento	Símbolo	Nombre derivado de:
Cerio	Ce	Ceres, asteroides
Helio	He	Helios, del griego Sol
Neptunio	Np	Neptuno
Paladio	Pd	Pallas, asteroides
Plutonio	Pu	Plutón
Telurio	Te	Tellus, del latín tierra
Uranio	U	Uranus

Se ha encontrado isótopos naturales de todos los elementos comunes a excepción del flúor y del sodio. Cuando hablamos de un elemento dado, nos referimos a su mezcla isotópica. La abundancia relativa de los distintos isótopos naturales que componen un elemento (composición isotópica) es generalmente constante.

En muchas sustancias (elementales y compuestas), los átomos están unidos formando asociaciones, moléculas, capaces de existir como entidades físicas individuales. Esta característica se manifiesta fundamentalmente en el estado gaseoso. De los elementos gaseosos que componen la atmósfera, los gases inertes (helio, neón, argón, kriptón y xenón) existen a la forma de los átomos (moléculas monoatómicas); el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) a la forma de moléculas diatómicas. La masa de un átomo de cualquier elemento es tan pequeña que ni siquiera las balanzas más sensibles podrían detectarla. Indirectamente puede determinarse que la masa de un átomo de hidrógeno es 1,67·10<sup>-24</sup> g, la de un átomo de carbono 19,9·10<sup>-24</sup> g y la de un átomo de oro 327·10<sup>-24</sup> g.

Lo que si es factible, es medir la masa de cada uno de los isótopos (masa isotópica) que constituyen el elemento en cuestión, en relación a la de un átomo elegido como patrón. Conociendo la composición isotópica del elemento, se calcula la masa promedio de sus átomos que corresponde a su peso atómico. Desde 1961 se utiliza como patrón el isótopo más común del carbono, el <sup>12</sup>C al que se le ha asignado una masa de exactamente 12 unidades de masa atómica (u.m.a.). De lo anterior se deduce que los pesos atómicos son números relativos.

En la tabla 10 se aplica lo anteriormente expuesto al elemento litio.

**Tabla 10.- Peso Atómico del Litio.**

Isótopos	Masa isotópica	Abundancia %	Masa relativa 100 átomos	Peso Atómico (u.m.a)
<sup>3</sup> <sub>6</sub> Li	6,0167	7,40	694,4	6,944
<sup>3</sup> <sub>7</sub> Li	7,0179	92,60		

Aspectos relativos a: Energía de Ionización (I), Afinidad Electrónica (AE), Electronegatividad, se pueden entender y explicar en forma análoga a lo que se ha tratado de presentar en esta publicación y que permitirían su comprensión más fácilmente, pero que en beneficio del espacio disponible en esta revista así como para no tratar de aburrir al lector podrían ser tratados en otro número.

Se ha pretendido presentar de una manera más cercana al lector, aspectos de la Química que a ojos del autor son al menos de una comprensión algo distante a nuestra cotidianeidad y que se espera haber ayudado a comprender.

## BIBLIOGRAFÍA

### 1.- Electrometalurgia: Teoría y Práctica

Gerardo Cifuentes M., Universidad de Santiago de Chile, libro en preparación.

### 2.- Curso de Química General

Emilio Balocchi C., Lilian Bouyssières M., Manuel Martínez M., M. Alejandra Melo B., Gladys Ribot S., Héctor Rodríguez M., René Schifferli D., Hernán Soto N.

Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Química y Biología, 2002.

# MATERIALES ALMACENADORES DE HIDROGENO

Danny Guzmán M.<sup>1</sup> y Stella Ordóñez H.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Metalurgia, Facultad Ingeniería, Universidad de Atacama y Centro Regional de Investigación y Desarrollo Sustentable de Atacama, CRIDESAT

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile,

## INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo tecnológico de la humanidad ha sido desde siempre la Conversión de la energía. En la actualidad, alrededor del 85% de la energía consumida procede de la combustión térmica del petróleo, carbón y gas natural. Los combustibles fósiles presentan importantes limitaciones tecnológicas de entre las cuales destacan tres: la primera es que se trata de recursos no renovables; la segunda es que los productos de las reacciones de combustión producen una enorme contaminación ambiental y la tercera es que su empleo en algunas aplicaciones, como en la industria espacial, se ve limitado por el requerimiento de transportar el máximo de energía con el mínimo de peso. De aquí entonces surge la necesidad de encontrar alternativas de conversión que superen las limitaciones de los combustibles antes mencionados.

En esta búsqueda, se ha encontrado que el hidrógeno es uno de los mejores candidatos, debido a que posee una alta razón energía/masa,

es el elemento más abundante en el planeta y la energía química de su oxidación puede ser convertida directamente en electricidad o en energía térmica y mecánica, donde el residuo del proceso es H<sub>2</sub>O (figura 1).

No obstante lo anterior, menos del 1 % del hidrógeno en el planeta se encuentra en estado molecular, la mayor proporción está enlazado químicamente formando H<sub>2</sub>O, por tanto, la producción de hidrógeno es renovable solo si la fuente primaria de energía utilizada para su generación lo es (fotovoltaicidad, eólica, hidroeléctricidad, etc.). Como podemos percibir, el uso del hidrógeno, como el combustible del futuro tiene una gran potencialidad, pero antes que esto suceda, deben de sortearse una serie de inconvenientes, entre los cuales los de mayor connotación son los referentes a su densificación, almacenamiento y transporte, temas que representan hoy en día un gran desafío para la ciencia de los materiales. Una comparación de las características del hidrógeno como combustible pueden apreciarse en la tabla 1.

Figura 1: (a) Ciclo de combustión del hidrógeno, (b) Celda de combustible base hidrógeno

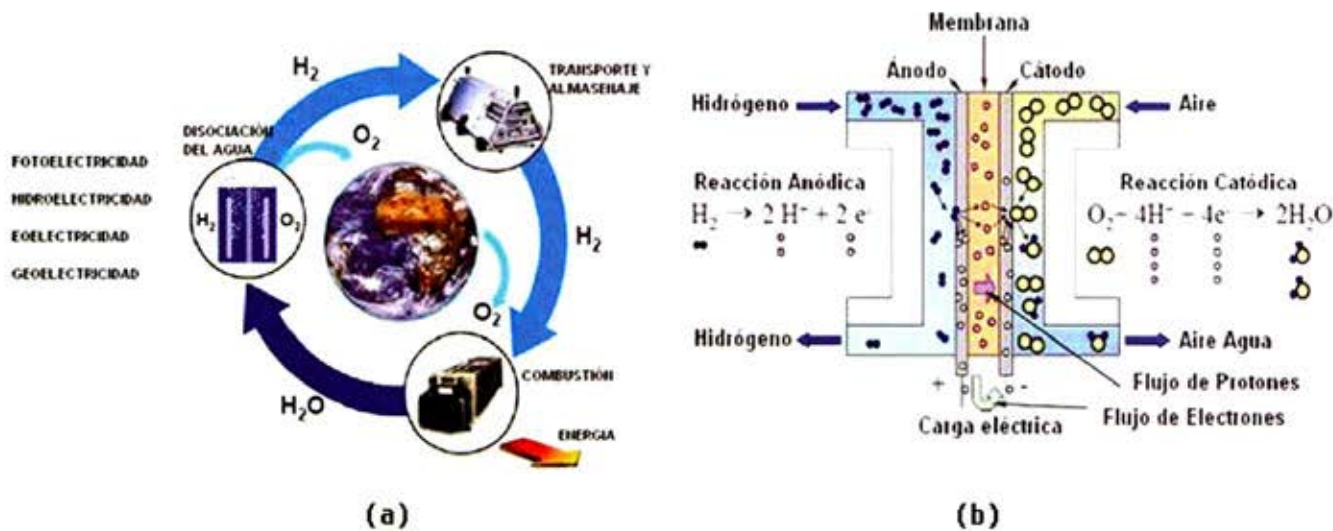


Tabla 1: Comparación de las características como combustible del hidrógeno frente a combustibles fósiles [1].

Propiedades		Hidrógeno H <sub>2</sub>	Metano CH <sub>4</sub>	Gasolina (-CH <sub>2</sub> -) <sub>n</sub>
Densidad de energía por unidad de masa	kJ Kg <sup>-1</sup>	125 10 <sup>3</sup>	48 10 <sup>3</sup>	44,5 10 <sup>3</sup>
Temperatura de ignición	°C	585	540	228-501
Temperatura de llama	°C	2045	1875	2200
Residuos de combustión	-	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Fuente energética renovable	-	Si*	No	No

\* Si la fuente primaria de energía es renovable.

### Métodos de Almacenamiento de hidrógeno

En el diseño de sistemas almacenadores de hidrógeno, deben considerarse esencialmente dos criterios: alcanzar densidad tanto volumétrica como gravimétrica de hidrógeno lo más alta posibles [1] y lograr que el proceso de almacenamiento sea prácticamente reversible [2]. Según lo anterior, actualmente existen cuatro formas de almacenar hidrógeno:

1).- **Almacenamiento gaseoso a alta presión:** Los cilindros comúnmente utilizados son de acero inoxidable austenítico para evitar la fragilización producida por hidrógeno. Se puede alcanzar una densidad volumétrica máxima de 36 kg H m<sup>-3</sup> a 80 MPa mayores presiones son impracticables debido a que al aumentar la densidad volumétrica disminuye la densidad gravimétrica por el aumento del peso del cilindro. La peligrosidad debido a las altas presiones y la limitación en la densidad volumétricas, son las principales limitaciones de este sistema [2].

2).- **Almacenamiento en estado líquido:** El hidrógeno es almacenado en su estado líquido a temperaturas criogénicas de 21,2 K a presione atmosférica. Si se quisiese almacenar hidrógeno condensado a temperatura ambiente debería aplicarse presiones del orden de los 1000 MPa. Aunque la densidad volumétrica aumenta considerablemente 70,8 kg H m<sup>-3</sup>, la gran cantidad de energía utilizada en el proceso de licuefacción y las importantes pérdidas por evaporación hacen poco atractiva esta forma de almacenamiento [3].

3).- **Almacenamiento en estado fisisorbido:** El hidrógeno es fisisorbido sobre superficies sólidas por interacciones tipo Van de Waals, por lo que se utilizan materiales con gran área superficial específica como lo son, el carbón activado y las zeolitas [4]. Debido a la débil naturaleza de este tipo de atracciones, la fisisorción sólo es relevante a bajas temperaturas (<273 K). Este método presenta como limitaciones la baja densidad volumétrica de hidrógeno alcanzada, además de su baja temperaturas de operación.

4).- **Hidruros en estado sólido:** En este sistema de almacenamiento el hidrógeno se encuentra formando parte de un hidruro sólido, alcanzando, altas densidades volumétricas de almacenamiento (150 kg H m<sup>-3</sup>).

Se ha encontrado que los hidruros binarios presentan gran estabilidad termodinámica, lo que los hace poco atractivos para su uso como almacenadores reversibles. Por tanto, un amplio rango de aleaciones con dos o más metales está siendo estudiado actualmente, obteniéndose promisorios resultados. La principal ventaja que poseen estas aleaciones es su alta capacidad almacenadora, baja presión y temperatura de trabajo reversible [5].

Como se puede apreciar el método más auspicioso de almacenaje de hidrógeno es el que lo hace en forma de hidruros sólidos.

### Hidruros metálicos

El empleo de hidruros metálicos presenta una alternativa muy interesante, particularmente por su facilidad de manejo, sin embargo, sólo un reducido número de elementos forman hidruros que almacenan una cantidad significativa de hidrogeno y más importante aún, las cinéticas de absorción y desorción de éstos son relativamente lentas, de aquí el creciente interés desarrollado en las últimas décadas por encontrar materiales que sean capaces no sólo de almacenar la mayor cantidad posible de hidrógeno sino también de presentar cinéticas de absorción y desorción rápidas en las condiciones en que serán empleados.

Los hidruros metálicos también son conocidos como hidruros intersticiales, ya que es en esos sitios donde se ubica el hidrógeno. Este tipo de estructura está limitada a composiciones MH, MH<sub>2</sub> y MH<sub>3</sub>, con los átomos de hidrógeno en los huecos octaédricos y/o tetraédricos de la red del metal.

Especial interés tienen los hidruros metálicos de compuestos intermetálicos, AB<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, debido a que variando los elementos las propiedades de los hidruros pueden ser "diseñadas". El elemento A es normalmente una tierra rara o un alcalino térreo que tiene de a formar un hidruro estable. El elemento B es un metal de transición y forma sólo hidruros inestables. Se ha encontrado que para algunas razones B:A bien definidas (x= 0.5, 1, 2, 5) se forman hidruros con relación hidrógeno / metal (H/M) superior a dos. La reacción del hidrógeno gaseoso con un metal o proceso

de absorción se puede describir en términos de una curva de energía potencial (Figura 2).

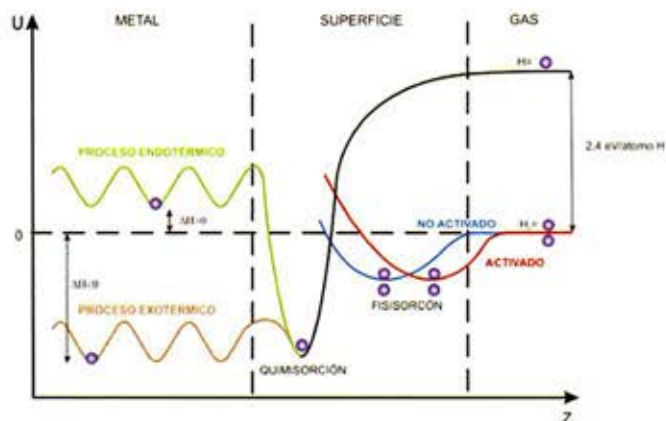


Figura 2: Curva de energía potencial para un proceso de absorción

En contacto con la superficie de un metal la molécula de hidrógeno es fisisorbida. El proceso de fisisorción es gobernado únicamente por interacciones electrostáticas tipo Van der Waals. Una vez fisisorbida, la molécula puede experimentar la disociación y quimisorción. La quimisorción al contrario de la fisisorción involucra la formación de enlaces químicos entre el hidrógeno y el metal. La naturaleza del proceso de disociación de la molécula de hidrógeno puede ser activado o no activado (en la figura 2, curva roja y azul respectivamente). El mínimo en la curva  $H_2+M$  corresponde a la fisisorción de la molécula de  $H_2$ , mientras el mínimo en la curva  $H+M$  ilustra la quimisorción del átomo de hidrógeno. Si las dos curvas se interceptan bajo la línea cero energía, en referencia a la energía de la molécula de hidrógeno, el proceso de quimisorción no es activado.

Si la intersección de las curvas es arriba del punto de cero energía, se requiere superar una energía de activación para que el proceso ocurra. Lo último hace más lenta las cinéticas de absorción y desorción de hidrógeno. Ejemplos de metales donde el proceso de disociación es activado y no, son el Mg y Pd respectivamente [6]. El próximo paso en la cadena de reacciones es la difusión del hidrógeno en el metal a través de los sitios intersticiales de éste. Si la energía de los átomos de hidrógeno disueltos en el metal es menor que la que poseían en forma molecular, la reacción de absorción es exotérmica, y si ésta es mayor entonces la reacción es endotérmica.

A pequeñas razones  $H/M$  ( $<0.1$ ), el H es disuelto exotérmicamente en el metal formando una solución sólida (fase  $\alpha$ ). La red del metal se expande proporcionalmente a la concentración de H en aproximadamente 2-3 Å por átomo de H [6]. A mayores concentraciones de H en el metal ( $H/M >0.1$ ), la fuerte interacción H-H se vuelve importante debido a la expan-

sión de la red, y la fase hidruro (fase  $\beta$ ) nuclea y crece. Entre la fase  $\alpha$  y  $\beta$  existe un cambio de volumen que puede llegar al 10-20%, esto da lugar a decrepitación de los metales frágiles como es el caso de los compuestos intermetálicos, en esos casos el hidruro final es un polvo con un tamaño de partícula de 10-100  $\mu m$ .

### Termodinámicas del proceso de hidruración de elementos metálicos e intermetálicos.

Una de las propiedades más importantes que poseen los hidruros de elementos metálicos e intermetálicos son las que hacen referencia a su estabilidad termodinámica, la cual es estudiada mediante isotermas presión versus composición (figura 3(a)) [7-9]. Dependiendo de la presión de hidrógeno, una isoterma como la de la figura 3 puede ser dividida en tres etapas. La primera de ellas consiste en la disolución del hidrógeno en el metal (denominada comúnmente fase  $\alpha$ ). Esta etapa culmina cuando se alcanza el límite de solubilidad del hidrógeno en el metal, límite que es función de la temperatura; así en la figura 3(a) este límite a  $T_1$ , está representado por "x". La segunda etapa comienza una vez que se ha alcanzado el límite de solubilidad y las condiciones imperantes permiten la formación de una nueva fase, el hidruro  $MH_n$  (denominado comúnmente fase  $\beta$ ), por lo que esta etapa será visualizada como una meseta en la isoterma y la longitud de la misma determina la cantidad de hidrógeno almacenado. La finalización de esta fase, se produce cuando la composición llega a un punto definido en el cual desaparece la solución sólida, en la figura 3 este punto a  $T_1$  será "n". Después de este punto, nuevamente coexisten sólo dos fases, el hidruro, de composición no estequiométrica  $MH_n$  y el hidrógeno, es aquí donde comienza la tercera etapa y que implica la disolución de hidrógeno en el hidruro con lo cual la composición de este último se aproxima al valor estequiométrico, el cual, a  $T_1$  sería "s". La región bifásica termina a una temperatura crítica  $T_c$  por encima de la cual la transición de  $\alpha$  a  $\beta$  es continua. Las presiones de equilibrio  $P_{eq}$  entre el hidruro, solución sólida y el hidrógeno molecular gaseoso son relacionadas con los cambios de entalpía  $\Delta H$  y entropía  $\Delta S$ , en función de la temperatura mediante la ecuación de Van't Hoff (figura 3(b)).

$$\ln P = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (1)$$

El conocimiento del  $\Delta G$  de formación es fundamental, ya que nos entrega una medida de la estabilidad del hidruro.

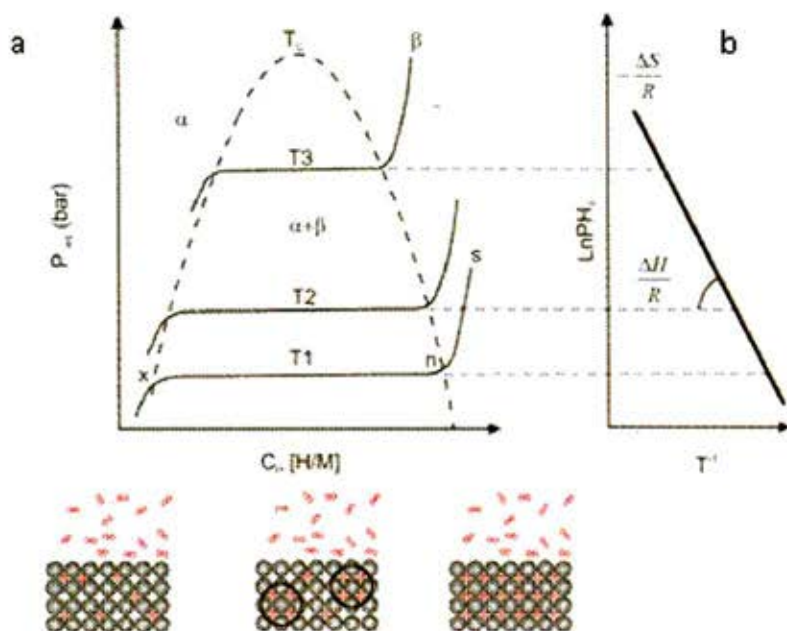


Figura 3: (a): Isothermas de Presión vs. Composición para la absorción de hidrógeno en un compuesto intermetálico, (b) Representación gráfica de la ecuación de Van't Hoff.

Algunos modelos empíricos permiten estimar la estabilidad y concentración de H en el hidruro intermetálico. La cantidad máxima de H en la fase hidruro está dada por el número de sitios intersticiales en el compuesto intermetálico [10, 11]. Como regla general se puede decir que todos los elementos con electronegatividades entre 1.35 y 1.82 no forman hidruros estables [12]. La estabilidad de un átomo de H en un sitio intersticial es el promedio pesado de la estabilidad de los correspondientes hidruros binarios de los átomos metálicos vecinos, más general es el modelo de Miedma: mientras más estable es el compuesto intermetálico menos estable es el hidruro correspondiente y viceversa [13, 14]. Debido a que la interacción del H con la estructura electrónica del metal es muy compleja, el cálculo teórico de la estabilidad de los hidruros se torna muy complicado y en algunos casos imposible [6].

Otras propiedades importantes que deben ser consideradas en los hidruros son:

**Activación:** Una de las principales dificultades en la obtención de hidruros metálicos es la necesidad de una activación previa a la absorción de hidrógeno por el metal. La reacción entre el metal e hidrógeno se ha planteado como una reacción espontánea, sin embargo es muy usual que algunos metales requieran de activación previa a la absorción de hidrógeno. Podemos definir la activación como el procedimiento necesario para hidrurar un metal la primera vez y darle al metal el máximo en cuanto a capacidad y cinéticas de hidruración/deshidruración. La facilidad con la que el H penetrará dependerá de la estructura y barreras de la superficie,

tales como especies que catalicen la disociación del H o capas de óxido. La activación usualmente se realiza calentando el metal bajo vacío, administrando gas hidrógeno a una presión en exceso de la de disociación y luego se enfría. Después de la expansión del metal en la formación del hidruro (el volumen del hidruro es mayor que el del metal) se produce un agrietamiento y se expone nueva superficie para el hidrógeno. En ocasiones es necesario repetir este proceso cuando se requiere de alta activación.

**Cinéticas de hidruración y deshidruración:**

pueden variar significativamente de una aleación a otra. Afortunadamente existen hidruros con excelentes cinéticas intrínsecas a temperatura ambiente, en estos casos la vida del almacenador estará limitada por el diseño de la transferencia de calor o contaminaciones accidentales de la superficie. Resistencia a las impurezas gaseosas: dependiendo de la combinación aleación-impureza, se pueden producir distintos tipos de daños [15]:

- (1) envenenamiento; se pierde rápidamente capacidad pero sin la consecuente disminución de las cinéticas iniciales;
- (2) retardo, disminución de las cinéticas sin pérdida de capacidad;
- (3) reacción, lenta corrosión de la aleación. Los daños por envenenamiento y retardo son recuperables, pero el por reacción no.

**Clasificación de los hidruros.**

Los hidruros pueden ser clasificados en tres grandes grupos dependiendo de la naturaleza del enlace formado entre el metal y el hidrógeno: covalentes, iónicos y metálicos.

Los metales a la derecha del grupo VIII, además del berilio, forman hidruros en los cuales el enlace es covalente, un ejemplo de estos hidruros es el PbH4. Estos hidruros no pueden ser obtenidos mediante una reacción directa entre el metal y el gas hidrógeno. Los metales alcalinos y alcalino-térreos forman hidruros iónicos en los cuales el hidrógeno se encuentra como H<sup>-</sup>. Normalmente los hidruros iónicos poseen la fórmula AH o AH<sub>2</sub>, donde la letra A simboliza al elemento alcalino o alcalino-térreo, ejemplos de estos son LiH, NaH y CaH<sub>2</sub>. En los hidruros metálicos, al contrario de lo que ocurre en los hidruros iónicos, el hidrógeno se encuentra como H<sup>+</sup>. Usualmente se obtiene un hidruro que difiere en su estructura con el metal. Dado que estos hidruros generalmente poseen conductividad metálica así como otras propiedades de los metales, son normalmente denominados hidruros metálicos para diferenciarlos de los demás hidruros.

																		18/VII	
	1	2												13/III	14/IV	15/V	16/VI	17/VII	He
2	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sr	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn		Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd		In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg		Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Salinos
  Metálicos
  Intermedios
  Moleculares
  Desconocido

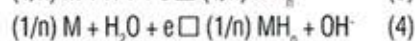
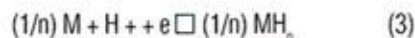
Figura 4: Tipos de hidruros que forman los elementos de la tabla periódica.

Los hidruros metálicos pueden ser formados a partir de una reacción directa entre el metal y el gas hidrógeno según la siguiente reacción:



Esta reacción usualmente es exotérmica, espontánea y fácilmente reversible, así entonces, cuando el metal es expuesto a hidrógeno gaseoso, el hidruro se forma con la consecuente generación de calor. Como puede comprobarse, son poco más de 25 los metales de transición que pueden formar fácilmente hidruros según esta reacción.

En algunos casos el hidruro metálico puede ser formado electroquímicamente de acuerdo a las siguientes reacciones:



Las reacciones (3) y (4) corresponden a medio ácido y alcalino respectivamente. A excepción del paladio, los hidruros formados por metales de los grupos VI al VIII requieren de altas presiones de hidrógeno para su formación, de acuerdo a la reacción (2). Por ejemplo, para la formación de hidruro de níquel se requiere una presión de hidrógeno en exceso de 0,6 GPa (6000 atm) y para la del hidruro de molibdeno esta se eleva a 23,5 GPa [8]. Como es evidente, estas altas presiones de hidrógeno limitan las aplicaciones de éstos.

Las propiedades de los hidruros pueden variar si se forman a partir de soluciones sólidas o metales puros. Estas propiedades, en el caso de dos metales formadores de hidruros, pueden ser intermedias a las de los dos hidruros metálicos binarios correspondientes.

Existen además de los hidruros mencionados anteriormente, los hidru-

ros de compuestos intermetálicos, los compuestos intermetálicos que forman estos hidruros pueden ser agrupados en términos de las estructuras.

#### El magnesio como material base de almacenadores de hidrógeno

El magnesio, es un elemento muy atractivo en el ámbito de los materiales almacenadores de hidrógeno, debido a su alta capacidad de almacenaje que podría llegar a 7,6% en peso H, sumado a su abundancia en la corteza terrestre, baja densidad y costo en relación a otros materiales utilizados para estos fines (V, Pd, etc.). Lo anterior ha incentivado investigaciones en el último tiempo apuntando a cuantificar sus potencialidades de aplicación en esta área [16-19]. Según los resultados obtenidos, se ha detectado que el problema que existe es esencialmente cinético, ya que, termodinámicamente es factible la formación del  $MgH_2$ , ( $\ln P_{H_2} = -74500/RT + 135/R$ , lo cual entrega que a una temperatura de 100°C una  $P_{H_2, eq} = 0,0004$  atm [20]). Pero en la práctica, sólo se ha verificado la hidruración a temperaturas de 400°C y a una  $P_{H_2} \approx 30$  atm. [21], mientras que la desorción se alcanza a temperaturas mayores a los 350°C en atmósfera de Ar [22, 23], considerando que un material para aplicaciones móviles debería liberar y absorber el hidrógeno en lo posible a temperaturas del orden de los 0-110 °C. Los factores más importantes encontrados que producen las limitaciones cinéticas, son:

a) Oxidación superficial, el magnesio se oxida fácilmente al ponerlo en contacto con el aire ( $\Delta G_o = -1,204 \cdot 10^6 + 219,92 [J \cdot mol^{-1}] \Rightarrow P_{O_2} = 2,8 \cdot 10^{-200}$  atmósferas). Existen reportes de que se produce una drástica disminución en la difusión de hidrógeno en presencia de concentraciones superficiales de oxígeno superiores a 150 ng cm<sup>-2</sup> [24].

b) La superficie del Mg no es activa en cuanto a la disociación de la molécula de hidrógeno.

c) Se presentan bajas velocidad de difusión de los átomos de hidrógeno a través del  $MgH_2$  [25], encontrándose información que ésta es casi nula en espesores de  $MgH_2$  superiores a los 50  $\mu m$  [16, 26].

#### Investigaciones referentes a dar solución al problema cinético mediante Aleado Mecánico.

Se ha encontrado que la adición de un segundo elemento al Mg, disminuye la estabilidad de hidruro formado y la capacidad de almacenamiento, y, según las características de este elemento además es posible catalizar la disociación de la molécula de hidrógeno. En este ámbito en el año 1968 en la Brookhaven Nacional Laboratory USA, fue descubierto el intermetálico  $Mg_2Ni$ , que a diferencia del  $MgNi_2$ , tiene una gran capacidad almacenadora de hidrógeno 3,6 % en peso, y una densidad mucho menor a la mayoría de lo intermetálicos [27]. La energía libre de formación ( $\Delta G_o = -64500 - 122T [J mol^{-1}]$ ) a 298 K del  $Mg_2NiH_4$  es -28,1 kJ[20], mayor por ejemplo que la del  $MgH_2$  (-34,2 kJ), lo que hace disminuir su temperatura de desorción de hidrógeno para una presión dada. Sin embargo, bajo condiciones normales (temperatura ambiente y presión atmosférica), el  $Mg_2Ni$  no absorbe hidrógeno, éste sólo lo hace a temperaturas del orden de los 250-350°C y a presiones entre 15-50 atmósferas, otra dificultad que presenta la utilización del  $Mg_2Ni$ , es su obtención, ya que los métodos convencionales de fusión-solidificación presenta grandes inconvenientes debido principalmente a la gran diferencia de temperaturas de fusión de los elementos involucrados, la descomposición peritética que se presenta y la gran presión de vapor del Mg. Estas dificultades se han sorteado en cierto grado utilizando Aleado Mecánico como técnica para producir el compuesto [28-31] y mejorar en un cierto grado la cinética de hidruración. La figura 5(a) muestra el aspecto de los polvos de  $Mg_2Ni$  después de 10 horas de molienda y la figura 5(b) el alto grado de homogeneidad química alcanzada mediante este método.

El material obtenido después de 10 horas de aleado mecánico de Mg y Ni elementales en razón atómica 2:1, está formado por  $Mg_2Ni$ , Ni y amorfo. La Figura 6 presenta una curva cinética de hidrogenación de de esta muestra obtenida en un equipo volumétrico Sievert, el que no haya sido necesario un proceso de activación para que una muestra formada mayoritariamente por  $Mg_2Ni$  lograra absorber un 2,00 % en masa de H a una temperatura de 90 °C, representa un notable avance. Esto se debe a la presencia en la muestra de Ni metálico y una fase amorfa y también a que estamos en presencia de un material nanoestructurado.

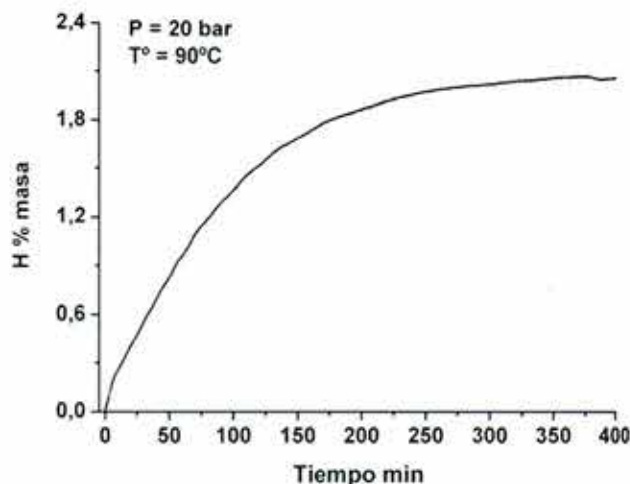


Figura 6: Curva cinética de hidrogenación de una muestra obtenida con 10 horas de molienda.

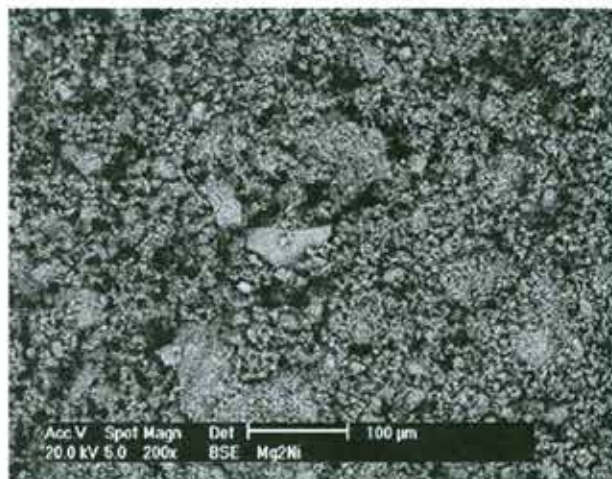
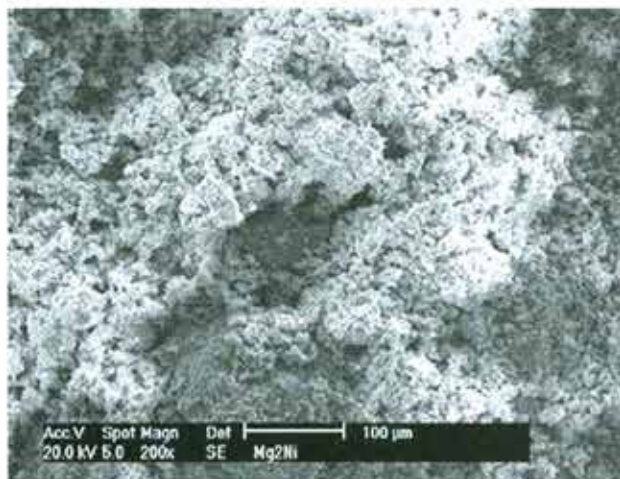


Figura 5: Micrografías electrónicas de barrido de una muestra de  $Mg_2Ni$  después de 10 horas de molienda, (a) imagen de electrones secundarios y (b) de electrones retrodispersados.

## REFERENCIAS

- [1] A Züttel, "Hydrogen storage methods and materials", *Naturwissenschaften*, vol. 91 Issue 4 pp.157-172, 2004.
- [2] J. Ritter, A. Ebner, J. Wang, R. Zidan, "Implementing a hydrogen economy", *Materials today*, p. 18-23, 2003.
- [3] M. Conte, P. Prosini, S. Passerini, "Overview of energy/hydrogen storage: state-of-art of the technologies and prospects for nanomaterials", *Mat. Sci. Eng. B*, vol. 108, p. 2-8, 2004.
- [4] P. Anderson, "Zeolite framework materials for hydrogen storage", archivo de internet: [http://www.h2net.org.uk/PDFs/Miscellaneous\\_2004\\_Storage/Anderson\\_Zeolites\\_hydrogen\\_storage\\_20041216.pdf](http://www.h2net.org.uk/PDFs/Miscellaneous_2004_Storage/Anderson_Zeolites_hydrogen_storage_20041216.pdf)
- [5] A. Seayad, D. Antonelli, "Recent Advances in hydrogen storage in metal-containing inorganic nanostructures and related materials", *Adv. Mater.*, vol. 16, p. 765-777, 2004.
- [6] A. Züttel, "Materials for hydrogen storage", *Materials Today*, p. 24-33, 2003.
- [7] G. Sandrok, "A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view", *J. Alloy Compd.*, vol. 293-295, p. 877-888, 1999.
- [8] G. Libowitz, "Metallic hydrides: fundamental properties and applications", *J. Phys. Chem. Solids*, vol 55, p. 1461-1470, 1994.
- [9] L. Zaluski, A. Zaluska, J.O. Strom-Olsen; "Nanocrystalline metal hydrides", *J Alloy Compd.*, vol. 253-254, p. 70-79, 1997.
- [10] A. C. Switendick, *Phys. Chem. N. F.*, 117, p. 89, 1979
- [11] D. J. Westlake, *Journal of Less-Common Metals*, vol. 91, pp. 275, 1983
- [12] P. Rittmeyer and U. Wietelmann, *Hydrides in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5th Ed., Bohnet, M et al., Wiley-VCH, A13, p.199, 1996
- [13] A. R. Miedema, *Journal of Less-Common Metals*, vol. 32, p. 117, 1973
- [14] H.H. Van Mal, *Journal of Less-Common Metals*, vol. 35, p. 65, 1974
- [15] G. D. Sandrok, P.D. Goodell, *Journal of Less-Common Metals*, vol. 104, p. 119, 1984.
- [16] A. Zaluska, L. Zaluski, J. Ström-Olsen, "Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage", *J. Alloy Compd.*, vol. 288, p. 217-225, 1999.
- [17] B. Bogdanović, A. Ritter, B. Spliethoff, "Active MgH-Mg systems for reversible chemical energy storage", *Angew. Chem.*, vol 29, p. 223-328, 1990.
- [18] P. Wang, H. Zhang, B. Ding, Z. Hu, "Direct hydrogenation of Mg y decomposition behavior of the hydride formed", *J. Alloy Compd.*, vol. 313, p. 209-213, 2000.
- [19] H. Jónsson, S. Ólafsson, J. Guomundsson, "Light metal alloys for hydrogen storage", archivo de internet: <http://www.hi.is/~hj/HstorageBrief.pdf>.
- [20] <http://hydpark.ca.sandia.gov/PropertiesFrame.html>
- [21] G. Liang, E. Wang, S. Fang, "Hydrogen absorption and desorption characteristics of mechanically milled Mg---35wt.%FeTi<sub>12</sub> powders", *J. Alloy Compd.*, vol. 223, p. 111-114, 1995.
- [22] S. Orimo, H. Fujii, K. Ikeda, "Notable hydriding properties of a nanostructured composite material of the Mg<sub>2</sub>Ni-H system synthesized by reactive mechanical grinding", *Acta Mater.*, vol. 45, p. 331-341, 1997.
- [23] B. Bogdanovic, K. Bohmhammel, B. Christ, A. Reiser, K. Schlichte, R. Vehlen, U. Wolf, "Thermodynamic investigation of the magnesium-hydrogen system", *J. Alloy Compd.*, vol. 282, p. 84-92, 1999.
- [24] P. Hjort, A. Krozer, B. Kaseno, "Hydrogen sorption kinetics in partly oxidized Mg films", *J. Alloy Compd.*, vol. 237, p. 74-80, 1996.
- [25] F. Stillesjö, S. Ólafsson, B. Hjörvarsson, E. Karlsson, "Hydride formation in Mg/Ni multilayers, studied by hydrogen profiling and volumetric measurements", *Z. Phys. Chem.*, vol. 181, p. 343-351, 1993.
- [26] B. Vigeholm, K. Kjoller, B. Larsen, A. Pedersen, "Formation and decomposition of magnesium hydride", *J. Less-Common Metals*, vol. 89, p. 135-144, 1983.
- [27] J. Reilly, R. Wiswall, "The reaction of hydrogen with alloys of magnesium and nickel and the formation of Mg<sub>2</sub>NiH<sub>6</sub>", *Inorg. Chem.*, vol. 7, p. 2254-2246, 1968.
- [28] P. Vallejos, "Obtención y caracterización de aleaciones Mg-Ni almacenadoras de hidrógeno producidas por aleado mecánico", Tesis de Ingeniería Civil en Metalurgia, USACH, 1999.
- [29] P. Rojas, "Estudio de aleaciones Mg-Ni almacenadoras de hidrógeno producidas por aleado mecánico", Tesis de Ingeniería Civil en Metalurgia, USACH, 2000.
- [30] P. Rojas, "Estudio del compuesto Mg<sub>2</sub>Ni obtenido a través de aleado mecánico", Tesis Doctoral en Ciencias de la ingeniería, mención Ciencia e Ingeniería de Materiales, USACH, 2003.
- [31] M. Miranda, "Estudio del compuesto Mg<sub>2</sub>Ni obtenido mediante aleado mecánico en molino planetario", Tesis de Ingeniería de Ejecución en Metalurgia, USACH, 2004.

# ASPECTOS ESTRATEGICOS EN LA CIENCIA DE LOS MATERIALES: DE LA MACROESTRUCTURA HACIA LA NANOESTRUCTURA

**Dr. Yván Houbaert**

*Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería  
Universidad de Gante, Bélgica  
Yvan.Houbaert@UGent.be*

## RESUMEN

Las jóvenes generaciones empiezan a darle la espalda a los estudios científicos y/o tecnológicos, sobre todo en lo que se refiere a la ciencia y tecnología de los materiales. Sin embargo, un nuevo estímulo en esta disciplina es necesario para enfrentar y solucionar los problemas del mundo tecnológico moderno, como son el deterioro de la atmósfera y el peligro de agotamiento de las materias primas. En la ingeniería de los materiales las propiedades de los materiales toman una posición clave y es de máxima importancia entender los diferentes tipos de comportamiento y los límites impuestos en las propiedades por la física de los materiales.

En la parte técnica del presente trabajo, se da una breve revisión de las diferentes técnicas de caracterización de micro estructuras y de los defectos estructurales observables con cada una de ellas. Empezando con la microscopía óptica se explica que los avances logrados en la ciencia de los materiales van de acuerdo con los avances logrados en las técnicas de caracterización. En cuanto a los aspectos estratégicos en el desarrollo de nuevos materiales y de nuevas tecnologías, se trata de demostrar que se requiere un grado creciente de colaboración científica entre universidades, instituciones y gobiernos, tanto a escala nacional como internacional, debido al alto costo de los equipos y alto grado de complejidad.

## INTRODUCCIÓN

No es por casualidad que las grandes épocas en la historia del Hombre llevan los nombres de los materiales que fueron representativos para los desarrollos tecnológicos correspondientes. Los materiales siempre han sido el elemento clave de la tecnología y los avances logrados se deben al uso conciente de los materiales y a las modificaciones hechas por el hombre para modificar (es decir "mejorar") sus propiedades, o sea que la tecnología siempre gira alrededor de la ciencia y/o ingeniería de los materiales.

Desafortunadamente, en la actualidad las jóvenes generaciones parecen darle la espalda a los estudios científicos y/o tecnológicos y los números de estudiantes en las carreras de ingeniería (ciencias aplicadas) y

de ciencias exactas no aumentan, sobre todo si se comparan con las inscripciones en carreras de economía y administración de empresas y en las carreras consideradas "soft". Peor todavía, dentro de las carreras de ingeniería, el estudio de la carrera de "ingeniero en materiales" (sobre todo a nivel de bachelor/master) experimenta una popularidad en constante decline. Una de las posibles causas de esta evolución nefasta es que para una gran parte de la población con una edad alrededor de los 18-20 años, momento en el cual deben decidirse en cuanto a su futuro profesional, existe una marcada falta de conocimiento referente a los esfuerzos emprendidos por investigadores y empresarios para la producción y el desarrollo de los materiales actuales y de los llamados "nuevos" materiales.

Es la tarea de los profesores e investigadores en las universidades e instituciones de educación superior empeñarse en la promoción del estudio de los materiales, motivando a los jóvenes egresados de las escuelas secundarias en este sentido y luchando a nivel científico-político con las autoridades locales e internacionales para lograr un avance firme en la ciencia e ingeniería de los materiales. Algunos aspectos estratégicos y científicos/didácticos posiblemente útiles para esta lucha se presentan en las siguientes líneas.

### Consideraciones socio-eco-políticas

Es por eso que un tratado sobre aspectos estratégicos en el desarrollo de la ciencia e ingeniería de los materiales no puede ser completo sin una consideración de aspectos ecológicos. Es una evidencia que el impacto de la tecnología moderna sobre el medio ambiente es considerable y que representa una amenaza real para el futuro de la humanidad. Si bien es verdad que, aparte de consideraciones políticas, económicas o sociológicas, fuera del alcance del presente trabajo, son los avances científicos y tecnológicos los que pueden considerarse como el origen del desorbitante consumo de materia prima y de energía, también es verdad que el compromiso actual de la tecnología es de remediar, o por lo menos de frenar, estos excesos.

Ya desde hoy es visible que la mayor parte del esfuerzo científico y tecnológico debería de estar dedicado al desarrollo de nuevos materiales y de

nuevas técnicas, con el principal objetivo de reducir la presión sobre el medio ambiente. Uno de los grandes retos de la nueva tecnología y ciencia de los materiales es precisamente este desarrollo de procedimientos que aprovechen mejor los recursos de nuestro planeta. Una lista no exhaustiva contendría aspectos como: reciclaje, recubrimientos, materiales más resistentes, más duraderos,...

Los cursos actuales en ciencia de los materiales deben abarcar conceptos como la huella ecológica de los materiales y de los procesos, la sostenibilidad, o sea el crecimiento sostenible. El profesor debería parafrasear la siguiente descripción: "Sostenibilidad requiere que el tamaño de la población sea menor o igual que la capacidad de carga del ecosistema para el estándar de vida deseado".

Si consideramos la siguiente pregunta: "¿Qué es lo que amenaza el planeta?", las respuestas pueden ser múltiples:

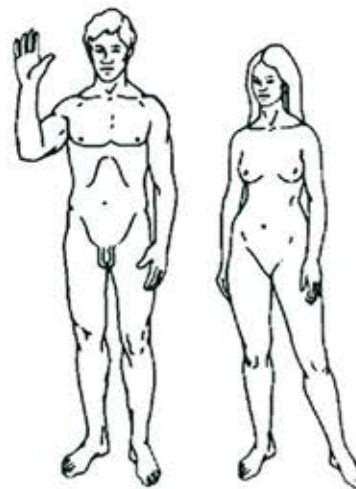
- Una catástrofe galáctica, como el percance del planeta con un asteroide grande, podría desestabilizar por completo nuestro mundo, cambiar el órbita de la tierra, destruyendo todo lo que conocemos en el planeta, pero no está al alcance del ser humano intervenir en un fenómeno de este tipo.
- La inevitable muerte del sol, pasando por las fases conocidas que experimentan todas las estrellas en el universo, finalmente destruirá nuestra planeta, pero solo después de un tiempo extremadamente largo, mientras que evitar esto tampoco está al alcance del ser humano.
- Una guerra nuclear absoluta y extrema, utilizando todo la fuerza atómica con la cual cuentan las naciones poderosas del mundo puede provocar hasta una fisura de la corteza del planeta, con un cambio completo de la atmósfera y la extinción de cualquier forma de vida en la tierra, pero es improbable que un acontecimiento de este tipo destruya el planeta entero.

Esto significa que tenemos la certidumbre que el planeta "Tierra" seguirá existiendo para muchos millones de años más, pero lo que no sabemos son las formas de vida que seguirán funcionando sobre la tierra y en los océanos y mares. Sobre todo el ser humano, llamado originalmente "homo sapiens", parece no tener toda la sabiduría necesaria para poder sobrevivir. En la actualidad, ya no se suele hablar del "homo sapiens", sino más bien del "homo fabrilis", el hombre que trabaja, que fabrica herramienta, que produce y construye.

El "homo fabrilis" modifica sus alrededores, construye edificios, cambia el transcurso de los ríos, construye diques, consume energía, extrae las reservas del planeta y tiende a consumirlas sin pensar en las consecuencias implicadas. El "hombre fabriles" tiende más a destruir

que a construir, aunque por lo común inconscientemente. ¿Cuánto tiempo sobrevivirá el "homo sapiens/fabriles" en nuestro planeta? Es una pregunta pertinente en este momento y tenemos la responsabilidad de utilizar nuestros conocimientos para remediar en todo lo que se ha ido destruyéndose hasta hoy. A veces nos preguntamos: ¿Hay otros seres parecidos a nosotros en el universo? Es muy poco probable que recibamos una respuesta muy pronto, mientras tanto el "homo sapiens" no está seguro de estar sólo en el universo.

El 2 de marzo de 1972 la sonda Pioneer X fue lanzada desde el Kennedy Space Center (Cabo Cañaveral, EE.UU.) con la misión de explorar los planetas Júpiter y Saturno del sistema solar y de luego seguir fuera de nuestro sistema planetario, rumbo a las demás estrellas de nuestra galáctica y sus posibles planetas. En esta sonda y en las siguientes del tipo Pioneer se ha montado una placa (figura 1) inscrita con un mensaje simbólico informando a una posible civilización extra terrestre, que pudiese interceptar las sondas, sobre el ser humano y su lugar de procedencia, la Tierra: una especie de "mensaje en una botella" interestelar. ¿Podemos servir de ejemplo para otras formas de vida o vamos a extinguirnos por nuestra propia falta de competencia? Es la gran tarea y el gran reto del ser humano de rescatar su planeta azul: la tecnología pone en peligro el planeta, pero la tecnología es la única forma de actuar y la ciencia y tecnología de materiales juegan un papel primordial en esta lucha.



**Figura 1: Placa montada en las sondas "Pioneer" e inscrita con un mensaje simbólico informando a una posible civilización extra terrestre sobre el ser humano y su procedencia.**

En los momentos que estamos viviendo ahora son varios los problemas que ponen en peligro la sobre vivencia del ser humano: existe una gran inestabilidad económica en el mundo, con una gran parte de la población sufriendo de nutrición insuficiente y una crisis financiera desmesurada,

con una guerra religiosa (¿o será más bien "de petróleo"?) entre la nación más prepotente del planeta y una religión que no es de su agrado, con un grave problema de contaminación ambiental y de sobrecalentamiento de la atmósfera, llevando entre otras cosas al deshielo de los polos y a una subida del nivel de los mares y océanos. Por ejemplo, en los Países Bajos, se estima que el nivel del mar para el año 2100 habrá subido ya con 0,65 hasta 1,30 m y para el año 2200 con 2 hasta 4 m [1]. Medidas preventivas para evitar la pérdida de enormes superficies en los Países Bajos son el incremento de la altura de los diques y el desplazamiento de la costa por un kilómetro hacia el mar. Esto involucrará un costo anual de 1.200 a 1.600 MÓ hasta 2050, representando un 0,5% dePNB de los Países Bajos.



Figura 2: Aspectos generales tratados en esta presentación

**Posibles remedios ofrecidos por la tecnología**

La finalidad del presente trabajo reúne diferentes aspectos: (1) desde el punto de vista de la enseñanza en materiales, proponer una estructura de cursos interrelacionados a través de una lógica basada en la investigación y en la relación entre la micro estructura y las propiedades estructurales, (2) desde el punto de vista de la investigación, demostrar que el estudio profundo de la micro y macro estructura ("desde micro hasta nano") de los materiales forma la base para su desarrollo continuo, (3) desde el punto de vista de una estrategia general presentar algunas reflexiones para lograr apoyo financiero a través de sus propias instituciones (la universidad misma, su propio gobierno,...) y de los organismos nacionales (ministerio de educación pública, consejos científicos,...) e inter-nacionales.

Como se ha dicho, la tecnología ha dañado al planeta, la tecnología tiene que buscar las vías para remediar y proteger a la especie "homo sapiens/fabrilis". Dado la posición central de los materiales, avances en la ciencia e ingeniería de los materiales son de primera importancia. La figura 3 muestra esquemáticamente, en un marco más amplio, la ubicación del área de la "Ingeniería de los Materiales", abarcando elementos

de la física y de la química, con un fuerte enlace hacia la ingeniería mecánica. La misma figura indica así mismo las relaciones entre las diferentes disciplinas científicas, dentro de la ciencia de los materiales. De allí la importancia de los cursos de ingeniería de materiales en un currículo de ingeniería mecánica.

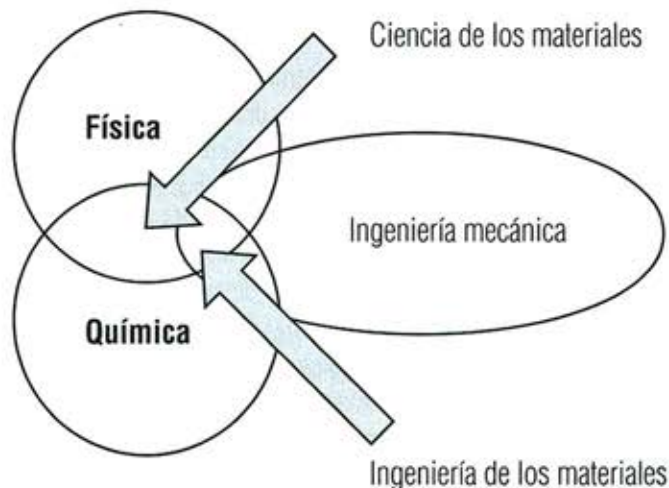


Figura 3: Posición de la Ingeniería de los Materiales en comparación con otras disciplinas

**Relación propiedades – micro estructura**

En la ingeniería de los materiales las propiedades de los materiales toman una posición clave y es de máxima importancia entender los diferentes tipos de comportamientos y los límites impuestos en las propiedades por la física de los materiales. Se consideran todo tipo de propiedades, usualmente clasificadas en las categorías: mecánicas, químicas, físicas, económicas, ecológicas,... Puesto que la gran mayoría de las propiedades estructurales de cada una de las clases de los materiales depende de su micro estructura, el estudio profundo de esta misma micro estructura forma la base de la ingeniería de los materiales.

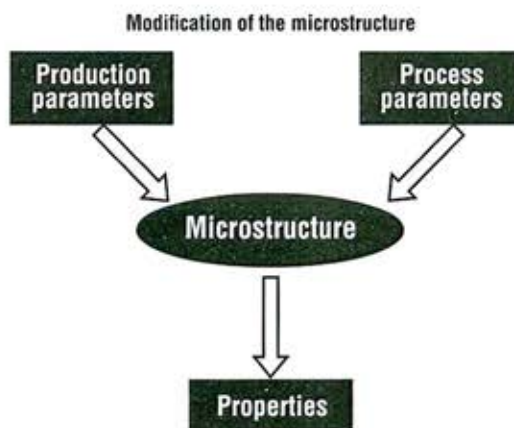


Figura 4: Relaciones entre parámetros de producto, parámetros de proceso y propiedades de materiales, a través de la micro estructura

Como se muestra en la figura 4, la micro estructura de un material está determinada y controlada por parámetros de producción (como p.ej. la composición química) y por parámetros de proceso (como p.ej. los tratamientos termomecánicos). No tan solo es necesario el conocimiento de los aspectos micro estructurales de los materiales para poder entender su relación con los mecanismos responsables para las propiedades, sino que también se requiere el conocimiento de los mecanismos de transformación dentro de los materiales, llevando a micro estructuras características a través de diferentes tipos de procesamiento, como tratamientos termomecánicos. En esta área de investigación aparecen estudios de la termodinámica de las aleaciones y de las transformaciones de fase con difusión y sin difusión (transformaciones martensíticas). En base a estos conocimientos es posible diseñar nuevos materiales, nuevos procedimientos y desplazar los límites de posible utilización de ciertos materiales.

### Caracterización de la micro estructura

La llamada "micro estructura" de un material se define muchas veces en los siguientes términos: descripción completa de los defectos estructurales del material, incluyendo su concentración, orientación, forma y distribución. La figura 5 da una representación esquemática de la micro estructura de un material, mostrando los principales defectos cristalinos en materiales metálicos polifásicos. La ciencia (tecnología) necesaria para obtener imágenes de la micro estructura se ha llamado "metalografía" cuando el énfasis estaba en los materiales metálicos, mientras que en la actualidad se suele hablar de "materialografía".

A continuación se exponen unos ejemplos de interrelación entre elementos de la micro estructura y el comportamiento de los materiales. Las propiedades mecánicas de los materiales son de primera importancia para el mundo moderno y dependen de la presencia de dislocaciones, cuyo movimiento está fuertemente influenciado por la presencia de otros defectos: átomos ajenos provocan endurecimiento por solución sólida, otras dislocaciones provocan endurecimiento por trabajo en frío, precipitados son la causa del endurecimiento por precipitación, etc... El tamaño del grano es muy importante para la capacidad de embutición (industria automovilística) y para las pérdidas magnéticas (industria eléctrica).

En estudios de transformaciones de fase, la difusión es el fenómeno fundamental para describir la cinética de la transformación. Sin embargo, la difusión en la masa del material ("bulk diffusion") depende de la concentración en lugares vacantes y la difusión es muy variable según el lugar en el cual ocurre: existe difusión acelerada por límites de grano, difusión acelerada por las dislocaciones, etc... Todos estos efectos tienen mucha importancia en la nucleación y el crecimiento de partículas de segunda fase y permiten controlar el grado de endurecimiento en aleaciones.

Finalmente, la descripción de la textura cristalográfica, representando la distribución de las orientaciones en un material policristalino, determina la capacidad para embutición del acero y las pérdidas magnéticas en aceros eléctricos. La introducción de las técnicas de análisis microscópico de la textura por medio de EBSD (electrón back-scattered diffraction) o sea difracción de los electrones retro-difundidos, ha representado una

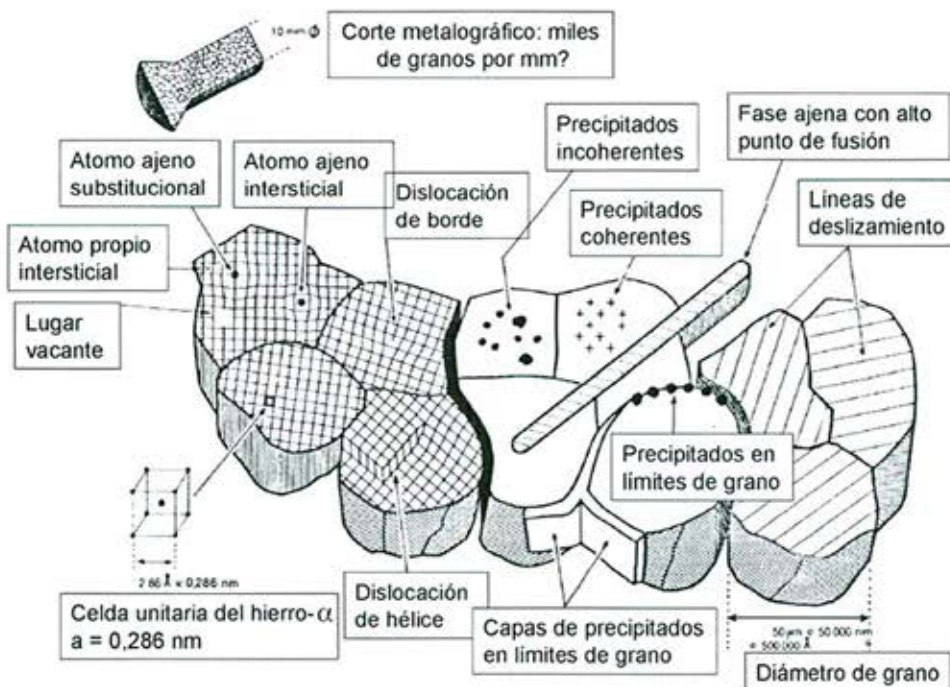


Figura 5: Representación esquemática de los defectos cristalinos en un material metálico policristalino

verdadera revolución en el estudio de los mecanismos de recristalización y de crecimiento de granos, por ejemplo a través de los trabajos de Kestens (UGent y TUDelft).

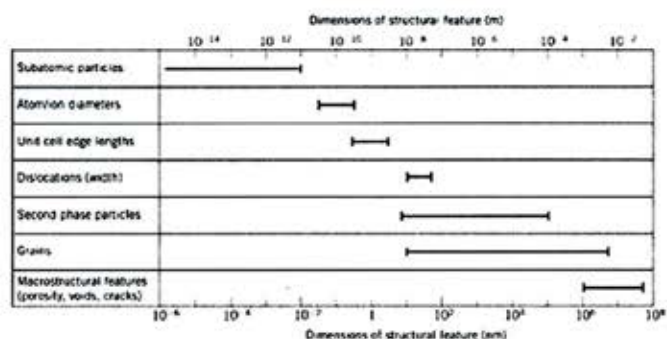


Figura 6: Dimensión de los defectos estructurales, elementos de la micro estructura de los materiales

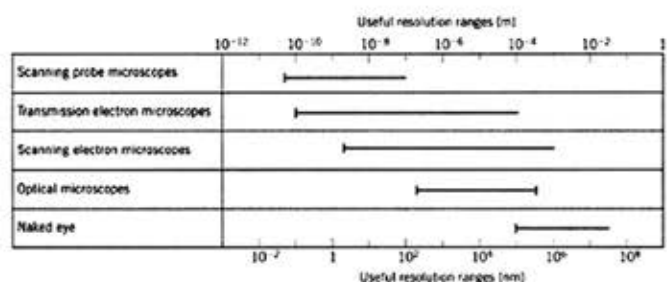


Figura 7: Algunas de las técnicas disponibles para observar ciertos defectos en los rangos de resolución correspondientes (SPM: microscopía de barrido con técnica de FIM y AP, TEM: microscopía electrónica de transmisión), SEM (microscopía electrónica de barrido), OM: microscopía óptica, NE: ojo desnudo).

Considerando el tamaño característico de cada uno de los defectos micro estructurales, las técnicas necesarias para observar las mismas habrán de ser elegidas en función de la resolución ofrecida por cada una de las técnicas (véase más adelante). La figura 6 muestra el rango de dimensiones de los defectos estructurales en orden de aumento y con dimensiones en nanómetros. Defectos y elementos estructurales con dimensiones en el rango del nanómetro pertenecen a la llamada "nanotecnología". Cada uno de los defectos mencionados es un elemento de la micro estructura y tiene una influencia sobre una o varias propiedades del material. Su identificación y estudio permiten entender y modelar el comportamiento de los materiales, pudiéndose llegar inclusive al diseño de nuevos materiales con propiedades predichas en base a las teorías.

La calidad de la investigación de un centro tecnológico en materiales dependerá en gran medida de la capacidad de medición de los defectos y de la resolución alcanzable. La figura 7 muestra algunas de las técnicas de caracterización de materiales que pueden ser utilizadas para visualizar al-

gunos de los defectos mencionados arriba. Sobre todo en el rango de los instrumentos con resoluciones acercándose a la escala nanométrica, los costos son muy elevados (rango de varios M) y es casi imposible que pequeñas entidades de investigación y de enseñanza tengan los fondos necesarios para este tipo de inversiones (ver más adelante la estrategia).

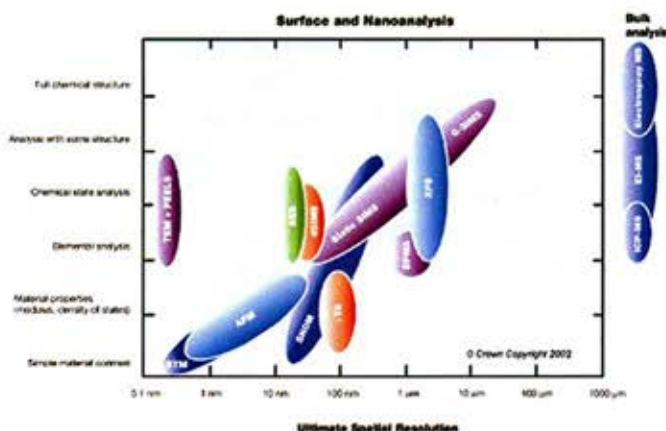


Figura 8: Técnicas de caracterización química en superficie o en masa y su máxima resolución lateral

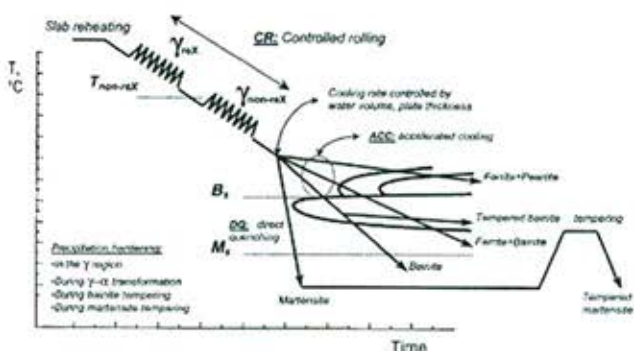
Las técnicas mencionadas en la figura 7 se utilizan únicamente para determinar defectos estructurales en la masa y no se consideran variaciones de la composición química de los materiales. Sin embargo, efectos químicos en la superficie o en el interior de los materiales son de suma importancia tecnológica. Por ejemplo, en muchos casos es posible ahorrar grandes cantidades apreciables de material valioso utilizando recubrimientos dedicados sobre un material de base con requerimientos más elementales y entonces de menor costo. En estos casos es muy importante investigar cambios de concentración, segregaciones, precipitaciones, etc... Para eso, se necesita una resolución química y una resolución espacial (lateral y en profundidad) suficiente.

La figura 8 muestra una vista general de técnicas de caracterización química en superficie y en profundidad, con alta resolución. Unos ejemplos de técnicas incluidas en la figura son: SIMS (secondary ion mass spectroscopy), XPS (photo-electron spectroscopy), EPMA (electrón probe for micro analysis), AFM (atomic force microscopy), AES (Auger electron spectroscopy). Obviamente, también estos equipos son de muy alta gama y tienen precios considerables, de modo que sólo son accesibles para universidades estableciendo consorcios de investigación, como por ejemplo en la Universiteit Gent para el FIB-SEM (un microscopio electrónico de barrido (fuente de electrones FEG) y equipado con un focussed ion beam para efectuar cortes microscópicos en el material) y para el HR-TEM (microscopio electrónico de transmisión de alta resolución). Los consorcios establecidos para la adquisición de estos equipos com-

prenden diferentes grupos de investigación en materiales perteneciendo a diferentes departamentos de diferentes facultades de la universidad.

#### Control de la micro estructura

Ya se explicó más arriba que la micro estructura es determinante para el comportamiento de los materiales. En los laboratorios del Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería de la Universidad de Gante existe una larga tradición en el campo de la investigación de los aceros en particular y de materiales ferrosos en general. Durante las últimas décadas todos los trabajos se han iniciado después de un estudio profundo de la literatura y de discusiones teóricas muy extensas, basadas en el conocimiento de la metalurgia física, la cual es una de las especialidades dentro de la ciencia de los materiales.



**Figura 9: Diagrama esquemático con tratamientos termomecánicos, tipos de enfriamiento, deformación por laminación y paso a través de un diagrama CCT con diferentes velocidades de enfriamiento, llevando a micro estructuras complejas (según B.C. De Cooman)**

Con fundamentos en un conocimiento profundo de las transformaciones de fase en los materiales en base al acero y disponiendo de información muy completa sobre diagramas de transformación, ha sido posible llevar a cabo trabajo científico de alto nivel y con mucho éxito, desarrollándose nuevos aceros, cada vez de mejor calidad, desplazando continuamente los límites previamente establecidos. Estos desarrollos son posibles gracias a la disponibilidad de equipo avanzado y de un know-how construido durante varios años de programas de enseñanza bien preparados, así como de una cantidad supercrítica de personal docente de alta calidad, con amplia experiencia industrial y/o en el extranjero. Estos son elementos estratégicos importantes para cualquier institución de enseñanza e investigación en materiales (ver también más adelante).

La figura 9 servirá de ejemplo para ilustrar la relación entre conocimientos teóricos, creatividad y un conocimiento suficientemente profundo de la metalurgia física de los aceros. En el diagrama CCT representado, se muestran en forma esquemática una serie de posibles tratamientos termomecánicos llevando a una serie de aceros con micro estructura varia-

ble y una serie de propiedades determinadas por dicha micro estructura. En la literatura se encontrarán numerosas publicaciones, también de nuestro departamento, reportando resultados de experimentos de esta índole. Mientras que hace a penas unas décadas la producción de acero era un arte, con tratamientos térmicos a temperaturas caracterizadas con conceptos como "color de ala de mosca", en la actualidad todos los procesos son muy exactos y controlados, no se deja nada a la casualidad y se logran propiedades de las cuales sólo era posible soñar en aquel entonces.

El desarrollo de nuevos aceros (nuevos materiales) a partir de este tipo de diseño experimental lleva finalmente a un mejor aprovechamiento de los recursos del planeta: aumentando la resistencia mecánica de los aceros, el uso de espesores más bajos se posibilita, con una reducción en el consumo de materia prima y una reducción de peso del vehículo, llevando a un ahorro de energía. Otros desarrollos ocurrieron en tratamientos superficiales para evitar la corrosión, optimización de la micro estructura para absorber energía en caso de impacto, etc... Aquí, más que en otro lugar, se puede poner (con una ligera exageración): "the sky is the limit".

#### Aspectos estratégicos

Nuestro planeta está en constante evolución y la tendencia hacia la globalización se hace sentir en todos los niveles de la sociedad. Las empresas se vuelven cada vez más multinacionales y cada vez más grandes. Es útil dar aquí un ejemplo de la evolución durante las últimas décadas, con influencia sobre la estrategia de la investigación en materiales en Gante, Bélgica: uno de los socios industriales más importantes de nuestro departamento ha sido por muchos años "Sidmar", una empresa siderúrgica, formando originalmente parte del grupo ARBED, luego del grupo Arcelor y finalmente fue integrada en el grupo ArcelorMittal (figura 10).



**Figura 10: El señor Mittal (derecha) después de haber adquirido la empresa siderúrgica "Sidmar" en Gante, Bélgica (en el fondo, el centro de investigaciones OCAS)**

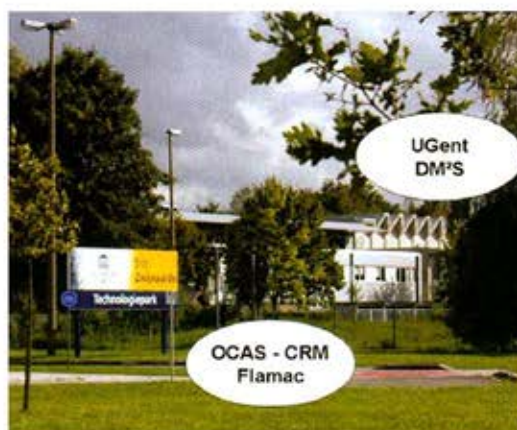
Un fenómeno similar se presenta en el mundo científico: las entidades de investigación tienen que alcanzar una masa crítica cada vez más grande y las asociaciones y/o consorcios se forman de manera acelerada. De no hacerlo, cada grupo de investigadores corre el peligro de quedar aislado y de perder la oportunidad de participar en los grandes proyectos, elaborándose a nivel internacional y muchas veces hasta mundial. Esto representa un gran peligro para la calidad de la enseñanza y de la investigación en países con menos impacto económico, como p.ej. los países de América Latina.



**Figura 11: Logo del consorcio HR-TEM de la UGent, con mención de los departamentos involucrados (diseño R. Van Hecke, DMSE, UGent)**

Como se mencionó arriba, el costo de los equipos modernos para la caracterización de la micro estructura de los materiales es enorme y ya no es posible para un departamento adquirirlos. Es sólo a través de la formación de consorcios, fomentados por las propias universidades, que es posible seguir en la punta de la investigación y de conseguir una infraestructura actualizada. Cabe mencionar aquí como ejemplo el consorcio HR-TEM de la Universiteit Gent (figura 11), con participación de nuestro departamento (para el aspecto de los materiales metálicos), en colaboración con varios grupos de investigación de la Facultad de Ciencias para los aspectos de nanotecnología en polímeros y cerámica.

La formación de consorcios dentro de las universidades es sólo uno de los pasos necesarios para lograr mayor fuerza de impacto. Asociaciones entre universidades y entre universidades y empresas son cada vez más importantes. Desde hace ya varios años existe un edificio "duplex" sobre el campus Zwijnaarde de la UGent, incorporando las actividades del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería de la Universidad de Gante, con parte de las actividades de OCAS (centro de investigación de ArcelorMittal), del CRM (Centre for Research in Metallurgy) y el FLAMAC (Flanders Materials Centre). Esta convivencia fomenta la colaboración científica y asegura más éxito en la presentación de proyectos comunes.



**Figura 12: Conjunto de edificios e instalaciones de la UGent, OCAS, CRM y FLAMAC en el Campus Zwijnaarde**

Finalmente, desde el punto de vista de la enseñanza, también es importante el enfoque internacional y el intercambio de estudiantes en los programas de maestría y de doctorado. En muchos casos una estancia previa en centros de investigación en el extranjero es una condición "sine qua non" para obtener un puesto fijo en las universidades. Los intercambios de tipo Sócrates-Erasmus son cada vez más importantes y deben de ser apoyados por las universidades y sus departamentos.

Hemos tenido un promedio anual de unos 10 estudiantes Erasmus en nuestro departamento durante los últimos 15 años, una gran parte de ellos procedentes de universidades españolas. Ellos contribuyen a la investigación científica en programas cortos, pero muchos de ellos han quedado en el mismo departamento para llevar a cabo estudios de doctorado, antes de regresar a sus países correspondientes. Esto sólo es posible para un departamento que tenga suficiente fuerza de impacto y tutores disponibles para dirigir el trabajo de investigación (figura 13).

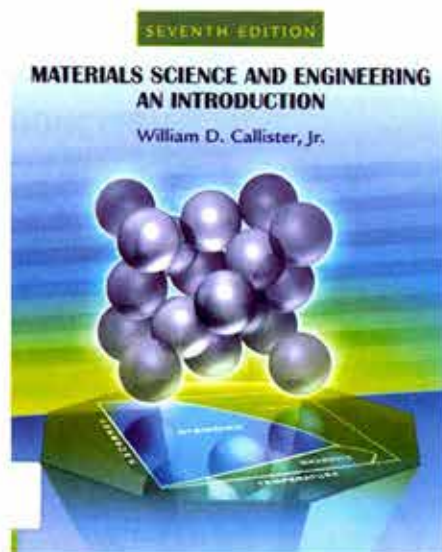


**Figura 13: Interacción entre los estudiantes de doctorado y sus tutores (www.phdcomics.com)**

### Aspectos didácticos

Dentro de los programas de estudios para ingeniería de materiales se ofrecen diferentes cursos, algunos de contenido general (nivel "bachelor"), otros más especializados (nivel "master"). Es muy importante motivar a los estudiantes de nivel "bachelor" para que luego opten por una

maestría en materiales. Existe en el programa de la UGent una serie de cursos elementales en materiales, enseñados en el programa "bachelor", en los cuales se tratan los temas generales, basándose en un libro de texto conocido y bien aceptado en varias instituciones del mundo: "Materials Science and Engineering: an introduction" de W.D. Callister jr. (figura 14).

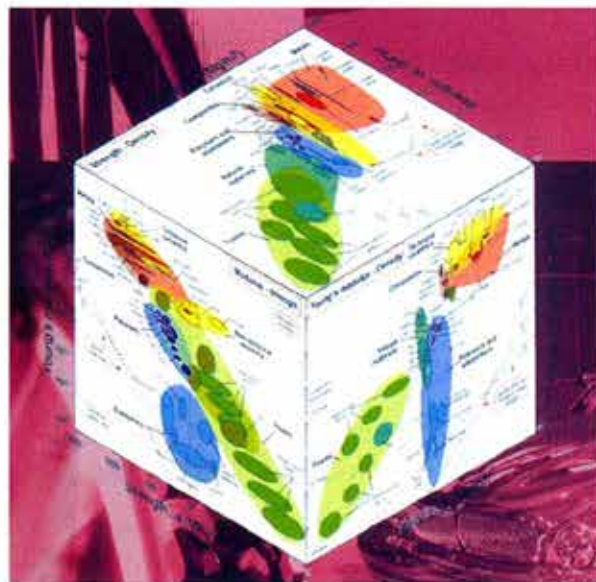


**Figura 14: Portada del libro de texto utilizado en los primeros cursos "bachelor" en la Facultad de Ingeniería de la UGent**

Este libro ha conocido una excelente aceptación dentro de nuestros programas y se utiliza como libro de texto oficial para la materia. El hecho que el libro está en su versión original en inglés no representa ningún inconveniente mayor, al contrario esto incita a los estudiantes a acostumbrarse a literatura en otros idiomas. Las clases se dan ex cátedra, con la ayuda de una serie de presentaciones en ppt con mucha ilustración y ejemplos de la vida diaria. Las presentaciones completas (24 tópicos diferentes, cada uno en una presentación ppt de entre 50 y 150 diapositivas) están a la disposición de los alumnos a través de una plataforma didáctica "Minerva". El examen es con libro abierto y enfocado hacia la aplicación de los conocimientos obtenidos durante el curso.

Además de las clases teóricas, se inició a partir del presente curso académico con la implantación de unas sesiones prácticas, para todos los alumnos a nivel "bachelor", en las cuales aprenden a utilizar el paquete de selección de materiales diseñado por M. Ashby de la Universidad de Cambridge (figura 15). Para esto, se adquirió una licencia oficial y se instaló el programa sobre un servidor de la facultad. Los alumnos se reparten entre las diferentes salas de computación de la facultad, con asistencia de colaboradores de nuestro departamento, para estudiar y resolver problemas de selección de materiales. Sin lugar a dudas, un modo de obrar como mencionado arriba debe de motivar a los jóvenes estudiantes de ingeniería y llevar a un aumento en el interés en este tipo

de carrera y a un incremento en número de estudiantes.



**Figura 15: Selección de materiales con la ayuda del paquete Cambridge Engineering Selector (CES) de M. Ashby**

### Conclusiones

El reto del siglo XXI es de salvaguardar la viabilidad de nuestro planeta para el ser humano. Con este fin es absolutamente necesario un desarrollo tecnológico sostenible, con respecto para el medio ambiente y respecto para las reservas energéticas y de materia prima del planeta. Dentro de todas las áreas de tecnología, la ciencia de los materiales juega un papel sobresaliente. En estos momentos es preciso invertir suficiente energía en este tipo de actividades, por un lado con el fin de formar a un número siempre incrementando de ingenieros especializados en materiales, con buenos fundamentos físicos y químicos, y, por otro lado, invertir en laboratorios suficientemente grandes y bien equipados.

En cuanto a equipo para estos laboratorios, se trata en primera instancia de aparatos para observar y cuantificar la micro estructura, con el fin de describir completamente los defectos estructurales del material, incluyendo su concentración, orientación, forma y distribución. Bajando hasta la escala de los defectos más pequeños, se entra en el mundo de la nanotecnología, con materiales nuevos y presentando propiedades novedosas. Dado el precio muy elevado de los equipos de alta resolución, es sólo posible llevar a cabo investigación de este tipo organizándose en consorcios dentro de una institución o colaborando entre diferentes instituciones.

Para entender el comportamiento de los materiales es necesario conocer las relaciones entre propiedades y micro estructura y saber cómo modificarla. El tiempo de los sabios encerrados en sus torres de marfil

ha terminado ya desde hace muchos años. Ahora el avance está en la colaboración entre instituciones, industrias y países.

Para terminar, queremos citar las palabras del profesor Tony De Ardo, pronunciadas en la ocasión de la 17ma Conferencia de Laminación, organizada en Rosario, Argentina, del 10 al 13 de Noviembre de 2008: "El acero no es un material muy tradicional... continúa rompiendo paradigmas metalúrgicos y revolucionando procesos y productos". Los "nuevos materiales" incluyen también los desarrollos actuales de los materiales llamados "tradicionales", pero sólo pueden llevarse a cabo si uno dispone de alta tecnología y de ingenieros en materiales bien preparados.

## REFERENCIAS

1. Periódico "*De Standaard*", Bélgica, 4 de septiembre de 2008

## CONTACTO

yvan.houbaert@ugent.be

# TREFILACION EN ACEROS: ALGUNOS PROBLEMAS CLASICOS

Alfredo Artigas A.\* y Katherine Cornejo C.\*\*

(\* ) Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile

(\*\* ) Laboratorios SIMET-USACH, Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile

## 1.-INTRODUCCIÓN

**Definición de trefilación:** "Es una de las más antiguas operaciones de conformado de metales y consiste, esencialmente, en reducir la sección de una barra haciéndola pasar a través de una matriz por estirado en frío." [1]

Mediante este método, se pueden obtener productos largos de sección constante de excelente calidad superficial y dimensiones bastante precisas, siempre y cuando exista una rigurosa mantención de las hileras. El trefilado se lleva a cabo normalmente de manera continua, a temperatura ambiente y con hileras en serie (proceso en multipasos), las que son lubricadas con el paso del alambre, el cual pasa a través de las hileras en forma sucesiva con el fin de optimizar los recursos. La velocidad de los procesos industriales puede alcanzar los 20 m/s. Es fundamental que la fuerza de tiro o la tensión de trefilado, no exceda al límite de fluencia del material (de otra manera ocurrirían fracturas o deformaciones). De hecho, las consideraciones prácticas limitan a menudo el esfuerzo de tiro a cerca de 60% del máximo teórico. Por lo tanto, la reducción de área por paso es raramente superior que un 30 o 35%.

Los alambres redondos trefilados y sus productos tienen una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo, cableados eléctricos, miembros estructurales, electrodos de soldadura, resortes, rayos para ruedas e instrumentos musicales de cuerda.

El alargamiento que es posible obtener por la tracción a través de un dado de trefilación es mucho más importante que el alargamiento por tracción simple, ya que se originan esfuerzos de compresión que permiten aprovechar al máximo la plasticidad del material disminuyendo los riesgos de ruptura.

Si no existiera fricción en las paredes de la hilera no existiría acumulación de esfuerzos residuales en el material, pero como en la práctica esto no sucede, siempre quedan esfuerzos elásticos en los productos terminados que endurecen el material [2].

## 2.-ESFUERZOS DURANTE EL TREFILADO [3]

Para analizar los esfuerzos de trefilación, se presenta la siguiente figura explicativa:

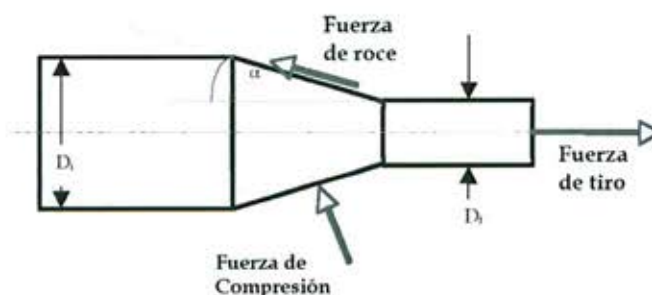


Figura 1. Esquema de las fuerzas que se aplican en la deformación plástica del trefilado.

Las fuerzas de tiro y de roce no producen grandes dificultades en el análisis de fuerzas. Sin embargo la deformación por cizallamiento produce problemas debido a que no es uniforme; en la actualidad aún no se ha podido encontrar una solución adecuada para su análisis.

El equilibrio de fuerzas que existe en el sentido de trefilación se analiza considerando un área infinitesimal para obtener los esfuerzos involucrados. Luego se utiliza un criterio de fluencia (Tresca) para relacionar los esfuerzos calculados con una propiedad del material (el esfuerzo de fluencia). El esfuerzo que se necesita para trefilar debe ser superior al límite elástico del material. De lo anterior resulta la siguiente expresión matemática (1):

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left( \frac{1+B}{B} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^{2B} \right) \quad (1)$$

Donde  $\sigma$ : Esfuerzo necesario para trefilar.

$\sigma_0$ : Límite de fluencia.

$B = \mu \cdot \text{ctg}\alpha$ , siendo el coeficiente de roce y el semiángulo de hilera.

$D_i$ : Diámetro a la entrada de la hilera.

$D_f$ : Diámetro a la salida de la hilera.

Entonces, la fuerza necesaria para trefilar dependerá esencialmente de los siguientes parámetros:

- El semiángulo de la hilera.
- Porcentaje de reducción del alambre.
- Límite elástico del material.
- Fricción, que depende de material, de la hilera, de la lubricación y de la velocidad.

Estudios de deformación con retículas grabadas longitudinalmente en barras trefiladas[4] señalan que la deformación resultante del proceso no es homogénea. La figura 2 se aprecia que para la misma reducción de área, el flujo de material en la superficie del alambre es más significativo cuando se utilizan mayores semiángulos (caso b).

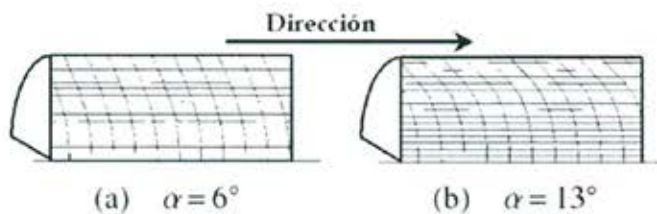


Figura 2. Representación esquemática del cambio de flujo producto de variaciones en el semiángulo de la hilera.

Por otro lado, si se mantiene un ángulo fijo y se aumenta la reducción, la deformación redundante disminuye debido a que se reducen los esfuerzos de compresión y se facilita el flujo de material a través de la hilera. Teorías al respecto señalan que es posible despreciar la deformación por cizalle cuando existen reducciones elevadas.

Por este motivo, el efecto del semiángulo de aproximación sobre el flujo del metal no puede considerarse independiente de la reducción de área. Las teorías modernas de trefilación incorporan estos dos parámetros utilizando la expresión (2): [5]

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \left[ 1 + (1-r)^2 \right] \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  es el semiángulo de la hilera en radianes y  $r$  es la fracción de reducción dada por  $r = 1 - \frac{A_1}{A_0}$ , ( $A_0$  y  $A_1$  son las secciones transversales del alambre trefilado)

De este modo se establece que bajos valores de  $\Delta$  originan excesiva de fricción en la intercara hilera-metal y que altos valores de  $\Delta$  podrían involucrar deformaciones internas (de trabajo redundante) superiores a lo que dicta la teoría.

Desde el punto de vista energético, la fuerza de trefilación se construye con tres componentes: la energía para la deformación interna, para la deformación redundante y para suplir las pérdidas por fricción. [2]

La figura 3 muestra que con semiángulos muy pequeños predomina la fricción y ella hace que la fuerza de tiro sea excesiva. A medida que el semiángulo se amplifica, la fricción disminuye drásticamente y en respuesta a ello, la energía disponible se utiliza para aumentar la deformación por cizalle lo que genera un consumo energético por trabajo redundante.

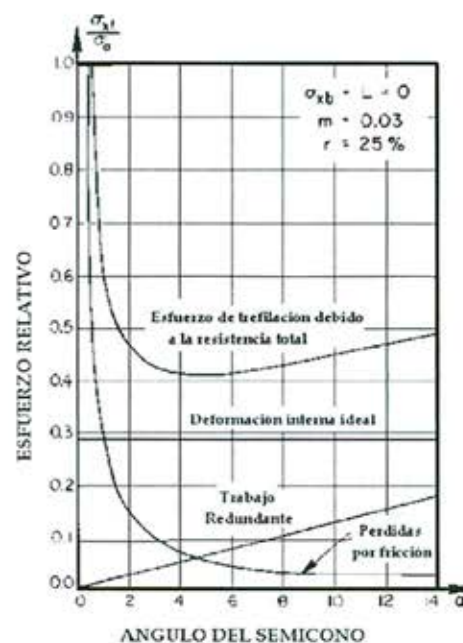
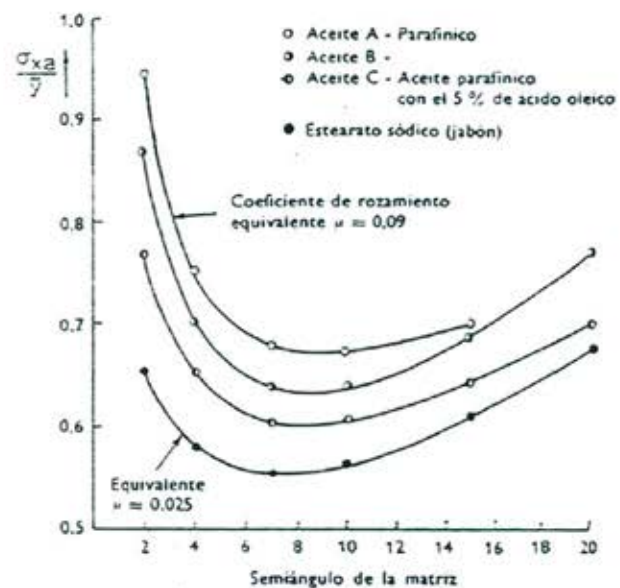


Figura 3. Gráficos de la dependencia del esfuerzo de trefilación con el ángulo de aproximación [2,6]

En la figura 4 se observa la importancia de mantener un ángulo adecuado en las hileras. En cada representación se aprecia que el material se comporta como un fluido y que dependiendo de la geometría de la hilera, se pueden presentar convergencias o divergencias (levantamientos) frente a la matriz. El mejor estado se logra para el caso N°2 donde las disonancias se equilibran y el esfuerzo se minimiza.

Si bien el gráfico no tiene unidades, porque no considera un material en particular, es lo suficientemente claro para entender que existen condi-

ciones donde el proceso se vuelve crítico. Por ejemplo cuando el ángulo de la hilera origina la situación N° 5, la divergencia del material llega a tal grado que la herramienta comienza a "afeitar" parte del alambre. Por otro lado en el caso N°7, se observa un fenómeno flujo discontinuo, muy difícil de estudiar (ver figura 5) donde la velocidad de salida del alambre es mayor a la velocidad de entrada y entonces deja de cumplirse el balance de volumen. En este caso puede ocurrir un agrietamiento interno dependiendo de las propiedades del material. [7]

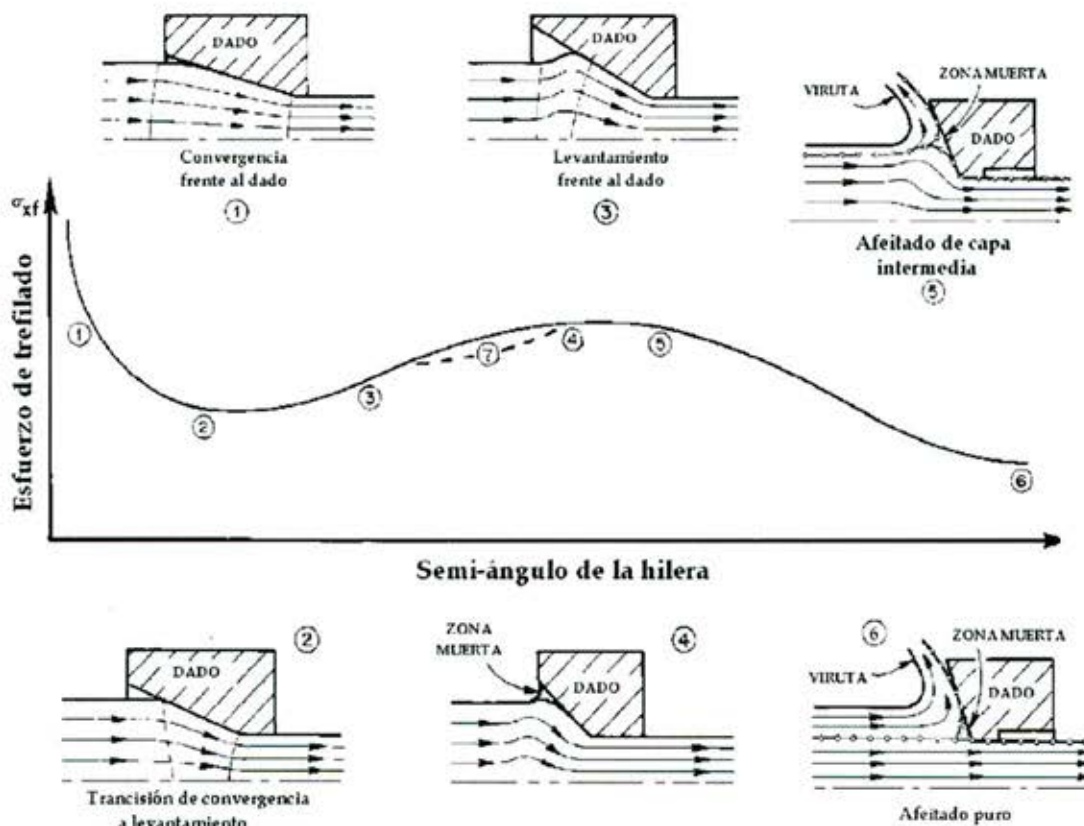


Figura 4. Variación del esfuerzo de trefilación y el flujo de material con el aumento del semiángulo de la hilera.

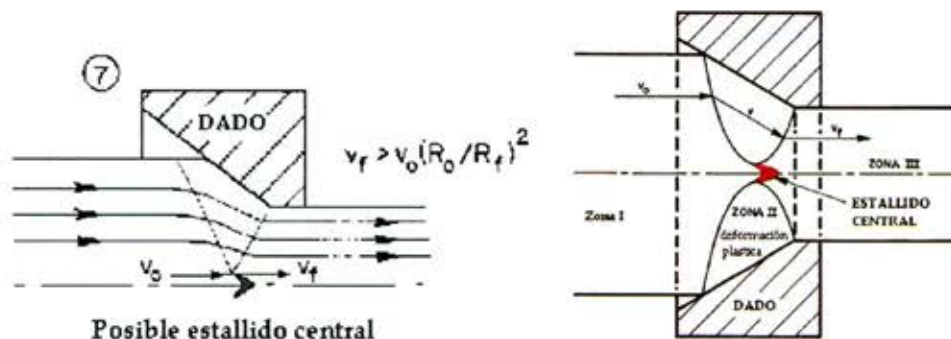


Figura 5. Fenómeno de estallido interno para el estado N°7 del gráfico anterior.

Este agrietamiento es axial y se presenta en forma de cono tal como se observa en la figura anterior. Una vez que el estallido se crea, el equilibrio de volumen se restablece y por breves instantes las líneas de deformación logran alcanzar el centro del material hasta que nuevamente se desajusta el sistema generándose un efecto cíclico.

Las grietas al interior del producto en la mayoría de los casos no logran ser detectadas a tiempo y por ello el material trefilado presenta fracturas inesperadas cuando se encuentra en servicio. Las grietas internas son también llamadas "de tipo patrón o chevron" y perjudican enormemente las propiedades del material provocando extrema fragilidad.

Las observaciones realizadas por investigadores[5] señalan que el estallido interno ocurre con reducciones relativamente bajas, amplios ángulos y severas deformaciones en frío del material (anteriores o posteriores a la formación de la grieta). Basándose en resultados a nivel industrial el estallido interno no ocurre todos los especímenes evaluados.

### 3.-PROBLEMAS CLÁSICOS DE TREFILACIÓN:

En trefilación se presentan frecuentemente problemas que se repiten normalmente, tales como:

- Cortes números sin una clara explicación.
- Desgaste excesivo de los dados, pérdida de dimensión.
- Trabajar a menores velocidades producto de reiterativos cortes.

Si bien es cierto que son problemas diferentes, normalmente se manifiestan en cortes, que es la principal causa de pérdida de productividad ya que por lo general las máquinas trefiladoras de alambre son de varios dados enhebrados, que bajo la presencia de un corte se pierde bastante tiempo en enhebrar de nuevo a máquina.

Por lo tanto, lo que se desea plantear es poder determinar de la mejor manera, las causas de las fallas según un análisis de los cortes durante la trefilación de alambres.

**3.1.-Cortes con pliegues del alambre**, fractura característica por no presentar un corte claramente en  $45^\circ$  y además de presentar una línea característica en el alambre (ver figura 6).



**Figura 6. Imagen fotográfica y microscopía electrónica de barrido de corte debido a pliegues del alambre.**

Sin bien es cierto que este tipo de cortes no corresponden necesariamente al mismo origen, se pueden evaluar las distintas hipótesis:

- Este desgarró o línea que se marca en el alambón puede deberse a problemas de incrustaciones en el alambón, que luego de los sucesivos pasos puede provocar el pliegue mostrado
- Otra alternativa es un problema geométrico del alambón, es decir la existencia de hombros de laminación que provocarían este daño superficial durante el trefilado y en consecuencia producir el corte.
- La existencia de pliegues de laminación.
- Un posible mal decalaminado mecánico, producto de una capa de óxido de difícil remoción (por las condiciones de enfriamiento en la fabricación del alambón).

Este tipo de corte fue producto de la propagación de una grieta, tal como se muestra en la micrografía de la figura 7:



**Figura 7. Micrografía de grietas superficiales, iniciadoras de cortes por pliegues.**

**3.2.-Cortes a  $45^\circ$** , en Z o en V, con presencia de desgarró o irregularidades superficiales causantes de la fractura (ver figura 8).



**Figura 8. Imágenes fotográficas de corte a 45°, Z, V, con presencia de desgarros o irregularidades superficiales.**

Este tipo de corte, que tiene una apariencia frágil, se puede deber a las siguientes causas:

- Problemas de alineación de las hileras de trefilación, donde una desalineación puede provocar marcas en el material.
- También existe la posibilidad de que la materia prima tenga incrustaciones o defecto que puedan provocar los desgarros superficiales
- Por último también existe una alta posibilidad que sean problemas de pulido de hileras que pueden desgarrar el alambre



**Figura 9. a) Daño superficial en el alambre del trefilado húmedo. b) Hilera con imperfecciones internas.**

**3.3.-Cortes por Cono y Copa, fractura dúctil,** imposible de distinguir si es una falla operacional o descompensación de las hileras, sólo distinguibles observando al momento del corte. (Figura 10).



**Figura 10. Imagen fotográfica de corte tipo cono y copa.**

Los cortes con aspecto de cono y copa con estricción son atribuibles exclusivamente al proceso de trefilación (al acero experimento una alta deformación antes de la fractura), los cuales se subdividen en dos partes difícilmente distinguibles luego de ocurrida la fractura:

- Fractura del tipo cono y copa operacional, son atribuidos a problemas del operario y/o de mantención de las trefiladoras.
- Fractura del tipo cono y copa por descompensación de hileras, debido a malas prácticas del cambio de hileras, sumados a posibles desviaciones en la fabricación de la mismas (dados de trefilación).

**3.4.-Fracturas asociadas a rayaduras excesivas del alambón,** produciendo una fractura cono y copa (Figura 11).



**Figura 11. Imagen fotográfica de corte tipo cono y copa, debido a rayaduras de alambres.**

Este tipo de cortes que son de baja frecuencia, son atribuidos al rayado de la hilera producto de lo siguiente:

- Problemas del esmerilado en el proceso de soldadura del alambre, los cuales producirían el rayado.
- Falta y/o falla en la lubricación de las hileras con el alambre.
- Cortes producidos por soldadura provocarían también el rayado de la hilera.
- Problemas en el pulido de las hileras en el taller de hileras.
- Problemas de decalaminación del alambón, provocando el rayado de la hilera.

**3.5.-Fractura cono y copa sin estricción** (Figura 12).



**Figura 12. Imagen fotográfica de corte tipo cono y copa sin estricción.**

Los cortes denominados cono y copa sin estricción (también llamados tipo Chevron) son atribuidos exclusivamente a cortes ocasionados por problemas de diseño y/o fabricación de hileras. Este hecho está ampliamente respaldado en la literatura (ver figura 5), y se puede deber a lo siguiente:

- Las especificaciones de ángulos de trefilación no son los adecuados provocando un desgarro en el interior del alambre.
- También es posible que ocurra esta anomalía, cuando los porcentajes de reducción no son los adecuados.
- Otra posibilidad es que en el taller de hileras no se asegure bien, el ángulo especificado.
- La no existencia de un procedimiento claro en la reposición de hileras puede llevar a un desgaste desmesurado de la hilera cambiando el ángulo del dado y en consiguiente provocando un corte

En la figura 13 se aprecia una imagen de los defectos internos que se producen en interior del alambre debido a problemas atribuidos al mal diseño de la hilera.

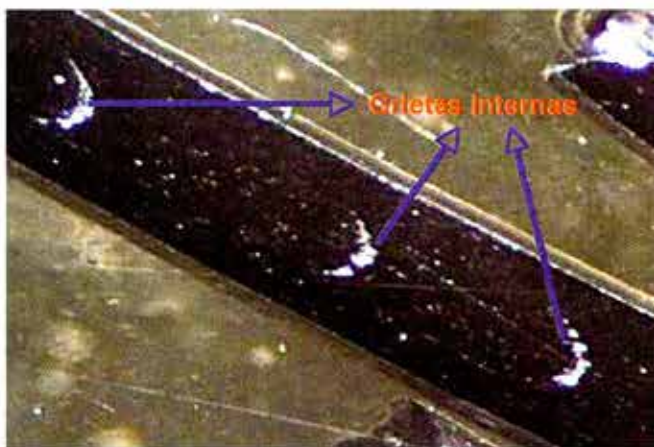


Figura 13. Imagen fotográfica de defectos internos, tipo Chevron.

**3.6.-Cortes por soldadura**, este tipo de cortes no siempre es fácil de determinar, sólo es posible cuando se corta en las primeras pasadas luego de la soldadura, con ello se han clasificado en dos tipos: fracturas cono y copa con rayas de esmeril, figuras 14 y fractura con rayas de esmeril con un corte de 90°, figura 15.



Figura 14. Imagen fotográfica de fracturas cono y copa con rayas de esmeril.

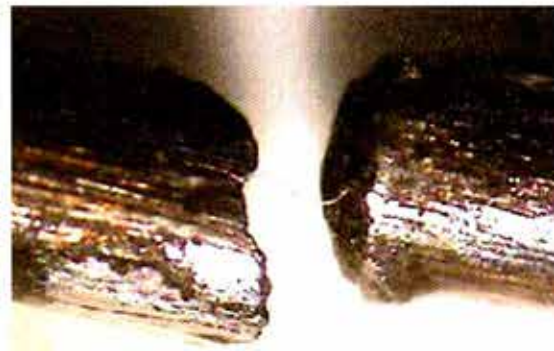


Figura 15. Imagen fotográfica de fracturas con rayas de esmeril con un corte a 90°

Este tipo de cortes aparecen por una soldadura deficiente (proceso de unión de los alambres para asegurar la continuidad de la trefilación) ocurrirían principalmente por lo siguiente:

- La no existencia de un cumplimiento del procedimiento de soldadura en cuanto a la densidad de corriente.
- El procedimiento inadecuado del esmerilado del alambre antes y después de la soldadura utilizar una piedra de esmeril de grano grueso.

Todos estos puntos antes expuestos provocaban una gran cantidad de cortes, los que podrían provocar el rayado de la hilera generando tiempos óseos debido al cambio completo del tren de trefilado.

**3.7.- Cortes por presencia de incrustaciones y/o inclusiones, fracturas sin clasificación, poco comunes (Figura 16).**



**Figura 16. Imágenes fotográficas de fracturas debido a incrustaciones y/o inclusiones.**

Estos cortes, que son menores, pueden deberse a múltiples causas de difícil detección, como problemas de inclusiones, incrustaciones, problemas menores de trefilación, etc. Sin embargo si se puede tomar acciones correctivas en los puntos anteriores, posiblemente esto también podría disminuirse, no obstante hay que convivir con ellos.

#### 4.-COMENTARIOS FINALES:

Se ha intentado realizar una breve descripción de los cortes típicos durante la trefilación de alambres de bajo contenido de carbono, sin embargo es una buena herramienta para intentar disminuir los cortes de una planta trefiladora, se aconseja en primer lugar realizar un catastro de todos los cortes que se producen en una planta trefiladora por un tiempo considerable (1 mes o más), considerando los siguientes aspectos en los cortes:

- Tener la trazabilidad completa del acero (del alambón hasta producto final).
- Guardar a priori una muestra de cada rollo de alambón, para analizarlo frente algún corte específico.
- Número de máquina, operario, fecha, etc.
- Guardar, dentro de lo posible las dos partes del corte.
- Identificar el tiempo de uso del tren o hilera antes del corte.
- Notificar, si esto ocurre, un posible cambio de hilera.
- Otros antecedentes de interés.

Una vez que se tenga un catastro, con suficiente cantidad de muestras, estas se pueden agrupar en los distintos tipos de cortes, para luego analizarlos y poder definir cuáles pueden ser las acciones correctivas a incorporar en la planta, con el fin de disminuir la frecuencia de corte y en consecuencia poder aumentar la productividad de la planta.

#### 5.-REFERENCIAS

1. Galvez F., Atienza J., Ruiz J., Elices M., "Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de alambres de acero trefilado". Anales de la mecánica de la fractura, volumen 18, 2001, p.p. 185 a 189.
2. Betzalel Avitsur, "Limit Analysis of Flow Through Conical Converging Dies," Proc, University of Waterloo Press. <http://www.lehigh.edu/~ba04/metalfforming.html>
3. Monsalve G. Alberto, Apuntes de Metalurgia Mecánica, Capítulo III. "Conformado de Metales", 2004, USACH.
4. Shinohara Tetsuo and Yoshida Kazunari "Deformation analysis of surface crack in rolling and wire drawing", 1995. [http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmea/48/4/335/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmea/48/4/335/_pdf) ASM Metals
5. Handbook, Vol 14 "Forming and Forging", 1993.
6. Geoffrey W. Rowe, versión español por José M<sup>o</sup> Jiménez Moreno, "Conformado de los Metales", Editorial Urmo Bilbao, Bilbao, España, 1972.
7. Kalpakjian-Schmid, "Manufactura: Ingeniería y Tecnología". Editorial Prentice may, 4ta Edición, 2001.

# ACEROS DE CONSTRUCCION MECANICA - ACEROS DE INGENIERIA. ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE. ACEROS TREFILADOS. BARRAS Y PERFILES. TRATAMIENTOS TERMICOS.

**Prof. Santiago Riveros**

*Magister en Ciencias de la Ingeniería*

*Profesor JP Departamento de Ingeniería Metalúrgica, USACH*

*sriveros@gmail.com*

## 1.0) ANTECEDENTES.

A nivel internacional estos materiales se clasifican como aceros al carbono y aleados. Dentro de estos existen principalmente: perfiles, barras laminadas y forjadas en caliente (redondas, cuadradas, hexagonales, octogonales, planas, perfiles laminados de diversas formas, barras trefiladas). Estos tipos de aceros, de clasificación extensa y variada, tienen una larga data en el mercado de Chile. En la jerga normal se les asocia con la clasificación SAE (Society of Automotive Engineers). Adicionalmente se les clasifica como "productos largos", debido a que son barras y perfiles conformados (laminados en caliente y/o en frío ó trefilados). Estas materias primas son casi, en su totalidad, sometidos a mecanizados (torneado, fresado, cepillado, brochado, rectificando, etc.). Un importante porcentaje de pieza elaboradas son tratadas térmicamente (en especial los aceros aleados).

Lo anterior se orienta a que este tipo de aceros es muy "sociable" ya que genera bastante empleo y requiere contar con una mano de obra especializada. El valor agregado en la manufactura de los aceros de construcción mecánica (maestranzas) tiene una importante inversión, tanto en mano de obra, equipamiento y utillaje empleado, control de calidad, tratamientos térmicos, perfeccionamiento constante, otros. Las otroras Escuelas Industriales (uno de los ejemplos emblemáticos fue nuestra Escuela de Artes Oficio, EAO), se preocuparon de abastecer al mercado de técnicos muy especializados en el quehacer del mecanizado, entre otras especialidades. Aun existen muchos egresados de éstas que contribuyen a la industria. Hoy existen los Liceos Industriales que han tendido a una formación preferentemente orientada a la Universidad (prosecución de estudios) y no a la industria. También hay que señalar la importancia en la capacitación de trabajadores que tuvo INACAP (hoy volcada principalmente a la capacitación universitaria). Actualmente existe una preocupación sobre este tema a nivel de las autoridades.

Este desarrollo nacional se produjo principalmente a partir de la mitad del siglo pasado, un interesante desarrollo industrial de servicios. Muchos talleres (chicos y medianos) se crearon, algunos se desarrollaron, contrataron ingenieros, especializaron en alto grado a su personal, realizaron importantes inversiones en máquinas y herramientas. Se crearon grandes maestranzas (gran minería), muchas privadas. La década de los 70 del siglo pasado marcó una situación muy especial con el advenimiento de la industria automotriz, que lamentablemente no duró mucho. Lo más probable es que hoy se hubiese competido con las interesantes industrias autopartistas de Argentina y Brasil.

El mercado de Chile de fabricación de componente de aceros de construcción mecánica se orienta masivamente a repuestos de maquinarias (algunos bastante pesados). En otras palabras el mercado objetivo es proveer de piezas y partes para una mantención correctiva. Una estimación aproximada del valor asociado a la manufactura mediante aceros de ingeniería en Chile, es del orden de unos \$US 150.000.000 por año.

Adicionalmente en torno a lo anterior se generó un importante grupo de empresas preocupadas de la distribución de aceros en barras. Muchas de ellas se han preocupado de una venta al detalle (trozos), de la selección de materiales, del control de calidad (ensayos de durezas, análisis metalográficos, ultrasonido, análisis químico, certificación, capacitación, etc.), de contratar ingenieros metalúrgicos para el soporte y de ingenieros de venta. Se pueden nombrar algunas que manejan inventarios, Block y Cia., ThyssenKrupp, Kupfer Hnos., Aceros Otero, etc. No se observa en la actualidad mucho auge en éstas debido, cambios en el mercado, globalización, crisis, políticas cambiarias, etc.

También existen empresas de forja. Orientadas principalmente a la forja libre y que no tiene un soporte tecnológico importante. Este tipo de empresas en Chile presta servicio para contar con formatos adecuados que

luego son mecanizados. A partir de palanquillas (en el menor número de casos) y de barras laminadas forjadas en usinas, trozos de diferentes tamaños se conforman y se aproximan en sus dimensiones.

Un nicho atractivo de negocios de forja que se realiza es la fabricación de herramientas, normalmente manuales, a partir de aceros construcción mecánica (principalmente en acero SAE 1045, templado en agua y revenido a baja temperatura). Puntas rompe rocas de diferentes formas y tamaños, usadas para faenas viales, minería y otras. Barras para ejes de FFCC. Barretillos ó "pinochos" para el trabajo en altura en minas subterráneas, piezas de forma para uso ferroviario y otras.

En la actualidad un gran porcentaje de las maestranzas nacionales se han orientado a fabricaciones estructurales (corte, conformado, perforado de planchas, procesos de soldadura, montaje, ingeniería, etc.), en atención a la gran expansión que ha tenido la industria minera del cobre. Adicionalmente en los últimos 20 años los distribuidores han realizado "apuestas" en planchas de aceros (estructurales, antiabrasivos y con mucho valor agregado).

A los talleres y maestranzas dedicadas al mecanizado, al tallado del acero, le ha faltado un aleado nacional. Una usina (como sucede en Argentina y Brasil), que les pudiera abastecer y garantizar el suministro de aceros a valores competitivos. Posiblemente en ese escenario, los fabricantes de componentes se hubiesen atrevido, en forma audaz a conquistar "mercados". Un claro ejemplo lo tenemos hoy con China, que tiene un pequeño mercado interno, comparado con él de exportación.

Muchos componentes se fabrican en nuestra industria local. Pernos de baja, mediana y alta resistencia (SAE J 429 g, ASTM A 325), forjados (cabeceados), mecanizados y tratador térmicamente. Una industria muy amagada por la importación. Otros componentes son: pasadores, engranajes, sprockets, ruedas dentadas, eje – piñones, bujes, otros de alta dureza, resistencia y resistencia al desgaste (algunos cementados, templados y revenidos, otros templados y revenidos), ejes de diámetros entre 10 – 500 mm, de largos de hasta 6000 mm. mecanizados y tratados térmicamente. Algunos ejes forjados y sometidos a dobles normalizados y revenidos, como son los ejes de FFCC fabricados bajo la especificación ASTM A 21, Gr. F (ejes que usa principalmente Codelco El Teniente). Para este último caso es interesante comentar que una serie de maestranzas se han especializado en este tipo de elementos. La suma de componentes u órganos de máquina que se fabrica es importante a nivel local. Cabe destacar, que la mayoría ha sido bastante exitosa. Una cuidadosa fabricación, una interesante selección de materiales (sustitutos disponibles), un control de calidad competitivo, un adecuado tratamiento térmico, etc. han permitido lo anterior.

En la actualidad la fabricación de componentes no crece, no existe una adecuada oferta de materiales (este problema tiene varios años), existe poca inversión en máquinas y herramienta. Salvo algunas maestranzas que se han atrevido, con muy buenos resultados, la mayoría se mantiene sin cambios. Esto trae como consecuencia que los proveedores de aceros y de servicios de tratamientos térmicos no se "entusiasmen con el mercado". La búsqueda de nuevas aplicaciones para los aceros de construcción, sobretodo en el campo de la minería, en los últimos 15 años a sido permanente, el uso de los emblemáticos SAE 4140 y SAE 4340 para usos antiabrasivos ha sido muy atractivo (puntas rompe rocas para martillos articulados (Ó 100 / 150 mm) para interior mina. Barras cilíndricas para parrillas mineras, cinceles, barras para molienda, etc.

A su vez en la actualidad las plantas de tratamientos térmicos con dificultades tienen carga para procesar en un turno. Algunas de estas plantas han incursionado en la fabricación y servicios de piezas fundidas. Servicios especiales de oxidación controlada a componentes metálicos también se pueden señalar.

No está demás indicar la importancia en el proceso de manufactura que permite el tratamiento térmico. Solo mediante éste, realizado con cuidado y precisión, es posible conseguir las apreciadas cifras mecánicas que se necesitan.

## 2.0) BARRAS DE ACERO LAMINADAS EN CALIENTE.

Tanto las barras y perfiles en caliente se producen a partir de lingotes, palanquillas y otros. Estos materiales tiene dos niveles de calidades: calidad comercial y calidad especial. La calidad comercial es de un nivel de calidad mas baja y no es adecuada para aplicaciones donde las imperfecciones internas y de la superficie son importantes (resistencia a la fatiga del acero, impacto Charpy, tenacidad a la fractura  $K_{1C}$ , etc.). La calidad especial determina en todas las barras la implementación de un buen control de calidad (control del régimen de inclusiones no metálicas, uniformidad de la composición química, superficie libre de defectos, etc.) Las propiedades mecánicas de las barras laminadas en caliente (as –rolled) están influenciadas por:

- Composición química.
- Espesores ó área de l sección transversal.
- Variables en el diseño de laminación ó prácticas de laminación.

El contenido de carbono es el factor dominante. Las propiedades tensiles mínimas para barras aceros al carbono laminados en caliente se presentan en la Fig. 1.

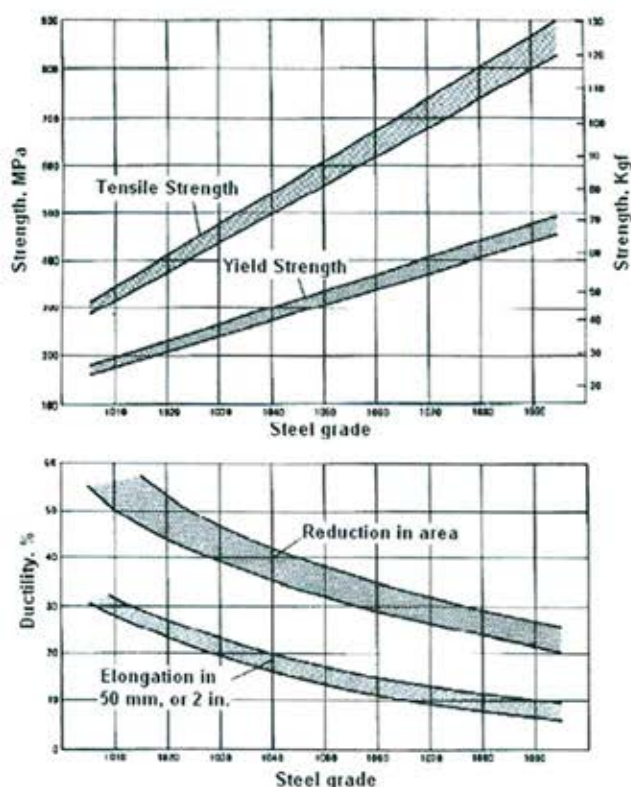


Fig. 1. Cifras tensiles estimadas en barras de aceros al carbono laminados en caliente.

Una clasificación interesante corresponde a ASTM. Esta entidad clasifica aceros estructurales y barras de aceros laminados en caliente en las mismas especificaciones. Ejemplos de éstas son: ASTM A6 (especificaciones de los aceros), ASTM A 36 (planchas de aceros al carbono, barras y perfiles), ASTM A 131 (aceros al carbono), ASTM A 242 (HSLA planchas, barras, perfiles y chapas), ASTM A 588 (HSLA planchas, barras, y perfiles con un límite de fluencia mayor a 345 MPa), etc.

El término barra incluye:

- Redondos, cuadrados, hexagonales y secciones que tengan una dimensión mayor a 9.5 mm. (3/8")
- Planos mayores a 5.16 mm (0.203") en el espesor y de 203 mm (8") y ó dimensiones mayores al menos en una de sus secciones transversales y que se usan en estructuras tales como: puentes, edificios, barcos y carros de FFCC.
- Perfiles de formas especiales son aquellos diseñados para aplicaciones específicas.
- Angulos pequeños, canales, perfiles T, y otras formas estándares menores a 76 mm (3").

Barras para concreto, el término forma incluye formas estructurales y formas especiales. Formas estructurales como flanges tiene 76 mm (3")

### Grados de Calidad Comercial de Barras Laminadas.

Se producen logrando tanto la composición química (análisis de la colada) y las cifras de tracción. Pueden ser suministrados con una concentración máxima de carbono de 0.50%, manganeso máximo de 0.60%, fósforo máximo de 0.040% y azufre máximo de 0.050%, pero no se fabrica con un contenido específico de silicio, tamaño de grano y cualquier otro requerimiento que podría ser indicado. Existen situaciones especiales para ampliar las concentraciones del carbono y del manganeso.

Cuando las barras se ordenan en base a las propiedades mecánicas es necesario usar la norma ASTM A 663 (acero y ángulos laminados en caliente estructurales para aplicaciones no críticas en diámetros inferiores a 76 mm.).

### Grados de Calidad Especial de Barras Laminadas.

Estas son usadas cuando el uso final, método de fabricación y subsecuentes tratamientos adicionales no se encuentran en las barras de calidad comercial. Las aplicaciones típicas son: forja en caliente, tratamiento térmico, trefilado, conformado en frío y mecanizado.

Estas barras deben estar libres de imperfecciones superficiales de una excesiva segregación química. También son las barras laminadas a partir de palanquillas inspeccionadas y acondicionadas (si es necesario), de manera de minimizar las imperfecciones superficiales. La composición química afecta las imperfecciones superficiales.

Los grados aceros desulfurados, ciertos grados de bajo carbono calmados y los aceros con boro son menos susceptibles de imperfecciones superficiales.

Los usuarios finales pueden necesitar uno o más requerimientos, éstos incluyen: templabilidad especial, ausencia de imperfecciones internas, control rígido de las inclusiones no metálicas, una condición superficial como la que se describe en el manual de barras laminadas de AISI.

Las barras de calidad especial pueden ser producidos por las siguientes prácticas de desoxidación: efervescente, tapado, semi-calmado ó calmado.

El tipo apropiado es dependiente: composición química, calidad y especificaciones del cliente.

Los aceros calmados pueden ser producidos con un tamaño de grano fino ó grueso.

Las barras de aceros aleados laminados en caliente son comúnmente producidas en calidad especial. Estas están cubiertas por una variedad de normas ASTM (de acuerdo a grados AISI – SAE), A295, A304, A322,

A434, A534, A 535.

Adicionalmente existe una variedad de calidades y grados a nivel internacional que se producen las barras aleadas. Dentro de estas se encuentra: la calidad regular, calidad de aceros para ejes, calidad de aceros para trabajo en frío, para corte en frío, aceros para uso aeronáutico y calidad "magnallux", calidad de aceros estructurales ASTM A 6 y A 710), otras.

### Barras de Aceros de Baja Aleación y Alta Resistencia (HSLA)

En forma adicional a las barras de aceros al carbono y aleados de calidades estructurales, la norma ASTM A6, presenta en forma detallada diferentes especificaciones de aceros en barra de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Lo mismo se especifica en la SAE J 1442. Estos materiales frecuentemente tienen mayor resistencia que las barras de aceros al carbono y se seleccionan principalmente donde el ahorro de peso es importante. Estos permiten mayor duración y muchos tipos ofrecen una resistencia a la corrosión atmosférica adecuada.

La incorporación de pequeñas cantidades (microaleantes), tales como vanadio, niobio ó titanio permiten la obtención de barras de alta resistencia. comparables a aquellos grados de aceros templados – revenidos. Sus aplicaciones típicas se encuentran en componentes como ejes, pernos de anclaje de equipos mineros (molinos, estructuras pesadas, etc.) y componentes automotrices forjados.

### Otros Tipos de Barras Laminadas

Existen otros tipos y grados de aceros laminados que se pueden considerar y serán solo mencionados, saber:

- Barras de acero para refuerzos del hormigón.
- Angulos y formas especiales estructurales.
- Barras de acero terminadas en frío.

### 2.1) Dimensiones y Tolerancias de Barras y Perfiles Laminados en Caliente.

Las normas ASTM A 6 y A 29 señalan las dimensiones nominales y tolerancia de barras y perfiles laminados en caliente en milímetros ó pulgadas. Adicionalmente señalan tolerancias para los alabeos ó deformaciones longitudinales. En las usinas estos productos se pueden cortar mediante métodos en caliente (oxicorte, otros), ó en frío (sierras, cizallas, otros). Estos se seleccionan de acuerdo a la sección transversal, grado del acero y requerimientos del cliente.

### 2.2) Imperfecciones Superficiales.

La mayoría de los aceros al carbono y aleados laminados en caliente presentan grados de imperfecciones superficiales. En general estos de-

fectos son indeseables y en muchas fabricaciones afectan la calidad del producto.

Las usinas conscientes de esta situación ofrecen productos con diferentes acabados superficiales para eliminar ó minimizar las imperfecciones. Una primera calidad incluye la inspección y la posterior eliminación del defecto ó rechazo del producto.

Para el caso de productos semi-terminados (lingotes, palanquillas, otros) la remoción puede efectuarse mediante "hot scarfing" (mediante sopletes de alta potencia que se usan tangencialmente en la superficie), esmerilado ó cepillado.

Para productos terminados (barras, perfiles, otros) la remoción de los defectos se realiza mediante esmerilado, torneado, desbastado.

Para un requerimiento de "alta calidad" de barras laminadas, en caliente es necesario operaciones de torneado fino ó de rectificado.

### 2.3) Tipos de Imperfecciones Superficiales en Productos Laminados en Caliente.

- I) Grietas finas longitudinales ó Seams
  - II) Son ranuras ó finas grietas superficiales de barras laminadas en caliente debido a la deformación de defectos tales como porosidades (gases atrapados) ó inclusiones superficiales en el lingote. Durante el recalentamiento del lingote existe oxidación en las superficies de los poros ó blowholes que impiden la soldadura del material (eliminación del defecto) durante la laminación. Son defectos superficiales menores a 0.75 mm. Durante el conformado el defecto se alarga.
- Fig. 2.

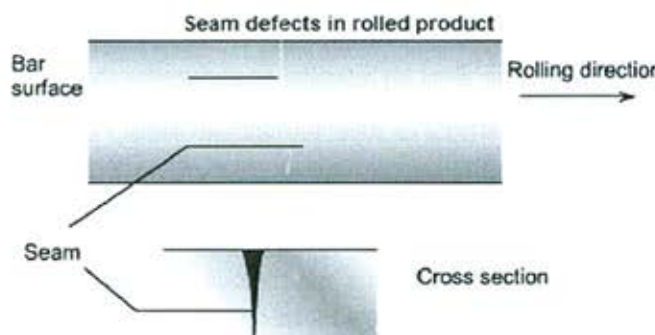


Fig.2. Grietas finas superficiales ó Seams

- III) Pliegues ó Laps.
- IV) Estos defectos se encuentran en piezas forjadas ó laminadas en caliente. En barras laminadas en caliente estas fallas se orientan longitudinalmente en la superficie debido a la laminación de material en exceso ó "fin" formado previamente. El pliegue se proyecta bajo la superficie de la barra, Estas contienen óxidos ó "scale" y pueden estar parcialmente soldadas, Fig3. Su profundidad es menor a 1mm. El mejor método para detectar son las corrientes de Eddy.

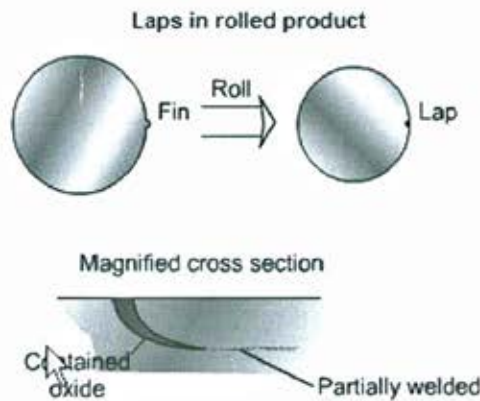


Fig. 3. Pliegues ó Laps superficiales en barras laminadas ó forjadas.

- v) Adherencias Superficiales ó Slivers  
Normalmente como adherencia metálicas (aceros) en la superficie de las barras laminadas en caliente. Estas provienen incluso de bordes fracturados que son atrapados y comprimidos en la superficie durante el procesos de conformado y no pueden ser eliminadas durante esta etapa. Estas anomalías producen inconvenientes en la calibración (dimensiones) de las barras elaboradas. Aunque no existe una definición metalográfica de este defecto, el examen metalográfico puede ser implementado para caracterizar el defecto.
- vi) Descarburación.  
La descarburación es un defecto superficie, éste está presente en algún grado el todos los aceros laminados en caliente. A alta temperatura (1250 °C) el carbono reacciona con el oxígeno de la atmósfera del horno. Esta pérdida provoca que la superficie sea más blanda e inadecuada para aplicaciones que involucren requerimientos de desgaste ó fatiga. Debido a esta situación, las barras de aceros necesarios para aplicaciones críticas deben ser solicitadas con sobremedidas y luego mediante mecanizado alcanzar las dimensiones adecuadas.

**2.4) Imperfecciones Superficiales Tolerables en Aplicaciones de Mecanizado.**

La experiencia ha demostrado que cuando los compradores solicitan barras laminadas en caliente ó tratadas térmicamente y que serán sometidas a mecanizado éste contempla una tolerancia positiva para remover las imperfecciones y alcanzar las dimensiones necesarias. Estas creces ó tolerancias dependerán del mecanizado a realizar para la remoción, del largo, tamaño de las barras, la rectitud y la tolerancia dimensional, Tabla 1. Las barras son enderezadas antes del mecanizado. Existen muchas publicaciones con la tolerancias, en particular para el caso de barras trefiladas puede ser mencionada la publicación "Cold- Finished Steel Bars", Pag. 660, Metals Handbook, Vol.1.

Bar diameter		Recommended minimum machining allowance per side, % of specific size	
mm	in.	Nonresulfurized	Resulfurized
< 51	< 2	2.6	3.4
> 51	> 2	1.6	2.4

Tabla 1: Diámetro barra y Tolerancia min.(%) por lado.

Para el caso de barras mecanizadas y que serán inspeccionadas mediante partículas magnéticas, las sobremedidas recomendadas en barras laminadas en caliente se presentan en la Tabla 2. Cuando se menciona este tipo de inspección no destructiva, que se realiza como control final y decisivo luego del mecanizado, se desea garantizar la ausencia de imperfecciones superficiales. Este tipo de controles a nivel local no se practica mucho y es más normal realizar un control mediante linternas penetrantes. Este último en cierta medida puede usarse como alternativa. Es necesario indicar que mediante partículas magnéticas se controla la calidad de la barra en un pequeño sustrato (profundidad de barra), esto permite asegurar un mejor control de calidad. A este respecto es interesante comentar un vicio poco atractivo que existe en la adquisición de materias primas.

Es muy recurrente que el maestrancero no contemple las sobremedidas recomendadas (muy necesarias para el éxito del proceso) por motivos principalmente económicos. Una mayor sobredimensión de la materia prima provoca un mayor precio. Existen muchas reclamaciones de clientes de las empresas distribuidores, que desconocen los problemas inherentes de las barras laminadas. La recomendación es muy clara es necesario sin excepciones, considerar las creces en este tipo de producto.

Hot-rolled size		Minimum stock removal from the surface <sup>(a)</sup>		Hot-rolled size		Minimum stock removal from the surface <sup>(a)</sup>	
mm	in.	mm	in.				
Up to 12.7	Up to $\frac{1}{2}$	0.76	<b>0.030</b>	>64-89	$>2\frac{1}{2}$ - $3\frac{1}{2}$	3.96	<b>0.156</b>
>12.7-19	$>\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$	1.14	<b>0.045</b>	>89-114	$>3\frac{1}{2}$ - $4\frac{1}{2}$	4.75	<b>0.187</b>
>19-25	$>\frac{3}{4}$ -1	1.52	<b>0.060</b>	>114-152	$>4\frac{1}{2}$ -6	6.35	<b>0.250</b>
>25-38	$>1$ - $1\frac{1}{2}$	1.90	<b>0.075</b>	>152-191	$>6$ - $7\frac{1}{2}$	7.92	<b>0.312</b>
>38-51	$>1\frac{1}{2}$ -2	2.29	<b>0.090</b>	>191-229	$>7\frac{1}{2}$ -9	9.52	<b>0.375</b>
>51-64	$>2$ - $2\frac{1}{2}$	3.18	<b>0.125</b>	>229-254	>9-10	11.10	<b>0.437</b>

**Tabla 2: Mínimo Mecanizado por Lado de Barras Laminadas en Caliente Sujetas a Inspección Mediante Partículas Magnéticas (a).**

A pesar lo indicado anteriormente existen prácticas industriales que en muchas ocasiones acarrear problemas. Muchos fabricantes mecanizan barras con menores espesores, arriesgándose a problemas de fallas superficiales. En este sentido se considera en esta práctica un mecanizado mínimo en el diámetro de 1.6 mm (1/16") para barras de diámetro de 38 a 76 mm (1 1/2" a 3") y de 3.2 mm (1/8") para barras mayores a 76 mm (3"). Esto constituye todo un reto y los riesgos son enormes.

### 3.0) REQUERIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS LAMINADO.

Las barras y perfiles laminados en caliente pueden ser producidos: rango ó límites de la composición química, requerimientos de propiedades mecánicas ó ambas. Los ensayos mecánicos pueden incluir: tracción, durezas Brinell ó Rockwell, doblado, impacto Charpy, tenacidad a la fractura, ensayos de corto tiempo a elevada temperatura, ensayos para deter-

minar el límite elástico, otros. Estos ensayos se realizan según la norma ASTM A 370.

También se consideran otros: determinación del tamaño de grano y de la templeabilidad. El tamaño de grano austenítico (McQuaid-End), puede ser medido según ASTM A 255.

La ausencia de imperfecciones ocluidas y homogenización pueden ser evaluadas por test de fractura. Se aplica principalmente para aceros de alto carbono (aceros para rodamientos).

Las inclusiones no metálicas se determinan mediante análisis metalográfico, de acuerdo a la norma ASTM E 45. Las muestras deben obtenerse en sentido longitudinal, a una profundidad media entre la superficie y el centro del producto.

El contenido de inclusiones no metálicas puede ser medido a escala macroscópica mediante ensayos de partículas magnéticas como el que describe la norma AMS 2300 y 2301 (se mide la frecuencia y severidad ó distribución de las inclusiones).

El ensayo de partículas magnéticas permite revelar las imperfecciones superficiales y sub-superficiales de las barras.

#### 3.1 Ensayos de Tracción y Dureza.

Estos ensayos mecánicos son los más comunes que se realizan en barras y perfiles laminados.

La dureza es posible medirla mediante un simple ensayo y tiene una estrecha relación con la resistencia a la tracción, Fig.4. Adicionalmente cuando la figura anterior es usada con la Fig. 5, un simple ensayo de dureza puede entregar valores estimados del límite de fluencia y alargamiento.

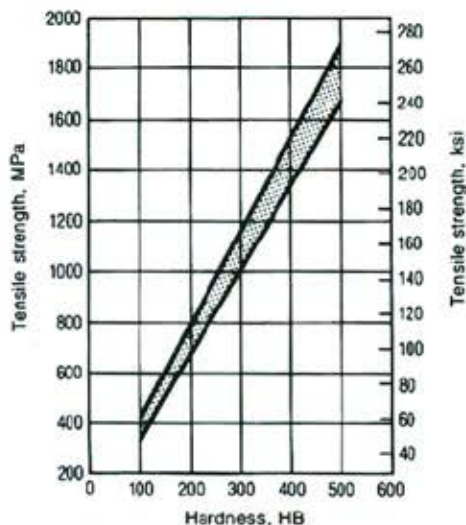


Fig.4. Relación entre la dureza y resistencia a la tracción del acero, en un rango hasta 300 Brinell, que es posible aplicar en aceros laminados en caliente.

Estos valores no son aplicables a todos los casos ó estados de suministros posibles para los aceros al carbono o aleados laminados en caliente. Para aquellos que están en la condición de recocido existe una resistencia a la tracción máxima ó una máxima dureza, Tabla 3, que pueden ser esperados para cada tipo de acero.

Para las barras que son normalizadas, los valores máximos y mínimos de dureza y los de tracción pueden ser especificados.

Para las condiciones de suministro de barras normalizadas – revenidas, como también templadas – revenidas se pueden especificar en la misma forma.

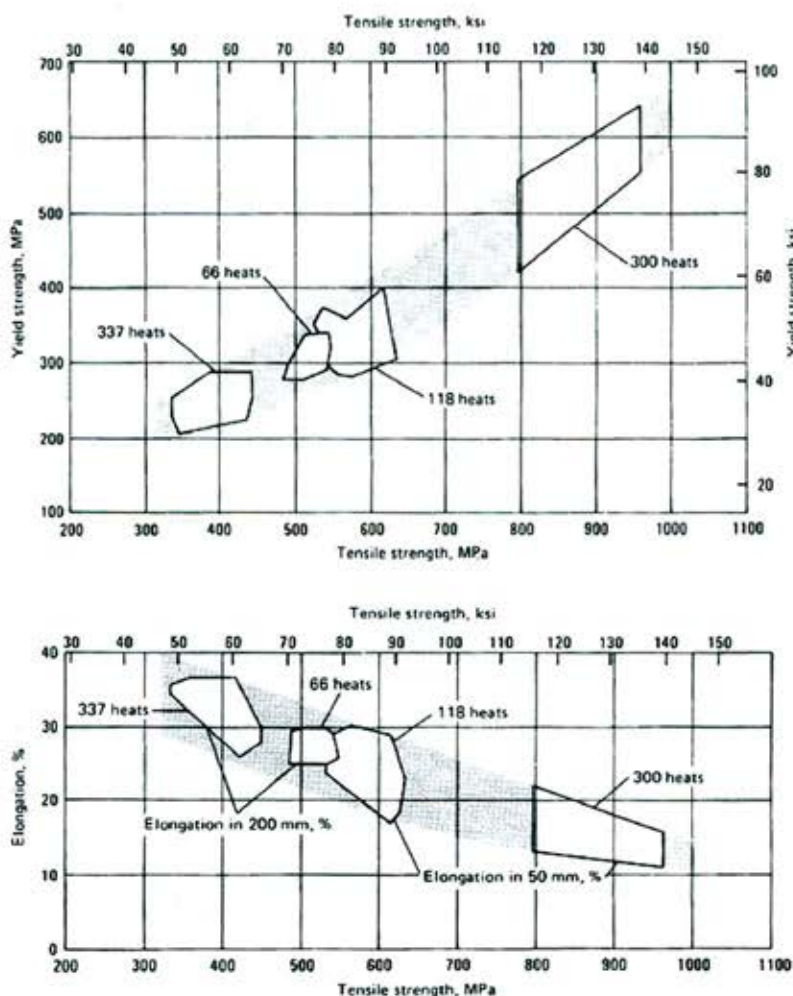


Fig.5. Relación entre las propiedades tensiles de los aceros al carbono laminados en caliente.

**Tabla 3.- Durezas mínimas – máximas que se pueden esperar en barras laminadas en caliente, palanquillas, y planchones en la condición mill annealing (ablandamiento post laminado en caliente).**

Steel Grade	Maximun hardness, HB(a)	
	Starightened	Nonstraightened
<b>Carbon steels</b>		
1141	201	192
1141	207	197
1151	207	201
1541	207	197
1548	212	207
1552	212	207
<b>Alloy steels</b>		
1330	187	179
1335	197	187
1340	201	192
1345	212	201
4012	149	143
4023	156	149
4024	156	149
4027	170	163
4028	170	163
4037	192	183
4047	212	201
4118	170	163
4130	182	174
4137	201	192
4140	207	197
4142	212	201
4145	217	207
4147	223	212
4150	235	223
4161	241	229
4320	207	197
4340	235	223
4419	170	163
4615	174	167
4620	179	170
4621	179	170

<b>Alloy steels</b>		
4626	187	179
4718	179	170
4720	170	163
4815	223	192
4817	229	197
4820	229	197
5015	156	149
50B44	156	149
50B46	217	201
50B50	217	201
50B60	229	217
5120	170	163
5130	183	174
5132	187	179
5135	192	183
5140	197	187
5140	197	187
5145	229	197
5147	217	207
5150	212	201
5155	229	217
5160	235	223
51B60	235	223
6118	163	156
6150	217	207
81B45	201	192
8615	163	156
8617	163	156
8620	170	163
8622	179	170
8625	179	170
8627	183	174
8630	187	179
8637	201	192
8640	207	197
8642	212	201
8645	217	207
8655	235	223
8720	170	163
8740	212	201
8822	187	179
9254	241	229
9255	241	229
9260	248	235
94B17	156	149
94B30	183	174

#### 4.0) TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE BARRAS Y PIEZA MECANIZADAS.

Estos procesos se pueden aplicar tanto en las usinas (materias primas), como también luego que las piezas se han manufacturado.

Las barras y ángulos laminados en caliente de aceros de bajo y mediano carbono frecuentemente se usan en el estado de laminado en caliente. Los materiales de alto carbono y que son laminados en caliente deben ser tratados térmicamente de manera de lograr una adecuada dureza y microestructura. Los tratamientos térmicos más comunes son: recocido, alivio de tensiones, normalizado, templado y revenido. También es necesario considerar procesos de endurecimiento superficial para piezas mecanizadas, tales como: cementación, nitruración, temple superficial.

- **Recocido común.** Se usa para la obtención de un acero blando. El acero es calentado a una temperatura adecuada, a un cierto tiempo y luego enfriado. El tiempo, temperatura y la velocidad de enfriamiento varían.

Las durezas máximas compatibles con la práctica común puede ser especificada.

- **Recocido para una microestructura especificada.** Se realiza en aceros que necesitan mejorar las características de mecanizado ó conformado en frío. Las estructuras producidas pueden consistir en perlita laminar ó carburos globulares. Un control especial del tiempo del proceso y de las temperaturas de los ciclos es necesario. Una dureza máxima compatible puede ser especificada.
- **Alivio de tensiones.** Se realiza un calentamiento a una temperatura sub – crítica y luego se enfría. Para las barras laminadas en caliente, la principal razón de este tratamiento es minimizar la distorsión ó alabeos en el mecanizado posterior. Es normal este proceso térmico luego de operaciones de conformado en las barras, por ejemplo enderezado.
- **Normalizado.** El calentamiento se realiza por sobre la crítica superior y luego se enfría al aire. Una temperatura máxima compatible puede ser especificada.
- **Endurecimiento por temple.** Es necesario calentar a una temperatura para austenitizar completamente. Es necesario mantener un tiempo prudente para lograr una austenita homogénea y luego se enfría ó templea en un medio adecuado (agua, aceite, aceite sintético, polímeros, sales fundidas ó metales fundidos) dependiendo de la composición química y espesores.

- **Revenido.** Se realiza luego de un tratamiento de normalizado ó de temple de barras. Las barras son calentadas bajo la temperatura crítica inferior y luego enfriadas adecuadamente. Es normal especificar un rango de dureza para barras templadas – revenidas.

# DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA: UNA HISTORIA BREVE

Extracto del Informe de Autoevaluación de las carreras de pregrado del Departamento, sección redactada por los profesores Bernd Schulz y Jorge Garín

## LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

La Universidad de Santiago de Chile es una de las instituciones de educación superior de alta tradición y relevancia en el país. Sus raíces se remontan a la fundación por parte del Estado de Chile de la Escuela de Artes y Oficios en el año 1849 en la ciudad de Santiago, entidad proveedora de enseñanza técnica especializada para la creciente industria nacional de la época. En la segunda mitad del siglo XIX, la solidez institucional y la contribución al avance industrial, hicieron que el reconocimiento a la labor de la EAO traspasara las fronteras nacionales y la Escuela fuera considerada como la primera entre sus congéneres de América Latina.

La necesidad de apoyar el desarrollo industrial nacional, llevó a los gobiernos republicanos de la época a crear Escuelas de Minas en el norte del país (La Serena, Copiapó y Antofagasta) y Escuelas Industriales en el sur (Temuco, Concepción y Valdivia), las cuales en conjunto con la Escuela de Ingenieros Industriales y el Instituto Pedagógico Técnico de Santiago, además de la EAO, dieron origen en 1947 a la Universidad Técnica del Estado (UTE).

La UTE, como entidad pública y estatal, se constituyó con una orientación marcadamente social y tecnológica, preocupada de la formación de profesionales para la educación y la industria nacional, estrechamente ligada a la política económica de sustitución de importaciones. De esta manera los planes de electrificación, de extracción del petróleo, los inicios de la producción del azúcar, de la industria química, de la pesca, así como los proyectos industriales llevados a cabo por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), estuvieron sustentados, en gran medida, por el trabajo profesional de ingenieros y técnicos egresados de la UTE. Inspirada en la idea de romper la tradición elitista de la educación terciaria, la universidad llevó la enseñanza a los sitios mismos de trabajo como minas, puertos, fábricas y el campo, entre otros. Asimismo, al interior de las aulas universitarias florecieron grupos artísticos que también proyectaron a la universidad más allá de las fronteras del país. Al término de los años 60 y comienzos de la década del 70, la Universidad Técnica del Estado había adquirido un carácter nacional, contaba con 33 mil estudiantes y sedes establecidas en diferentes regiones del país, llegando a cubrir prácticamente la totalidad del territorio nacional.

A partir de la década de los 80, la institución debió enfrentar un escenario complejo marcado por profundos cambios en la Educación Superior chilena, entre los que destacó un contexto cada vez más competitivo y la variación de los patrones de financiamiento. En 1981, por determinación gubernamental, las sedes de provincia fueron separadas de la universidad. La Universidad Técnica del Estado se convirtió en Universidad de Santiago de Chile (USACH), concentrando sus actividades en la capital con un número cercano a los nueve mil estudiantes.

A comienzos de la década de los 90 la Universidad amplió su actividad académica hacia nuevas disciplinas y áreas del conocimiento a objeto de poder competir dentro del nuevo sistema educacional. A las ya tradicionales ingenierías, ciencias básicas y humanidades se sumaron disciplinas del ámbito de las ciencias médicas, las ciencias sociales y la arquitectura. En este contexto se reordenaron algunas facultades, nacieron departamentos académicos, escuelas y se crearon carreras nuevas, ampliando significativamente la oferta docente institucional. Paralelamente, se fue potenciando la capacidad de investigación y las instancias de vinculación con el entorno nacional e internacional. Hacia finales de los años noventa la universidad se va consolidando como una institución completa y compleja.

En la actualidad, la USACH continúa siendo una institución estatal pública. Los impactos de la sociedad del conocimiento y de la globalización se encuentran en la USACH con un espacio pluralista con autonomía para reflexionar, investigar, difundir y aplicar los saberes. La institución sigue fiel a los principios que orientaron la creación de la Escuela de Artes y Oficios, su Alma Mater: entregar formación integral, bajo sólidos principios éticos; posibilitar el ingreso a jóvenes de distintos sectores socioeconómicos y, por tanto, propiciar movilidad social a través de la educación.

La USACH imparte a través de sus unidades académicas 63 carreras de pregrado (en ocho de las nueve áreas del conocimiento aceptadas por la UNESCO) y un Bachillerato en Ciencias y Humanidades. Además, ofrece 11 programas de doctorado, 37 programas de magíster, 15 programas de especialización médica, 31 postítulos, 87 diplomados y 333 programas de capacitación.

Sus programas se entregan a 17.650 estudiantes de pregrado y 909 de postgrado. Es importante destacar que aproximadamente el 80% de los alumnos de pregrado proviene de establecimientos secundarios municipales y subvencionados; cerca de un 12% de dichos estudiantes pertenecen a grupos que están por debajo de la línea de la pobreza y aproximadamente un 25% se encuentra por debajo del ingreso mínimo, lo cual evidencia el apoyo sostenido y la movilidad que posibilita la institución a los estudiantes de escasos recursos.

Si bien la universidad ha tenido una marcada tradición docente, en los últimos 20 años ha dado un fuerte impulso a la investigación en las diversas áreas de su quehacer, llegando a ocupar en la actualidad, un destacado lugar a nivel nacional, y de esta manera, integrar el grupo de las cinco universidades de investigación del país. Al mismo tiempo, desarrolla tareas de asistencia técnica, trabajo con empresas y organismos gubernamentales, instituciones privadas nacionales e internacionales, intercambio científico, tecnológico y cultural con universidades nacionales y extranjeras. Mantiene, además, una constante relación con el entorno comunitario y nacional.

## EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

El Departamento de Ingeniería Metalúrgica tiene su origen en la especialidad de Fundición con el grado de oficios en la Escuela de Artes y Oficios, que evolucionó hasta crear el grado de Técnicos Industriales a partir de 1915 y posteriormente el grado de Ingeniero Industrial Metalúrgico desde 1940 en la Escuela de Ingenieros Industriales. Éste nace al término del año 1970 por la fusión de la Especialidad de Metalurgia



*Entrada al Laboratorio de Fundición*

de la Escuela de Artes y Oficios con el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Escuela de Ingenieros Industriales. Su existencia legal se oficializa a fines de 1972 con la creación de la Facultad de Ingeniería en la Sede Santiago de la UTE, de acuerdo con una nueva ley orgánica de la Universidad.

En la actualidad, el Departamento es responsable de dos carreras: Ingeniería Civil en Metalurgia e Ingeniería de Ejecución en Metalurgia. Además, tiene a su cargo los programas de postgrado: Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ciencia e Ingeniería de Materiales y mención Metalurgia Extractiva y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, mención Ciencia e Ingeniería de Materiales y participa en la mención Ingeniería de Procesos. También es responsable del programa de Postítulo: Ingeniería de la Corrosión de los Materiales.

## CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL EN METALURGIA

La carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia proviene de la carrera de Ingeniería Industrial con mención en Metalurgia, dependiente de la Escuela de Ingenieros Industriales. Para el ingreso a ella se requería haber cumplido los requisitos para optar al título de Técnico Metalúrgico de la Escuela de Artes y Oficios, y su duración era de tres años.



*Antiguo laboratorio de Metalografía*

Hasta 1965, la docencia se realizó a través de profesores nombrados por horas de clases, no contándose con ningún tipo de laboratorio profesional. Cabe destacar entre ellos al distinguido profesor emérito don Orlando Jacobelli P, coronel de ejército en retiro, con estudios de metalurgia en Francia y autor de varios textos usados en las universidades en las que ejercía como profesor de Metalografía y Tecnología de Materiales.

Desde su creación, un gran porcentaje de los Planes de Estudio era Ciencia Básica (Física, Matemáticas, Química, Físico-Química, Mecánica Racional) que se prolongaban hasta el último año. Los ramos profesionales se limitaban a Metalurgia, Siderurgia, Metalografía, Mineralogía y Geología y a Proyectos Industriales.



**Laboratorio de Procesamiento de Minerales**

Hasta 1965 la docencia de especialidad se realizó con profesores por horas de clases. En ese año se contrató al Ingeniero Industrial Tomás Ireland a jornada completa para la docencia y la organización del "Centro de Metalurgia" internacional en pos de formación de postgrado. Es así que entre otros el profesor Jorge Garín siguió estudios avanzados en el área de Difracción de Rayos X que le permitieron asumir la tuición académica de ese laboratorio que hoy en día es una prestigiosa unidad de investigación con equipamiento moderno gracias al financiamiento ganado en diversos proyectos financiados por el estado.

La carrera de Ingeniería de Ejecución en Metalurgia tiene su origen en la carrera de Técnico Metalúrgico la que a su vez comienza en el grado de Oficios con la especialidad de Fundición en la antigua Escuela de Artes y Oficios. Se tienen registros de que el primer Técnico en Fundición egresó en el año 1935. Posteriormente, el Honorable Consejo Universitario de la Universidad Técnica del Estado, en sesión N° 433 efectuada el 19 de diciembre de 1966, acordó crear la carrera de Ingeniero de Ejecución una de cuyas especialidades fue la de Metalurgia. En el año 1969 egresaron los primeros Ingenieros de Ejecución en Metalurgia.

A partir de 1972 el nuevo Estatuto Orgánico de la UTE organizaba la labor académica, entre otras, en Facultades y Departamentos, responsables de las carreras afines, y cultivando la docencia, la investigación y extensión. La reincorporación paulatina de los otros profesores que volvían con sus

grados de magister y doctorado permitió implementar el nuevo espíritu y lograr la unión de las carreras de Ingeniería de Ejecución de la EAO y la de Ingeniería Industrial de la EII bajo el ahora Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Es digno de recordar que este proceso no fue posible sin despertar suspicacias e incomprensiones, razón por la cual los profesores Raúl Ramírez S. y Bernd Schulz E. jugaron un rol relevante para llegar a un consenso.

En 1972 se cambió el título de Ingeniero Industrial Metalúrgico por Ingeniero Civil en Metalurgia. Lo mismo se hizo en las otras carreras de Ingeniería Industrial de la Universidad.

Los cambios mencionados no afectaron mayormente el espíritu y la misión de formación de profesionales del Departamento. A partir de la segunda mitad de los 70 se inician de forma importante grupos de investigación teniendo en cuenta las cambiantes necesidades del país, y ya en los 80 hay una gran participación en proyectos con financiamiento universitario (DICYT) y gubernamental (FONDECYT). En forma coincidente, se mantiene la política de mantener un cuerpo académico actualizado y con postgrado en áreas de interés, y es así que en la actualidad la mayoría de los académicos ha completado estudios superiores y los nuevos integrantes son contratados con nivel de doctorado.

Finalmente, se considera de interés para los efectos del caso, incluir una breve referencia sobre hitos importantes que han contribuido al desarrollo de este Departamento durante las últimas décadas. En primer término, cabe destacar la provechosa participación de esta Unidad en el Proyecto Multinacional de Metalurgia de la O.E.A., como miembro de un consorcio de universidades nacionales, a las cuales se asignaron importantes recursos para apoyar la investigación, desarrollo y difusión de conocimientos en el campo de los materiales metálicos. La participación en este proyecto durante aproximadamente una década, se tradujo en una importante captación de recursos, los cuales permitieron la adquisición de equipamiento e insumos para apoyo a líneas de investigación incipientes, que más tarde consolidarían este tipo de actividad académica como uno de los parámetros de desarrollo más relevantes del Departamento. En estrecha relación con dicho desarrollo, el Proyecto posibilitó, además, el perfeccionamiento de muchos de sus académicos, a través de cursos, talleres, seminarios y congresos, de carácter nacional e internacional, así como también importantes estancias de investigación e intercambio académico en instituciones extranjeras. En términos globales, se logró la formación y consolidación de recursos humanos de alto nivel en el campo de la investigación sobre Ciencia e Ingeniería de Materiales, lo que también significó un acervo de conocimientos entregados a la comunidad científica y tecnológica.

En el contexto de las actividades de extensión del Departamento, durante el año 1979 se organizó y llevó a cabo el Primer Congreso Nacional de Metalurgia, CONAMET, el cual logró la finalidad de reunir a un gran número de especialistas nacionales, y connotados exponentes extranjeros, principalmente en los campos de la metalurgia extractiva, ciencia e ingeniería de materiales. El encuentro se tradujo en un provechoso intercambio de información científica y tecnológica, a la vez que en la oportunidad se sentaron las primeras bases para la creación de la Sociedad Chilena de Metalurgia, cuya materialización se lograría años después, siendo en la actualidad un órgano rector de todas las actividades en el contexto de este campo de desarrollo. La serie de congresos CONAMET se ha mantenido en el tiempo, con creciente interés de participación de especialistas nacionales y extranjeros. Con motivo del Quinto Centenario del descubrimiento del nuevo mundo, durante el año 1992 se organizó y llevó a cabo el Primer Congreso Iberoamericano de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, evento que ya se ha realizado en dos oportunidades en el país, y otras tantas en el extranjero, manifestando, así, la presencia y prestigio de nuestro Departamento en el medio nacional e internacional.



*Sesión del Primer Congreso Nacional de Metalurgia organizado por el Departamento de Metalurgia*



*Sesión de exposiciones del I Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, IBEROMET I*

A mediados de la década de los años 70, el incipiente desarrollo del Departamento unificado derivó en la conveniencia de establecer medios efectivos de difusión y extensión de sus actividades, hacia el medio académico y productivo del país. De este modo, se creó la revista CONTACTO, como medio oficial para difundir las labores académicas y profesionales, en la modalidad de artículos de corriente tecnológica, general, notas breves, entrevistas, y otros aspectos de interés para la comunidad metalúrgica. Posteriormente, la revista cambió su nombre a REMETALLICA, exhibiendo en la actualidad su edición correspondiente al año 27. Este fue el primer órgano de difusión que se editó en nuestra Universidad a partir de la creación de Facultades en 1972, habiendo posibilitado, hasta la fecha, fuertes vínculos de extensión con la comunidad metalúrgica nacional y extranjera.

Con el paso del tiempo, los académicos de este Departamento se han comprometido fuertemente en actividades de investigación científica y tecnológica, en tópicos de su especialidad, adecuadamente relacionados con el medio productivo nacional. Esta participación ha sido posible gracias a la adjudicación de un gran número de proyectos de investigación concursables, como principalmente proyectos FONDECYT y FONDEF, nuevo proyecto CIDI/OEA sobre materiales modernos, proyectos CORFO, INNOVA Chile, AGCI- Gobierno Belga, CITMA/CONICYT, FDI, MECESUP y otros de similar naturaleza, que han permitido establecer laboratorios con instrumental moderno y, por consiguiente, tecnologías y metodologías de análisis aplicadas al estudio de los materiales y de la metalurgia extractiva. A modo de ejemplo, se puede considerar la adjudicación de dos proyectos FONDEF al comienzo de ese programa, los cuales permitieron montar dos modernos laboratorios, uno de difracción y fluorescencia de rayos X, y el otro de microscopía electrónica de barrido. Posteriormente, la adjudicación de nuevos proyectos FONDEF derivó en la creación de los laboratorios de propiedades mecánicas y electrometalurgia y corrosión.

La consolidación de las actividades de investigación realizadas por el cuerpo académico del Departamento, aportó sólidas bases para establecer los programas de postgrado, que hoy nos identifican claramente como una unidad que entrega a la sociedad los mayores niveles de formación intelectual. Así, se llevan a cabo los programas de postgrado: Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ciencia e Ingeniería de Materiales y mención Metalurgia Extractiva y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, mención Ciencia e Ingeniería de Materiales y mención Ingeniería de Procesos. También es responsable del programa de Postítulo: Ingeniería de la Corrosión de los Materiales. El programa de Doctorado en Ciencia de Materiales reúne a los Departamentos de Ingeniería Metalúrgica, Física y Química de los Materiales bajo la Dirección de nuestro Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

En el año 1943 egresaron y titularon los primeros 2 Ingenieros de la carrera de Ingeniería Industrial en Metalurgia de la antigua Escuela de Ingenieros Industriales, precursora de la actual carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia. Hasta el año 1972 egresaron otros 86 Ingenieros Industriales en Metalurgia. A partir de 1969 y hasta el segundo semestre del 2007 se han titulado 622 Ingenieros de Ejecución en Metalurgia y 314 Ingenieros Civiles Metalurgistas.

La Metalurgia como rama de la Ingeniería tiene dos líneas muy definidas, estas son: la Metalurgia Extractiva orientada a los procesos de extracción de los metales a partir de sus minerales y la Metalurgia Adaptiva orientada al procesamiento de los metales para su uso por la Sociedad. La Metalurgia Extractiva está asociada a los procesos minero-metalúrgicos y la Metalurgia Adaptiva a los procesos metal-mecánicos de transformación.

Las carreras de Ingeniería Civil y de Ejecución en Metalurgia de la Universidad de Santiago de Chile tienen un sello que la distingue de otras carreras de metalurgia dictadas por otras universidades (de Concepción, UTFSM, Atacama, Católica del Norte, Católica de Valparaíso, Católica del Norte, Arturo Prat). Fundamentalmente las carreras de la Usach abarcan equilibradamente ambas áreas, Metalurgia Extractiva y Adaptiva o de Ingeniería de Materiales. Desde su creación y aproximadamente cada 10 años se han modificado los planes de estudio de la carrera en conjunto con los de las otras carreras de la Facultad de Ingeniería. En la última versión del plan de estudios se ha enfatizado las características de estas carreras, es decir, formar un profesional que se pueda desempeñar en forma eficiente en el área minero-metalúrgica, procesos de metalurgia extractiva y en el campo de la metalurgia adaptiva y en la ingeniería de materiales, sumado a ello un aumento en las asignaturas orientadas a la gestión, economía y finanzas. Los egresados de las carreras se han desempeñado en empresas minero-metalúrgicas, fundiciones, metal-mecánicas, oficinas de proyectos, en la docencia universitaria y en instituciones de investigación (CIMM, CCHEN, IM2, etc.)

# FORMACIÓN DE POROS EN ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS: MECANISMOS DE NUCLEACION, CRECIMIENTO Y MODELOS COMPUTACIONALES ASOCIADOS

Fabiola Pineda

Alumna Programa de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile  
fabiola\_pineda@hotmail.com

## RESUMEN

La porosidad que presentan los metales y aleaciones fundidas se genera en el proceso de solidificación debido al cambio volumétrico y/o a la presencia de burbujas de gas, como consecuencias de esto las propiedades mecánicas del material se ven disminuidas significativamente. Por este motivo es de suma importancia el conocimiento de las variables experimentales que inducen e inhiben la formación de los poros, actualmente esto se realiza mediante la simulación del proceso de solidificación optimizando la producción de distintos metales y aleaciones.

En este contexto, el presente artículo entrega la revisión bibliográfica actualizada de los modelos computacionales que simulan la formación de poros para aleaciones de aluminio fundidas.

## 1. INTRODUCCION

Las aleaciones de aluminio fundidas son ampliamente populares en la industria, en términos cuantitativos la producción mundial de aluminio sólo se ve superada por la producción de acero. De las aleaciones de aluminio fundidas cerca del 80% corresponden a aleaciones multicomponentes del tipo Al-Si empleadas en la industria automotriz y aeroespacial debido a sus buenas propiedades mecánicas, elevada soldabilidad y conductividad térmica, buena resistencia a la corrosión y excelente fluidez al vaciado [1-3].

En este tipo de aleaciones el elemento principal, Si, forma un eutéctico que se presenta con morfología acicular que evoluciona a fibrosa mediante la adición de elementos modificadores como Sr y Na aumentando las propiedades mecánicas del material, específicamente la elongación [4].

No obstante, el proceso de producción de dichos materiales introduce distintos defectos que reducen significativamente la resistencia a la fatiga

y el valor de UTS [5]. Uno de los defectos más común es la porosidad en los metales fundidos, la formación de ella obedece a dos mecanismos: contracción volumétrica y presencia de burbujas de gas; éstos pueden presentarse de manera aislada o conjunta en el desarrollo de un poro. En el primer caso la variación negativa del volumen debido a la transformación se compensa por el flujo del metal líquido entre las dendritas, debido a esto baja la presión en la zona pastosa, lo que combinado a la reducción de temperatura provoca una disminución en la solubilidad del gas en el metal líquido, respecto al segundo caso es de notar que durante el desarrollo del proceso de solidificación se produce un rechazo de gas desde la interface sólido/líquido aumentando la concentración de gas en el líquido hasta alcanzar un valor crítico donde comienza la nucleación y crecimiento de los poros. Respecto a esto existen unan serie de teorías que apoyadas de evidencia experimental se describen a continuación [6].

Por otro lado diversos autores señalan que la porosidad en aleaciones de aluminio se ve aumentada con la presencia de modificadores microestructurales, como los ya citados Sr y Na debido a que aumenta la contracción volumétrica (5.7 vs 6.4%) y reducen la tensión superficial (0.79 vs 0.64 N/m), de esta forma la morfología de los poros cambia de irregular a interconectada ubicándose de forma más dispersa en la matriz metálica [7].

## 2. MECANISMOS DE NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE PORO

**2.1. Nucleación homogénea:** la nucleación de un poro en el seno de un metal fundido se lleva a cabo cuando la presión asociada al gas contenido en el poro supera la presión de fractura, que se reporta por Campbell [6] en el orden de decenas de miles de atmósferas de presión para distintos metales, en particular para Aluminio dicho parámetro es 30.500 atm. Evidentemente ésta magnitud no se alcanzan en baños de metal fundido, por lo tan-

to este mecanismo no resulta ser viable en cuanto a la creación de poros. Sin embargo Fredriksson y Col. [6] demostraron que microporos pueden nuclear homogéneamente en zonas interdendríticas debido a la caída de presión por el cambio volumétrico.

**2.2. Nucleación Heterogénea:** al igual que en el caso de nucleación de un sólido en el líquido donde se dispone de una superficie asistente para nuclear, en el caso de nucleación de poros diversos autores señalan que impurezas o superficies externas al baño permiten la formación de los poros. De esta forma Campbell [6] señala que ciertas inclusiones no metálicas con baja mojabilidad pueden actuar como potenciales sitios de nucleación, Chalmers [6] indica que así también lo haría la interface sólido/líquido que avanza durante la solidificación siendo más favorable la nucleación en interfaces dendríticas o celulares debido a las ranuras y/o paredes celulares que provocan una concentración local alta de gas. También se cree que aquellas regiones con grietas favorecerán la nucleación de poros de acuerdo a evidencia experimental de Gupta y Col. [6].

A pesar de estas teorías, observaciones experimentales de metales y aleaciones fundidas evidencian una gran cantidad de poros, lo que se atribuye a una baja barrera energética para el proceso de nucleación de poros permitiendo que ellos se formen a presiones cercanas a los valores ambientes, es por esto que actualmente se desarrollan teorías no clásicas que explican este fenómeno.

**2.3. Crecimiento de poros:** una vez formados los núcleos de gas en el metal, éstos evolucionan de acuerdo a distintas variables experimentales, tales como: llenado de metal, fracción de sólido, concentración de gas interna y velocidad de enfriamiento entre otras. Respecto a la primera se señala que cuando existe alimentación externa de metal en el molde el poro ajusta su volumen de acuerdo al contenido de gas, por el contrario cuando no existe alimentación externa la tasa de crecimiento del poro está dada por la contracción del líquido [6]. Por otro lado se determinó que los poros crecerán con forma esférica cuando la fracción de sólido en el líquido cercano a él es menor que 0.001% ya que se de esta forma no se restringe el crecimiento del mismo por evolución del sólido, mientras que el crecimiento será con morfología compleja cuando la fracción del sólido adyacente al poro es mayor que 0.001% determinando la geometría del defecto la interacción entre él y el metal sólido circundante [7], en este contexto de acuerdo a la concentración de gas en el baño líquido diversos autores indican que si ésta es baja la concentración de los poros también lo es, mientras que si la concentración es elevada la cantidad de ellos aumenta presentándose en formas más complejas que

en el caso anterior [8]. Por último la influencia de la velocidad de solidificación provoca que a bajas extracciones calóricas los poros evolucionen hasta tamaños grandes, mientras que a altas velocidades de extracción de calor los poros son pequeños y en gran cantidad [7].

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, resulta evidente que es muy importante la predicción del desarrollo de la porosidad en los distintos metales y aleaciones fundidas antes de establecer los procesos de fabricación, de esta forma, mediante la simulación del proceso de solidificación considerando las variables experimentales de interés es posible entregar un producto con mejores propiedades. Esto se desarrolla actualmente de manera más sencilla debido al avance tecnológico de los programas computacionales disponibles.

### 3. MODELOS COMPUTACIONALES

Para las aleaciones de Al-Si la industria se vuelve cada vez más competitiva ya que se busca constantemente mejorar las propiedades mecánicas y reducir el costo de las piezas metálicas, mediante la simulación de las condiciones de operación y producción como herramienta predictiva se ha logrado aumentar la vida útil de dichos materiales [9].

Recientemente Lee y Col. [10] organizaron los modelos computacionales empleados en la determinación de defectos para el diseño de una bisagra de montaje de automóvil construida de aluminio, en particular aleación A356 (composición química en Tabla 1) que requiere espaciado interdendrítico secundario fino, tamaño de grano fino y baja porosidad.

**Tabla 1. Composición química aleación A356.**

Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mg (%)
92.65	7.0	0.1	0.25

En cuanto a esta última, los modelos existentes para simular la nucleación y crecimiento de los poros se categorizan en 4 grupos, que son los siguientes:

1. Modelos analíticos: corresponden a análisis matemático exacto de soluciones analíticas. Históricamente enfocados a situaciones con velocidad de llenado de metal líquido constante, siendo análogo al llenado de un tubo con un fluido pudiendo calcular el porcentaje de porosidad mediante el conocimiento de la caída de presión en la zona pastosa. Walter y Col. [11] considerando una serie de supuestos encontraron concordancia entre los resultados simulados y experimentales al solidificar metal en tubo pyrex, mientras que al comparar los datos simulados y experimentales para metales fundidos la concordancia era mínima; por lo mismo este tipo de modelos tiene reducida aplicabilidad.

2. Modelos que usan función criterio basados en funciones empíricas: en este caso la función criterio hace referencia a condiciones locales (experimentales o parámetros físicos) donde se pueden desarrollar los poros. De esta forma Niyama y Col. [12] usando la Ley de Darcy predicen las regiones de difícil llenado en aleaciones de hierro fundidas, de esta forma las zonas donde la razón G/R (gradiente térmico y velocidad de enfriamiento respectivamente) es grande aumenta el desarrollo de poros debido a contracción volumétrica. Este modelo a pesar de ser empleado originalmente en aleaciones de hierro ha sido empleado en otras aleaciones pero con menor éxito, así también a pesar del fácil uso de este modelo su aplicación es limitada en ciertas condiciones de presión y temperatura.
3. Modelos basados en solución de ecuación de Stokes acoplados a ecuaciones de conservación de energía, masa y momentum, y de continuidad: en este tipo de modelos se asume al metal líquido como fluido newtoniano, aplicándose al igual que en el caso anterior la Ley de Darcy, pero acoplada a la ecuación de continuidad para determinar la relación entre la presión y el porcentaje de porosidad, esto mediante las siguientes expresiones:

$$P_g = P_m + \frac{2\gamma_{lg}}{r} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_H^0 = (1 - f_l)C_s + f_l C_l + \alpha \frac{P_g C_v}{T} \quad \text{Ecuación 2}$$

En ecuación 1  $P_g$  es la presión de gas dentro del poro,  $P_m$  es la presión de gas en el metal y  $\gamma_{lg}$  es la energía interfacial líquido/gas, en ecuación 2  $C_H^0$  es la concentración inicial de hidrogeno,  $f_l$  es la fracción de líquido,  $C$  indica la composición de líquido (l), sólido (s) y gas (g) y  $\alpha$  corresponde a la constante de los gases.

Usando estos modelos Kubo y Col. [13], asumiendo la nucleación del poro en la interface dendrita/metal líquido y diámetro de poro equivalente a espaciado interdendríticas secundario calcularon el cambio en la fracción de líquido, la presión de gas en el metal líquido y en el poro. De esta forma al comparar los resultados obtenidos simulados y experimentales encontraron buena correlación en el porcentaje de porosidad y reducida correlación en el tamaño de poro atribuible a la condición antes señalada de diámetro de poro.

De igual forma autores como Poirier, Zhu y Ohnaka [10] obtuvieron buena correlación entre los datos simulados y experimentales de porcentaje de porosidad y no así en cuanto al tamaño de los poros.

4. Modelos que acoplan difusión de  $H_2$  e interacción gas-sólido, considerando nucleación azarosa de poros: estos modelos se presentan con aproximaciones macroscópicas o mesoscópicas, esto de acuerdo a las variables consideradas que para el primer caso son únicamente transferencia de calor y flujo de fluido simulando de tal forma el llenado del molde y la posterior solidificación; en el segundo caso también se incorpora funciones físicas de los procesos involucrados en la determinación de la granulometría, el espaciado interdendríticas secundario y la porosidad de la pieza metálica; siendo de esta forma el modelo más completo. En ambos casos se considera el efecto de difusión de  $H_2$ , específicamente la velocidad que presenta el gas hasta llegar a la interface poro/metal líquido, de esta forma también es posible estimar el tiempo asociado a la presión crítica en la formación de los poros.

Este tipo de modelo ha sido ampliamente estudiado por distintos grupos de investigación, no obstante aún no se encuentra disponible en la industria a pesar de los excelentes resultados que entrega.

## REFERENCIAS

- [1] J.E. Gruszleski, B.M. Closset, "Microstructure development during casting", first ed., American Foundry Society Inc., Chicago, Il, 1990
- [2] J. Campbell, Castings, third ed., Butterworth-Heinemann, London, 2003
- [3] ASM Metals Handbook, vol. 2, Properties and selection: non-ferrous alloys and special purpose materials, ASM International, 1990
- [4] J.E. Gruzleski; "The treatment of liquid aluminum-silicon alloys", American Foundrymens Society Inc.. 1990
- [5] Ch. Pequet, M. Gremaud y M. Rappaz, "Modeling of microporosity, macroporosity, and pipe-shrinkage formation during the solidification of alloys using a mushy-zone refinement method: applications to aluminum alloys", Metallurgical and materials transactions A vol. 33A 2095 -2106
- [6] A. K. Gupta, B. K. Saxena, S. N. Tiwari y S. L. Malhortra, "Review pore formation in cast metals and alloys", Journal of materials science 27 (1992) 853 - 862
- [7] J. Huang, T. Mori y J. G. Conley, "Simulation of microporosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings", Metallurgical and materials transactions B vol. 29B 1249 -1260
- [8] R.C. Atwood, P.D. Lee, "Simulation of the three-dimensional morphology of solidification porosity in an aluminium-silicon alloy", Acta Materialia 51 (2003) 5447 - 5466
- [9] P.D. Lee, J.F. Major y L. Hofmann, "Numerical Simulation of Casting Solidification in Automotive Applications" ed Chongmin Kim and Chung-Whee Kim (TMS) (1991) 231 - 251
- [10] B. Cantor y K. O'Reilly (2003), Solidification and Casting, UK: Editado por Biblioteca Britanica, 121-142
- [11] P.Thevoz, J.L. Desbiolles y M. Rappaz, "Modeling of equiaxed microstructure formation in casting" Metallurgical and materials transactions A20(2) 311-322
- [12] E. Niyama, T. Uchida, K. Anzai y S. Saito AFS Journal Int. Cast. Metal (1982) 52-63
- [13] K. Kubo K y R.D. Pelke (1985) Metallurgical and materials transactions 16B 359-366

