

# Ciencia e Investigación

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



## EL HOMBRE, LOS MATERIALES Y EL MEDIOAMBIENTE

■ Alberto A. Pochettino

## EVOLUCIÓN DE LA TEXTURA CRISTALINA EN LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE COMBUSTIBLES Y COMPONENTES INTERNOS DE REACTORES NUCLEARES DE POTENCIA

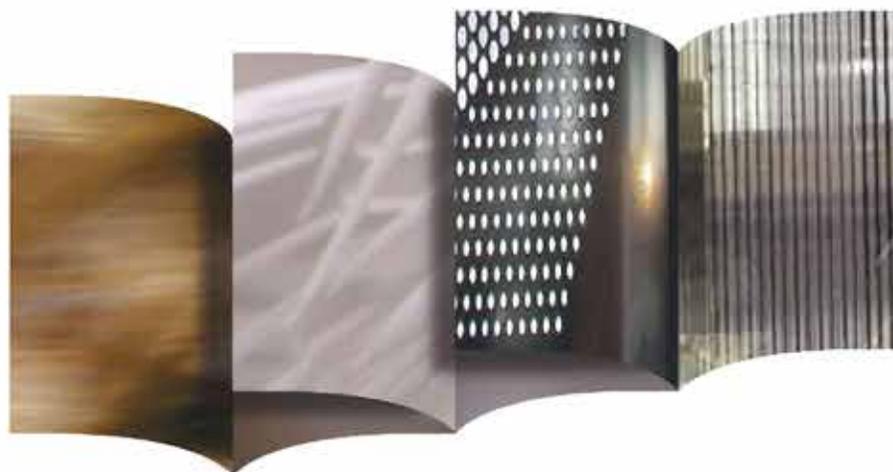
■ G. Juárez, C. Buioli, A. V. Flores, M. Dellagnolo, J. Santisteban, M. A. Vicente Alvarez, D. Azzinari, D. Bianchi, A. Revesz, M. Hoffman, T. Ungar, P. Vizcaíno

## EL INSÓLITO CAMINO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. DESDE LA CIENCIA BÁSICA HASTA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

■ Marcela Barrera y Hernán Socolovsky

## CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. UN FENÓMENO BIEN CONOCIDO PERO QUE AÚN SIGUE CAUSANDO CONSIDERABLES DAÑOS

■ Gustavo S. Duffó y Silvia B. Farina



## Desarrollo y gestión de proyectos científicos y tecnológicos innovadores

FUNINTEC es una organización sin fines de lucro creada por la Universidad de San Martín cuyo objetivo es promover y alentar la investigación, el desarrollo tecnológico y la transferencia de conocimientos a los sectores público y privado, sus empresas y en particular a las PyMES.

Dentro de los alcances previstos por la Ley de Innovación Tecnológica, funciona como vínculo entre el sistema científico tecnológico y el sector productivo.

**CONTACTO:**  
[www.funintec.org.ar](http://www.funintec.org.ar)

Fundación  
Innovación  
y Tecnología

**FUNINTEC**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN



**EDITOR RESPONSABLE**

Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias (AAPC)

**COMITÉ EDITORIAL**

**Editora**

Dra. Nidia Basso

**Editores asociados**

Dr. Gerardo Castro

Dra. Lidia Herrera

Dr. Roberto Mercader

Dra. Alicia Sarce

Dr. Juan R. de Xammar Oro

Dr. Norberto Zwirner

**CIENCIA E**

**INVESTIGACIÓN**

Primera Revista Argentina  
de información científica.

Fundada en Enero de 1945.

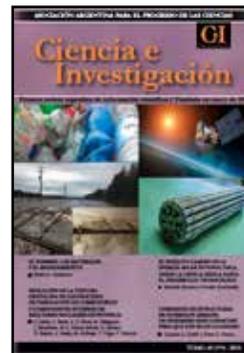
Es el órgano oficial de difusión de  
La Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias.

A partir de 2012 se publica en dos  
series, Ciencia e Investigación  
y Ciencia e Investigación Reseñas.

Av. Alvear 1711, 4° piso,  
(C1014AAE) Ciudad Autónoma  
de Buenos Aires, Argentina.  
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998  
Registro Nacional de la  
Propiedad Intelectual  
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o  
anunciantes, en los artículos o  
en los avisos publicados es de  
exclusiva responsabilidad de los  
mismos.

*Los paneles solares en un  
satélite  
Daño por corrosión en una  
estructura de hormigón  
armado  
Elemento combustible de un  
reactor nuclear  
Recipiente de polímero para  
bebida*



## SUMARIO

### EDITORIAL

Los materiales, el conocimiento, el cuidado de la tierra

**Alicia L. Sarce - Juan Carlos Almagro ..... 3**

### ARTÍCULOS

Evolución de la textura cristalina en los procesos de fabricación  
de combustibles y componentes internos de reactores nucleares  
de potencia.

**G. Juárez, C. Buioli, A. V. Flores, M. Dellagnolo, J. Santisteban,  
M. A. Vicente Alvarez, D. Azzinari, D. Bianchi, A. Revesz, M.  
Hoffman, T. Ungar, P. Vizcaíno ..... 5**

El insólito camino de la energía solar fotovoltaica. Desde la  
ciencia básica hasta el desarrollo tecnológico.

**Marcela Barrera y Hernán Socolovsky..... 34**

Corrosión en estructuras de hormigón armado. Un fenómeno  
bien conocido pero que aún sigue causando considerables  
daños.

**Gustavo S. Duffó y Silvia B. Farina ..... 51**

El hombre, los materiales y el medioambiente.

**Alberto A. Pochettino ..... 67**

**INSTRUCCIONES PARA AUTORES ..... 89**

*... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre  
los trabajadores científicos que cultivan disciplinas  
diversas y órgano de expresión de todos aquellos que  
sientan la inquietud del progreso científico y de su  
aplicación para el bien.*

**Bernardo A. Houssay**

# Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

## COLEGIADO DIRECTIVO

Presidente

Dra. Ester Susana Hernández

Vicepresidente

Dra. Ursula Maria Molter

Secretaria

Dra. Alicia María Sarce

Tesorero

Dr. Alberto Antonio Pochettino

Protesorero

Dra. Graciela Noemí Balerio

Miembros Titulares

Ing. Juan Carlos Almagro

Dra Nidia Basso

Dr. Miguel Blesa

Dra. María Cristina Cambiaggio

Dra. Alicia Fernández Cirelli

Dra. Susana María Gallardo

Dra. Lidia Herrera

Dr. Mario A.J. Mariscotti

Dr. Luis Alberto Quesada Allué

Dr. Juan Roberto de Xammar Oro

Miembros Institucionales:

Asociación Argentina de Microscopía (SAMIC):

Francisco Capani

Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales (AAENDE):

Héctor Espejo

Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES):

Jaime B. A. Moragues

Sociedad Argentina de Hipertensión Arterial (SAHA):

Ana María Puyó

Sociedad Argentina de Genética (SAG):

Ángela Rosarí Solano

Miembros Fundadores

Dr. Bernardo A. Houssay – Dr. Juan Bacigalupo – Ing. Enrique Butty

Dr. Horacio Damianovich – Dr. Venancio Deulofeu – Dr. Pedro I. Elizalde

Ing. Lorenzo Parodi – Sr. Carlos A. Silva – Dr. Alfredo Sordelli – Dr. Juan C. Vignaux –

Dr. Adolfo T. Williams – Dr. Enrique V. Zappi

AAPC

Avenida Alvear 1711 – 4º Piso

(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina

[www.aargentinapciencias.org](http://www.aargentinapciencias.org)

# LOS MATERIALES, EL CONOCIMIENTO, EL CUIDADO DE LA TIERRA

■ **Alicia L. Sarce - Juan Carlos Almagro**

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

E-mail: [secretaria@aargentinapciencias.org](mailto:secretaria@aargentinapciencias.org)

Pasa desapercibido diariamente que en las más variadas actividades no cesa la necesidad de adquirir conocimiento. Dentro de los múltiples ejemplos están los de las empresas que no pueden ser ajenas a los cambios para organizarse o competir en sus mercados, sin tener a su alcance el resultado producto de alguna acción conjunta de la ciencia y la tecnología. El nivel de la calidad de manufactura era siempre, inicialmente, el que se ocupaba de diferenciar a los productos como elegidos; ahora, a más de él, se deben distinguir por sus innovaciones que con su complejidad requieren del saber científico. Así, también desde bastante tiempo atrás, los espacios para el crecimiento económico de los países están ocupados con ideas cargadas de material adquirido en el pizarrón o en el laboratorio.

El conocimiento científico, puro, aplicado o tecnológico siempre sirvió y el arte de una buena conducción de él es la de conseguir que, mayoritariamente, produzca beneficios a la sociedad como lo ha hecho, entre otros, el caso tan impensable del estudio del efecto de la radio frecuencia en el núcleo del átomo, que terminó en un resonador magnético, un equipo bien reconocido hoy en el diagnóstico médico. Pero también es cierto que ese conocimiento solo llevará a la identificación de un país como científicamente culto, si no tiene un receptor dispuesto a competir en el ámbito de los grandes desafíos mundiales, distintos a los artesanales disponibles históricamente. Es ese hecho el que fue en el pasado, y debe seguir siendo, la demanda que actúa como una fuerza que impulsa el crecimiento y continuidad de los sistemas científico y técnicos.

La Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias ha estado siempre dedicada a mirar y apoyar a la ciencia y, para que ésta no quede limitada al ámbito especializado, la difunde a la sociedad a través de su revista Ciencia e Investigación.

En este número se habla sobre los materiales. No es el primer lanzamiento que hacemos sobre el tema y no ha sido planificado temáticamente para hacer docencia sobre el mismo, sino por la importancia que tienen en la vida diaria. Además, y en consonancia con lo mencionado anteriormente, ya en su Boletín de octubre del año 1995, la Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo Industrial (ONUDI) señalaba que “para el año 2000 la tecnología que más influirá en otras ramas de la ingeniería será la ingeniería de los nuevos materiales”.

Estos nuevos materiales tienen muchas veces su origen en materiales metálicos, cerámicos y semiconductores tradicionales que, a partir de modificaciones surgidas en trabajos de laboratorio y/o de modelos, llevan a materiales

con nuevas propiedades que se ponen al servicio de muy distintos campos en la sociedad. Los trabajos presentados en las siguientes páginas son algunos ejemplos de esto. Así, aparecerá el circonio que fue descubierto en 1789 por Martin Heinrich Klaproth. Actualmente, el uso del circonio está fuertemente asociado con los reactores nucleares. El trabajo "Evolución de la textura cristalina en los procesos de fabricación de combustibles y componentes internos de reactores nucleares de potencia", que se presenta en primer lugar, muestra de manera contundente la importancia que los estudios básicos llevados a cabo en el laboratorio, en particular usando las delicadas técnicas de difracción, tienen para mejorar el desarrollo de los procesos de fabricación de combustibles nucleares, campo en el que nuestro país está a la altura de los más desarrollados en el mundo.

Nos encontramos también en este número con el trabajo "El insólito camino de la energía solar fotovoltaica desde la ciencia básica hasta el desarrollo tecnológico", que muestra una aplicación de los materiales semiconductores (en particular Si, GaAs y/o InGaP) para la generación de la energía solar. Es otro claro ejemplo que muestra la necesidad de investigaciones básicas, en este caso para optimizar la fabricación de celdas solares que luego integrarán los paneles solares. En particular aquellos paneles que, yendo luego al espacio, deben satisfacer la demanda de energía eléctrica que requieren los satélites desarrollados y fabricados en Argentina.

La industria de la construcción nos sigue sorprendiendo a menudo con el anuncio de accidentes producidos en edificios, puentes, represas hidroeléctricas entre otros, debido a problemas de degradación en sus estructuras de hormigón armado (un ejemplo de un material compuesto). La aplicación de los procedimientos de diagnóstico es fundamental e imprescindible para prevenirlos. De eso nos habla el trabajo "Corrosión en estructuras de hormigón armado. Un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños". Y, además, nos cuenta de las experiencias y estudios realizados para conocer los mecanismos básicos de la corrosión de las armaduras, indispensables para poder construir esos procedimientos.

Finalmente, el trabajo "El hombre, los materiales y el medio ambiente" presenta algunos elementos que permiten reflexionar sobre cómo el hombre puede, a través del estudio y de su interacción, mejorar el proceso de selección de los materiales para disminuir el efecto no deseado de la sociedad sobre el medioambiente. Se analizan producción y tecnologías sustentables; se describe la técnica del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), y es presentando, en particular, como estudio de caso, la botella de agua mineral producida con dos polímeros: PET y tapón de PP. Estos temas están acompañados por una descripción histórica de los materiales que utilizó y utiliza hoy el hombre a nivel mundial.

Agradecemos a cada uno de los autores por el tiempo dedicado a lograr de los trabajos una publicación que pueda difundirse, sin perder la rigurosidad científica acostumbrada, a los jóvenes que están en la trayectoria del apasionante estudio del mundo de los materiales, entusiastas de un saber más profundo sobre su naturaleza, y con el deseo de que disfruten con la lectura de los cuatro artículos que se presentan los cuales tratan de temas tan importantes hoy en día como el comportamiento de un combustible nuclear, la energía solar, hasta las advertencias que deberíamos escuchar para sobrevivir en la tierra.

# EVOLUCIÓN DE LA TEXTURA CRISTALINA EN LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE COMBUSTIBLES Y COMPONENTES INTERNOS DE REACTORES NUCLEARES DE POTENCIA

**Palabras clave:** Ciclo de combustible, tecnología, circonio, metalurgia, textura, difracción.  
**Key words:** Fuel cycle, technology, zirconium, metallurgy, texture, diffraction .

El desarrollo de la metalurgia en la Argentina en los últimos sesenta años vio el paso y transformación de las prácticas tradicionales del ancestral “arte-tecnológico” metalúrgico a la metodología científica. El uso del método fenomenológico<sup>[1]</sup> ha sido y sigue siendo aplicado a través de técnicas de ensayos de materiales que, pese a sus limitaciones, son de fundamental importancia e ineludible aplicación para caracterizar propiedades en los materiales estructurales derivados de las etapas de un proceso de fabricación. No obstante ello, el avance tecnológico hace que actualmente las técnicas de difracción nos acerquen a la descripción atomística de las propiedades deseadas para el material orientadas a una determinada aplicación. En este contexto en el presente trabajo se han aplicado tres técnicas basadas en la difracción: difracción de rayos X, difracción de electrones retrodispersados y difracción de neutrones, para describir la misma propiedad en un policristal, la textura cristalina<sup>[2]</sup>. Esta propiedad es particularmente importante en las aleaciones de circonio de uso nuclear, ya que la anisotropía intrínseca derivada de su estructura hexagonal<sup>[3]</sup> se transforma en macroscópica luego de los procesos de deformación, determinando las propiedades mecánicas del componente terminado necesarias en su misión de seguridad. El trabajo destaca la complementariedad y especificidad de cada técnica y nos aproxima a describir las propiedades mecánicas de un componente a través de los cambios geométricos que experimenta la materia prima durante un proceso de conformado plástico.

■ **G. Juárez<sup>(1)</sup>, C. Buioli<sup>(1)</sup>, A. V. Flores<sup>(1)</sup>, M. Dellagnolo<sup>(1)</sup>, J. Santisteban<sup>(2)</sup>, M. A. Vicente Alvarez<sup>(2)</sup>, D. Azzinari<sup>(1)</sup>, D. Bianchi<sup>(1)</sup>, A. Revesz<sup>(3)</sup>, M. Hoffman<sup>(4)</sup>, T. Ungar<sup>(5)</sup>, P. Vizcaíno<sup>(1) (\*)</sup>**

(1) Departamento de Tecnología de Aleaciones de Circonio, Centro Atómico Ezeiza, CNEA, Argentina

(2) Departamento de Física de Neutrones, Centro Atómico Bariloche, CNEA/CONICET, Argentina

(3) Materials Physics Department, Eötvös University, Budapest, Hungría

(4) Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Alemania

(5) University of Manchester, School of Materials, Reino Unido

E-mail: (\*) vizcaino@cae.cnea.gov.ar

The development of the metallurgy in the last sixty years in Argentina assisted to a transformation of the traditional metallurgy into the materials science. The use of the phenomenological method was and continues being applied through the mechanical tests to characterize structural materials properties. However, the technological progress let us to get closer to an atomistic description of the desired material properties for a specific application. In this framework, in the present work three diffraction based techniques were applied: X-ray diffraction, electron backscattered diffraction and neutron diffraction, in order to describe the same property of a policristal, the crystalline texture. This property is particularly important for the zirconium based alloys since the intrinsic anisotropy derived from the hexagonal structure of the room temperature equilibrium phase ( $\alpha$ -Zr) becomes a macroscopic property after the deformation processes, determining the mechanical properties of the nuclear component. This work highlights the complementarity and specificity of each technique and bring us closer to describe mechanical properties through the geometrical changes into which the raw material goes during the plastic forming transformations.

## ■ INTRODUCCIÓN

Desde que nuestro país decidió ingresar al campo de la tecnología nuclear para la generación eléctrica, a principios de los años 50', en la Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA, paulatinamente se pusieron en marcha las líneas de desarrollo científico-tecnológico que permitirían, además de hacerse poseedor de las instalaciones nucleares, lograr toda la autonomía tecnológica posible en este campo. El desarrollo de una tecnología sofisticada y compleja como la nuclear requirió la formación de recursos humanos especializados en diversas áreas junto con el desarrollo de laboratorios e instalaciones piloto para implementarla.

En metalurgia esto significó introducir la práctica tradicional al conocimiento y metodología científica. Implicó, además, iniciarse en el conocimiento de metales y aleaciones especiales que son esencialmente desconocidas fuera del ámbito nuclear: la tecnología del uranio y en el caso que nos ocupa en el presente trabajo, la de las aleaciones de base circonio, utilizadas para fabricar la estructura del combustible nuclear así como otros componentes internos del reactor, debido a la feliz combinación de buenas propiedades mecánicas, buen comportamiento frente a la corrosión y baja sección eficaz de captura neutrónica<sup>[4]</sup>.

Desde finales de los años 50' el Profesor J. A. Sabato, con su brillantez y dinamismo creó, organizó y dirigió la División Metalurgia (más tarde Departamento) y luego la Gerencia de Tecnología del Centro Atómico Constituyentes, cuya expresión tecnológica unificada en el área nuclear del circonio comenzó a principios de los años 70' con el denominado "Proyecto PPFAE" (Pro-

yecto Planta Piloto Fabricación de Aleaciones Especiales) en el Centro Atómico Ezeiza.

Este grupo liderado entonces por el Ing. J. C. Almagro tuvo como objetivo desarrollar la tecnología que permitiera cerrar el ciclo de fabricación de combustibles nucleares en nuestro país. El proyecto era coordinado técnicamente por el Dr. A. D. Banchik, quien se ocupaba además de dirigir el laboratorio de materiales, los procesos de deformación en caliente y los aspectos científicos del mismo, mientras que el Ing. A. Leyt desarrollaba los procesos de fundición, el Ing. O. Lanzos los de laminación<sup>[5]</sup> en frío y el Ing. R. M. Volpi se implicaba en los diversos desafíos tecnológicos que iban surgiendo. El proyecto culminó con el desarrollo de la tecnología de producción de las vainas de Zircaloy-4<sup>[6]</sup> para los combustibles de las Centrales Nucleares. Simultáneamente se construía el complejo industrial que hoy forman las empresas mixtas FAE SA (Fabrica de Aleaciones Especiales) a cargo del Ing. J. Kittl que en paralelo con CONUAR (Combustibles Nucleares Argentinos), son las actuales proveedoras de los combustibles y otros componentes nucleares de nuestras tres centrales en operación, Atucha I, II y Embalse.

## ■ CUBRIR LA DISTANCIA ENTRE SABER Y SABER HACER

Los procesos de fabricación metalúrgicos implican transformaciones geométricas de la materia prima (normalmente lingotes, chapas, tubos, barras o, como en nuestro caso, esponja de circonio) que conllevan aparejadas transformaciones de la microestructura del material que afectan significativamente sus propiedades. Desde el comienzo de este proyecto y a lo largo de la década de los 70' los tecnólogos argentinos buscaron afanosamente, a ve-

ces en forma cuasi-detectivesca, el "know how"<sup>[7]</sup> para desarrollar la fabricación de las vainas (tubos de pared fina) de elementos combustibles en el país, conocimiento que luego fue transferido a FAE SA. Ese conocimiento es imprescindible para alcanzar primero las propiedades especificadas en el diseño de uso, ya sean vainas de elementos combustibles u otro componente nuclear, y luego para la solución autónoma de problemas de fabricación o de un cambio del material demandado por el usuario, ya que en este campo tecnológico la prueba y error suele tener un alto costo.

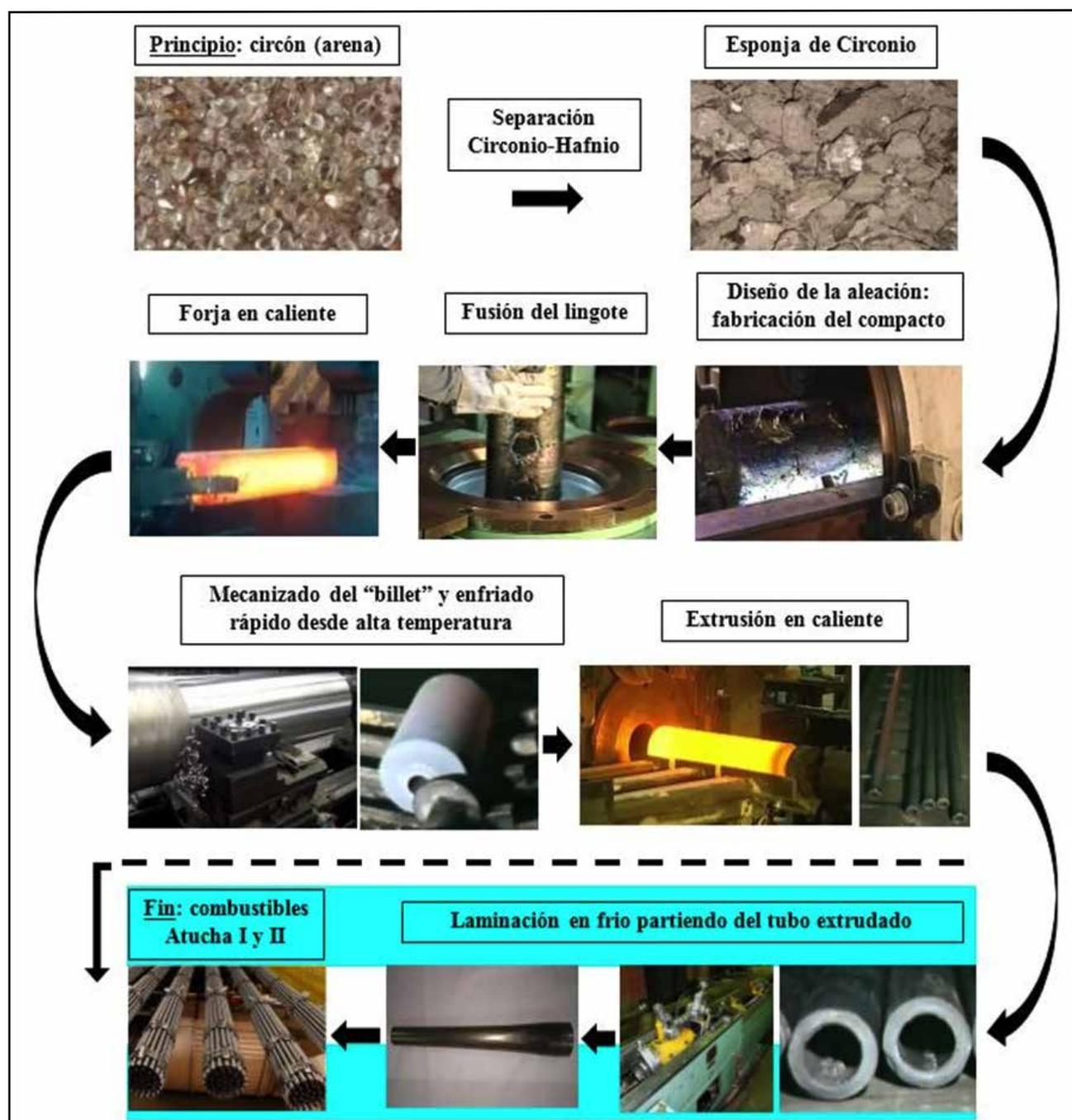
Si bien cumplir con las especificaciones técnicas es una condición necesaria, en muchos casos expresan el umbral aceptable de propiedades para comenzar a fabricar y cuya mejora es deseable, ya que siempre los avances tecnológicos o competitivos requieren disminuir la dispersión de valores de una propiedad, eliminar gradientes de la misma en la geometría del componente o modificar radicalmente la misma. Se trata de optimizar la calidad de producto, la economía en los procesos para obtenerlo y eventualmente afrontar los cambios necesarios por no haberse observado un comportamiento satisfactorio durante operación. De manera que el "empirismo" impone un límite al desarrollo que solo se supera avanzando en el conocimiento de las leyes físicas que dan sustento a estas recetas, ya sea para mejorarlas o eventualmente reemplazarlas. En este contexto nuestro departamento, heredero de la escuela creada por el Prof. Sabato y su grupo de colaboradores hace más de 60 años, continúa el desarrollo de la tecnología de las aleaciones base circonio y la generación del más amplio conocimiento del mismo a través del uso de las más modernas técnicas de microanálisis que permiten arrojar luz sobre

las transformaciones que sufren las microestructuras y sus propiedades innovando, dando respaldo a la fabricación y a su vez respuesta a las desviaciones que ocurren en los procesos productivos de manera de alcanzar un dominio acabado en el diseño y en la calidad del producto final.

## ■ DESDE LA ARENA AL COMBUSTIBLE NUCLEAR

La elaboración de las aleaciones de circonio es relativamente compleja y aun contando con la experiencia acumulada, ya convertida en exigentes especificaciones de fabricación y control de procesos,

cada etapa desde la obtención del circonio hasta la vaina del combustible nuclear requiere un formidable respaldo científico. El proceso comienza a partir del mineral silicato de circonio,  $ZrSiO_4$  (un tipo de "arena"), del cual mediante un proceso denominado Kroll<sup>(8)</sup> se obtiene cloruro de circonio,  $ZrCl_4$ . Esta sal



**Figura 1.** Etapas del ciclo del combustible nuclear. Desde la arena de circón (mineral) hasta el combustible nuclear (último cuadro). La línea de puntos indica las etapas del proceso de fabricación que se realizan a escala industrial en nuestro país actualmente.

es procesada para separar el circonio del hafnio, los cuales se hallan combinados en la naturaleza debido a sus propiedades químicas similares. No obstante la similitud de su comportamiento químico esta separación es necesaria porque el hafnio, a diferencia del circonio, posee una gran sección eficaz de captura neutrónica, al punto de ser utilizado como absorbente para parar su funcionamiento en ciertos reactores. Finalmente el cloruro de circonio es reducido para obtener la esponja de circonio: el punto de partida de la fabricación de las aleaciones. Junto con la esponja y los elementos de adición para la aleación diseñada se fabrica un compacto prensando el material. Varios compactos se sueldan formando un electrodo que se funde al vacío en hornos de arco eléctrico, este proceso se repite tres o cuatro veces para obtener los lingotes de la aleación. Estos son forjados a alta temperatura, enfriados rápidamente, mecanizados, extrudados también a alta temperatura ( $<850^{\circ}\text{C}$ ) y finalmente laminados en frío para obtener tubos, chapas u otros semi-terminados. El diagrama de flujo de la Figura 1 nos permite tener una visión sintética cualitativa del enlace de todo el proceso.

A mediados de los años 80' la CNEA ya había desarrollado todo el ciclo de fabricación del combustible nuclear a escala piloto desde el mineral hasta la vaina de Zircaloy-4, la aleación de circonio utilizada en nuestros reactores para fabricar la estructura del combustible que contiene al uranio (óxido de uranio,  $\text{UO}_2$ ), es decir, el combustible nuclear propiamente dicho. No obstante ello, debido a razones de escala<sup>1</sup> y costos comerciales no fue posible cerrar el ciclo a escala industrial. Debido a esto la fabricación del combustible nuclear en nuestro país comienza con la laminación en frío de un tubo denominado TREX<sup>91</sup> de Zircaloy-4

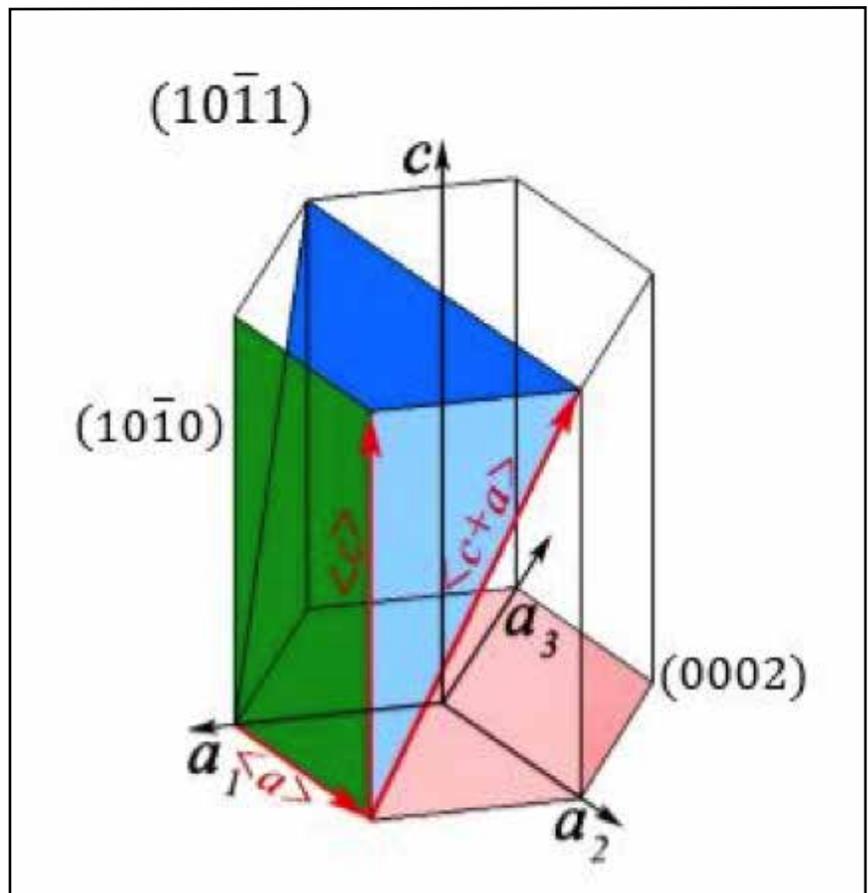
que se adquiere en el mercado internacional. Esta tecnología, basada en la capacidad de transformar un tubo de pared gruesa (7,0 mm) en un tubo de pared delgada ( $\sim 0,6$  mm) requiere, como todas las etapas del proceso, de un sólido respaldo científico para mantenerse competitiva. Esta es la etapa de la que nos ocuparemos en el presente trabajo.

### ■ DEFORMACIÓN, MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Los estudios realizados por E. Tenckoff mostraron que, a diferencia de lo que sucede cuando se deforma el sistema cristalino cúbico, en los metales de estructura hexagonal la baja disponibilidad de sistemas de deformación por deslizamiento, su

distribución asimétrica y las estrictas relaciones de orientación cristalográfica del sistema de deformación por maclado resultan en una fuerte orientación preferencial de los cristales del policristal<sup>2</sup> que forman la microestructura de la aleación. Este proceso de reorientación cristalina denominado textura de deformación determina una igualmente fuerte anisotropía en las propiedades mecánicas que se expresa en la geometría del componente y es utilizada para optimizar sus propiedades en ciertas direcciones en las cuales las cargas que deberá soportar son mayores.

Por debajo de los  $850^{\circ}\text{C}$  la fase de equilibrio para el circonio y sus aleaciones es la  $\alpha\text{-Zr}$  de estructura hexagonal compacta (hcp). Dado



**Figura 2.** Sistemas de deslizamiento más observados en la fase  $\alpha\text{-Zr}$  a bajas temperaturas. Se indican los planos prismáticos de primer orden  $(10\bar{1}0)$ , basal  $(0002)$  y piramidal de primer orden  $(10\bar{1}1)$  de la celda hexagonal.

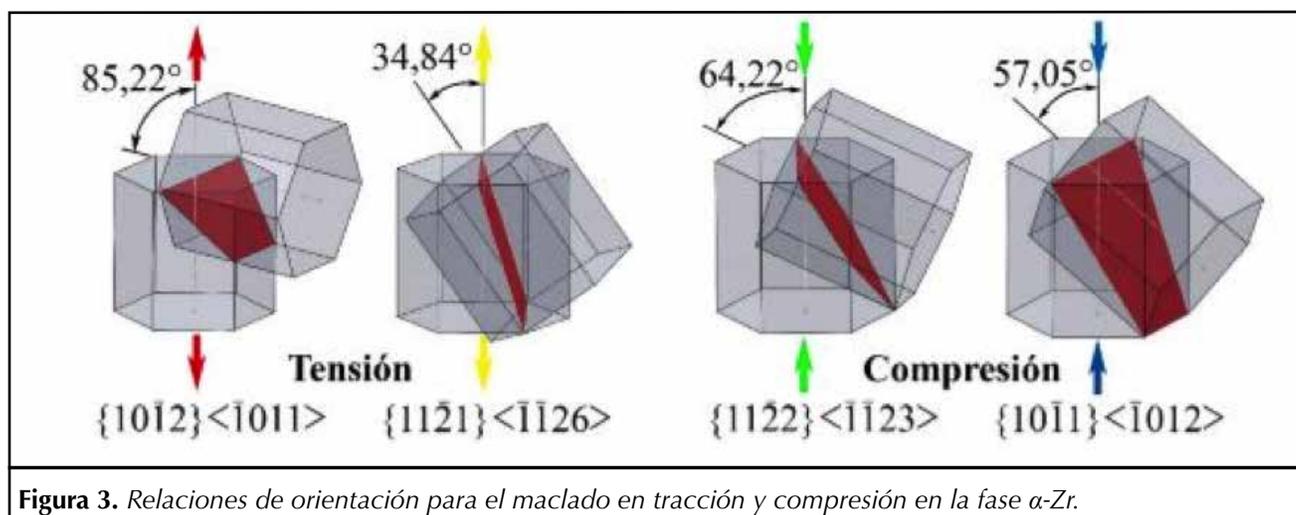


Figura 3. Relaciones de orientación para el maclado en tracción y compresión en la fase  $\alpha$ -Zr.

que los procesos intermedios y finales de deformación plástica se realizan por debajo de esta temperatura, estos afectan fuertemente la textura final. La complejidad de este sistema impide analizar los procesos de deformación de modo general como ocurre con aquellos del sistema cúbico, dado que en los hcp la activación de los sistemas de deslizamiento depende de su relación  $\langle c \rangle / \langle a \rangle$ , Figura 2. Esta es 1,593 para la fase  $\alpha$ -Zr ( $<1,633$ , relación ideal en el modelo de esferas rígidas<sup>3</sup>). Para este caso particular de temperaturas relativamente bajas ( $<500^\circ\text{C}$ ) se ha observado la activación del deslizamiento para la deformación en los planos prismáticos de primer orden y en el plano basal, en las direcciones de la forma, mientras que en regiones de alta concentración de tensiones como bordes de grano, también se observan trazas de deslizamiento sobre planos piramidales de la forma, Figura 3.

Por otra parte, la deformación con componente  $\langle c \rangle$  se ha explicado en términos de maclado en planos piramidales de primero y segundo orden bajo condiciones de tracción y compresión, Figura 3. Aunque el maclado no permite altas tasas de deformación tiene un rol esencial en la creación de textura, ya que las rotaciones que implican ge-

neran reorientaciones que favorecen el deslizamiento y consecuentemente permiten mayores deformaciones.

### ■ EVOLUCIÓN DE LA TEXTURA EN UN PROCESO DE DEFORMACIÓN

Los cambios de orientación que provoca el maclado y la activación de los citados sistemas de deslizamiento son responsables de la rotación de la microestructura durante los procesos de laminación. La anisotropía de la estructura hexagonal se manifiesta esencialmente en la orientación del eje  $\langle c \rangle$  (o polo  $\langle c \rangle$ ), normal a los planos de la familia (0002), de existencia real<sup>4</sup> en la estructura. De modo que la textura de los materiales hexagonales se caracteriza siguiendo las rotaciones de este polo.

Como se observa en el diagrama de la Figura 4.a), en la laminación de tubos el tubo materia prima, limitado por los rodillos de laminación (externamente) al avanzar y comprimirlo y el mandril (internamente), fijo, obligan al material a fluir hacia adelante en dirección axial. En este proceso la reducción de área de la sección axial del tubo está determinada por sus reducciones de espesor y diámetro.

La forma más común de caracterizarlo tecnológicamente consiste en combinar ambas reducciones en un solo parámetro que expresa el cociente entre las deformaciones verdaderas observadas en diámetro y espesor. Este es el denominado parámetro o factor Q y es utilizado para diseñar secuencias de laminación de tubos. En términos de la coordenada radial de un sistema cilíndrico, Q se expresa:

$$Q = \frac{\ln \left[ \frac{R_0^2 - r_0^2}{R^2 - r^2} \right]}{\ln \left[ \frac{\rho_0}{\rho} \right]} - 1, \text{ ecuación [1]}$$

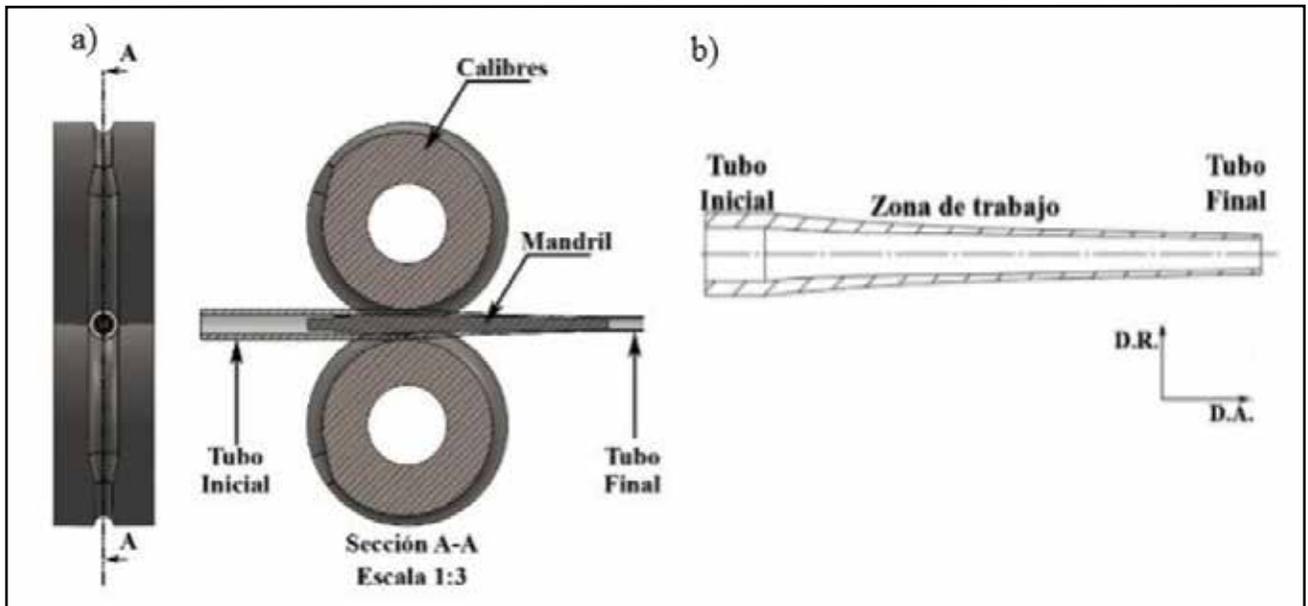
donde:

$R_0$  y  $r_0$  = radio inicial externo e interno respectivamente

$R$  y  $r$  = radio final externo e interno

$\rho_0$  y  $\rho$  = distancia radial a un elemento de volumen del tubo antes y después de la deformación plástica.

Si  $Q > 1$ , la reducción del espesor domina sobre la de diámetro, las fuerzas radiales de compresión predominan también. En este caso los citados mecanismos de defor-



**Figura 4.** a) Perfil de laminación, rodillos y cuello deformado y canaleta del rodillo. b) Esquema de la zona de trabajo en el proceso de deformación en frío (izq.).

mación tienden a rotar las celdas hexagonales del circonio o las normales al plano basal (dirección  $\langle c \rangle$ ) hasta alcanzar orientaciones de 25°-35° alrededor de la dirección radial del tubo pero contenidos mayoritariamente en el plano radial-circunferencial. Si  $Q < 1$  la reducción en diámetro es dominante. En este caso las fuerzas compresivas predominan en la dirección circunferencial y los mecanismos de deformación tienden a rotar los prismas hacia la dirección circunferencial del tubo. Si  $Q \approx 1$  los polos  $\langle c \rangle$  tienden a distribuirse en todo el plano radial-tangencial (textura de fibra). Sea cual fuere el caso, estas reorientaciones del polo  $\langle c \rangle$  en el plano radial-tangencial son muy débilmente afectadas por tratamientos térmicos usados para relevar de tensiones en el material (400-500°C) o bien recristalizarlo (600-700°C), con lo cual, la textura de deformación puede controlarse definiendo convenientemente  $Q$  en cada etapa de laminación.

Los tubos TREX tienen textura circunferencial (polo  $\langle c \rangle$  circunferencial) producto de la relación de

extrusión con que se obtienen. El proceso final implica una sucesión de pasos de laminación en frío separados por tratamientos térmicos de recristalización<sup>[10]</sup> completa o parcial (el final) hasta alcanzar las dimensiones y propiedades requeridas en la especificación técnica.

#### ■ LA IMPORTANCIA DEL CONTROL DEL FACTOR Q EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN

Las propiedades mecánicas de la vaina se van degradando debido a las severas condiciones ambientales de operación en el reactor y los procesos asociados a la corrosión juegan un rol importante en ello. La alta temperatura generada por la fisión del uranio y el contacto de la superficie externa de la vaina con el agua refrigerante que extrae el calor favorece la corrosión, siendo sus productos óxido de circonio e hidrógeno. Parte del hidrógeno generado por la oxidación ingresa al metal para formar precipitados de hidruro de circonio, fase frágil que deteriora sus propiedades mecánicas. Este proceso no se puede evitar pero,

dada la morfología de tipo plaqueta de estos precipitados, la solución tecnológica que se ha encontrado es lograr que las plaquetas precipiten en la vaina en la dirección circunferencial de la misma en lugar de en la dirección radial, dado que en este último caso una plaqueta podría favorecer la propagación radial de una fisura a través del espesor la vaina presurizada<sup>5</sup>. Debido a que la orientación de las plaquetas queda determinada por la dirección de las tensiones internas del material, los valores del factor  $Q$  determinan además la orientación de los hidruros: un valor de  $Q$  en el que preponderen las deformaciones de compresión de la pared del tubo ( $Q > 1$ ) favorecerá la precipitación de hidruros circunferenciales (2<sup>do</sup> Informe Combustible CAREM). Este es otro de los motivos por los que se requiere controlar el factor  $Q$ , lo que lo convierte en un importante parámetro de diseño.

En la descripción previa se ha planteado inicialmente el enfoque cristalográfico (atomístico) que permite predecir el comportamiento general de la microestructura del

TREX durante el proceso de laminación. Por otra parte, la descripción tecnológica a través de Q permite controlar el desarrollo de la textura y de la orientación de los hidruros a través del modo en que se realizan los cambios dimensionales. La distancia que existe entre la descripción cristalográfica de lo que ocurre en cada cristalito individual del policristal y la descripción tecnológica debe ser cubierta con el uso de técnicas experimentales precisas que den cuenta de la evolución local de propiedades como la textura, las tensiones internas generadas al material, la creación de defectos cristalinos (alteraciones en el ordenamiento atómico) producto de la deformación plástica (dislocaciones<sup>[11]</sup>) y un modelo teórico que se alimente con estos datos experimentales y lo describa cuantitativamente. En este contexto, el presente trabajo está orientado a mostrar resultados de los trabajos experimentales que se realizan para alcanzar una descripción acabada de la evolución de la microestructura durante los procesos de conformación plástica.

## ■ MATERIALES

## ■ EVOLUCIÓN DE LA MICROESTRUCTURA

El material analizado corresponde a un TREX de Zircaloy-4 de tres proveedores internacionales. Estos tubos se obtienen a través de procesos similares, sin embargo, luego de la extrusión son laminados en frío en porcentajes diferentes y debido a eso también difieren sus dimensiones finales, Tabla 1.

Las vainas se fabrican normalmente en tres etapas de laminación en frío. El esquema de la Figura 4.b) muestra la primera de ellas, en la que se describe la denominada zona de trabajo. A lo largo de esta zona la deformación de diámetro y espesor produce un 80% de reducción de la sección axial del tubo en solo 40 cm de longitud. Aquí las reducciones de diámetro y de espesor son significativas y comparables en magnitud. En la Figura 5 se esquematizan la for-

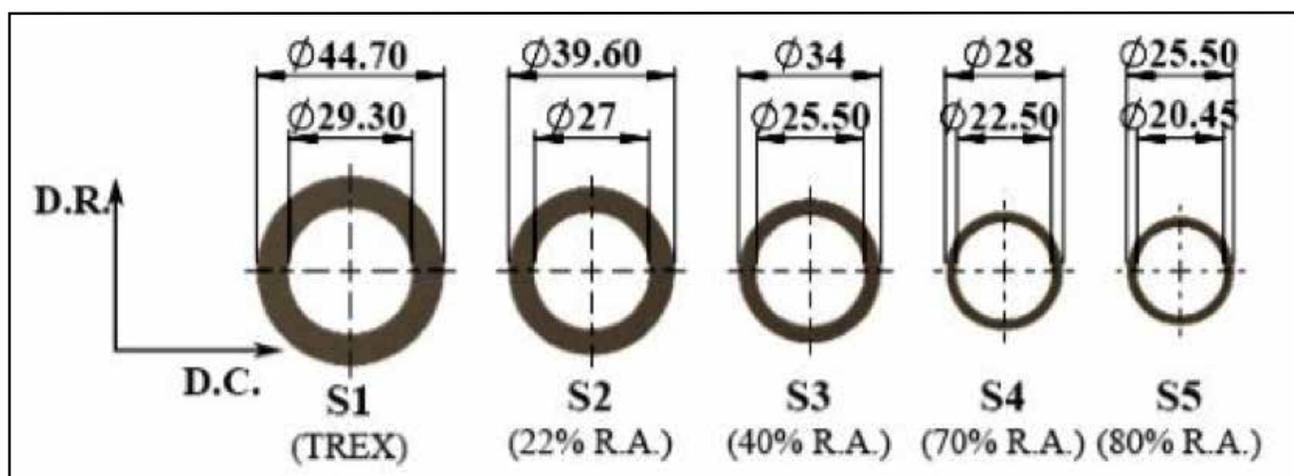
ma, dimensiones y posiciones de las muestras tomadas para realizar estudios microestructurales.

La microestructura del TREX es de recristalización completa, de manera que sus propiedades mecánicas y microestructura quedan definidas por un tratamiento térmico final de recristalización. Dado que no hay una única ruta de fabricación para satisfacer las especificaciones técnicas del TREX, la temperatura y la duración de ese tratamiento térmico las define el fabricante. Éste normalmente dura de 2 a 4 horas y se realiza a temperaturas entre 550 y 700°C. La microestructura se observa en las metalografías de la Figura 6.

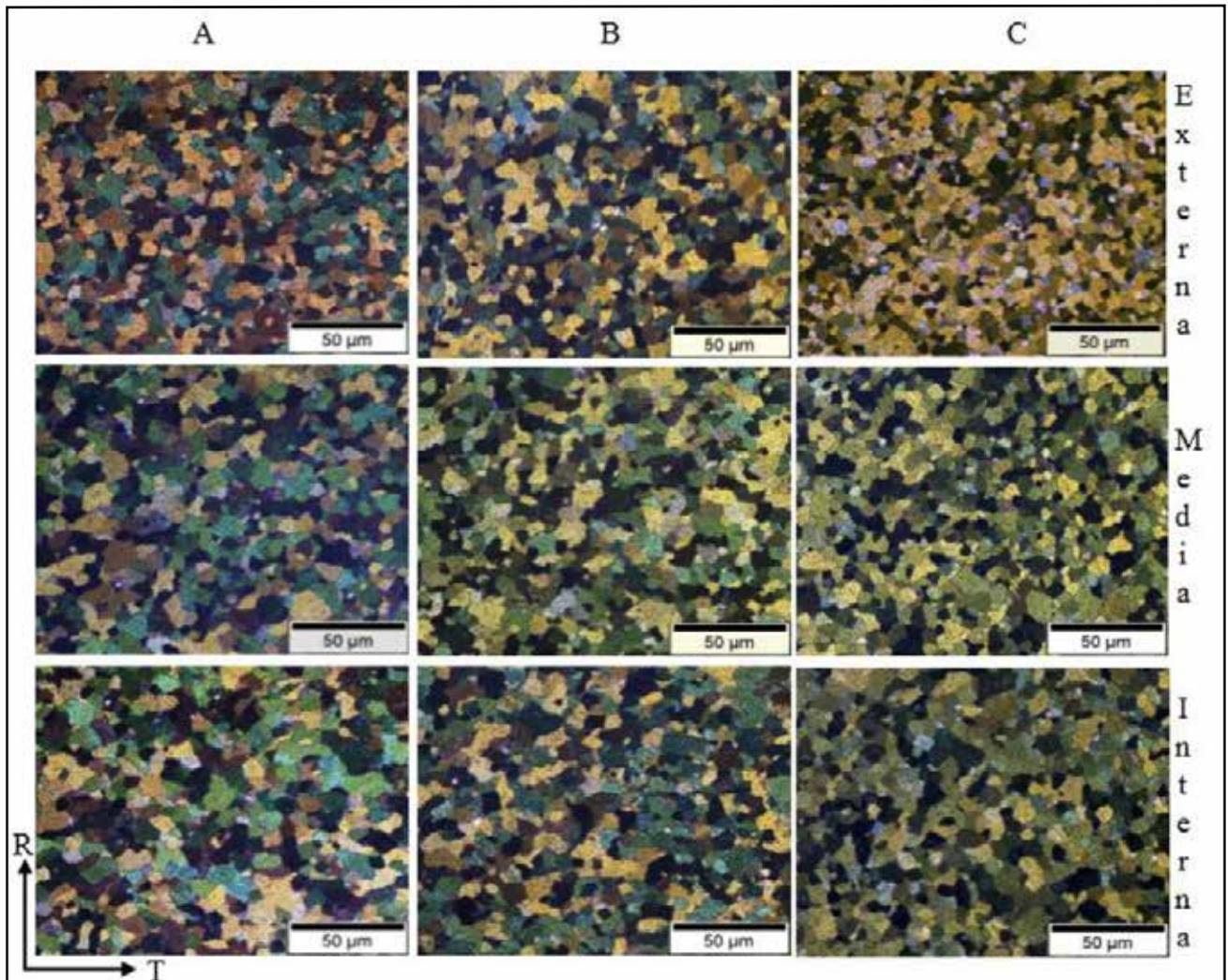
Se han realizado metalografías en tres zonas del espesor de cada tubo (interna, media y externa) y las microestructuras corresponden a la cara normal a la dirección axial (sección axial). Cualitativamente son idénticas y no se observan diferencias significativas en el tama-

**Tabla 1.** Espesores y diámetro de los tubos TREX.

Tubo	A	B	C
e (mm)	7,0	6,5	6,5
$\phi$ (mm)	44,7	50,5	50,5



**Figura 5.** Forma y dimensiones de las muestras y reducciones de área en cada caso.



**Figura 6.** Micrográficas de la sección axial de los tubos A, B, y C. Se presenta en cada columna la microestructura de cada tubo y en cada fila las posiciones en la dirección radial (espesor del tubo) donde fueron obtenidas. Los materiales están completamente recristalizados.

ño de grano. Los valores obtenidos (norma ASTM E112) confirman esto tanto para la superficie axial como para la tangencial normal, Tablas 2 y 3 respectivamente. Las diferencias manifiestan una tendencia al refinamiento de grano desde la superficie interna a la externa pero son pequeñas y se encuentran dentro de la dispersión esperada.

Conforme el proceso avanza se observan sus efectos sobre el material. En la Figura 7.a) se observa la microestructura S2 con 22% de reducción de área (Figura 5). Los granos se ven levemente deformados

y aparecen maclas de deformación<sup>[12]</sup>, un mecanismo económico energéticamente que se activa para bajas deformaciones en las estructuras compactas como la de la fase a-Zr (~2% a 3%). La Figura 7.b) muestra la microestructura de S4, altamente deformada (70%), donde los bordes de granos son difíciles de identificar. Finalmente en 7.c) se observa la microestructura de la muestra S5 (80%) ya recristalizada (2 horas a 650°C).

#### ■ PROPIEDADES MECÁNICAS

Los ensayos de dureza son un medio sencillo y rápido para seguir

la evolución de la resistencia mecánica a lo largo de un proceso de deformación plástica. La pureza del Zircaloy-4 (calidad nuclear), el hecho de ser monofásico y de un tamaño de grano pequeño hace conveniente el uso de la microdureza, técnica que provee una medida muy localizada de la propiedad. En este trabajo se determinó la microdureza Vickers con un instrumento Shimadzu en acuerdo con la norma ASTM E-384. La impronta abarcara varios granos y permite obtener una medida localizada pero representativa del volumen. Se realizaron cinco determinaciones en cada posición y

**Tabla 2.** *Tamaño de grano en la sección axial.*

Posición	A			B			C		
	TG ( $\mu\text{m}$ )	N° ASTM	Desvío Estándar	TG ( $\mu\text{m}$ )	N° ASTM	Desvío Estándar	TG ( $\mu\text{m}$ )	N° ASTM	Desvío Estándar
Interna	5,87	12,0	0,79	7,43	11,0	1,18	6,70	11,5	0,93
Media	5,53	12,0	0,91	6,70	11,5	0,92	6,40	11,5	0,85
externa	5,13	12,5	0,93	6,10	12,0	1,06	5,67	12,0	0,91

**Tabla 3.** *Tamaño de grano en la sección tangencial.*

	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Dispersión	Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Dispersión
<b>Zona externa (puntos de medida)</b>				
1	4	1,3	14,7	5,5
2	4,6	1	21,8	4,6
3	4,8	1,6	20,2	10,1
Promedio	4,5	1,3	18,9	6,7
<b>Zona media</b>				
1	3,7	1,3	11	4,2
2	5,1	1,7	23,6	9
3	4,2	0,9	16,8	3,6
4	4	1,4	14,6	6,6
5	4,2	1,2	16,6	5,2
6	5,9	2,1	30,6	15,3
Promedio	4,5	1,4	18,9	7,3
<b>Zona interna</b>				
1	5,8	1,9	31,2	11,3
2	4,9	1,3	21	5,6
3	6,4	2,5	36,9	17,9
Promedio	5,7	1,9	29,7	11,6
Promedio general	4,9	1,5	22,5	8,6

los resultados obtenidos en las secciones axial y tangencial del tubo TREX se observan en los gráficos de la Figura 8.

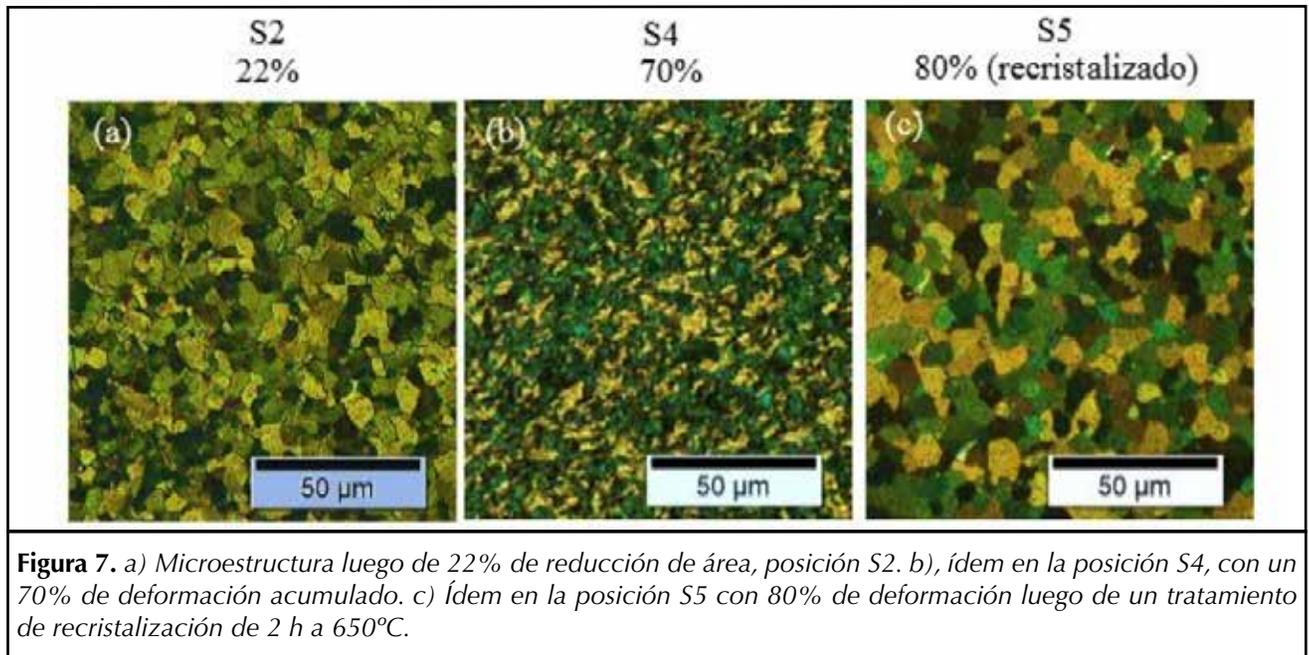
Las mediciones muestran una dispersión baja (~3%). En la superficie axial, la mayor diferencia se observa entre los materiales B y C y es de ~13 HV en promedio. Esta crece a ~16 HV en la tangencial, siendo el tubo B el más duro. Además se observan tendencias. En la superficie axial estas son algo erráticas y el material parece ablandarse

de adentro hacia afuera, contrariamente a lo que se espera con el leve refinamiento que se observa en el tamaño de grano (Tabla 2), mientras que en la tangencial la tendencia es opuesta, el endurecimiento crece de adentro hacia afuera y con una variación máxima de ~35 HV, en este caso de acuerdo a lo esperado con la tendencia de refinamiento de grano observada también de adentro hacia afuera en la Tabla 3.

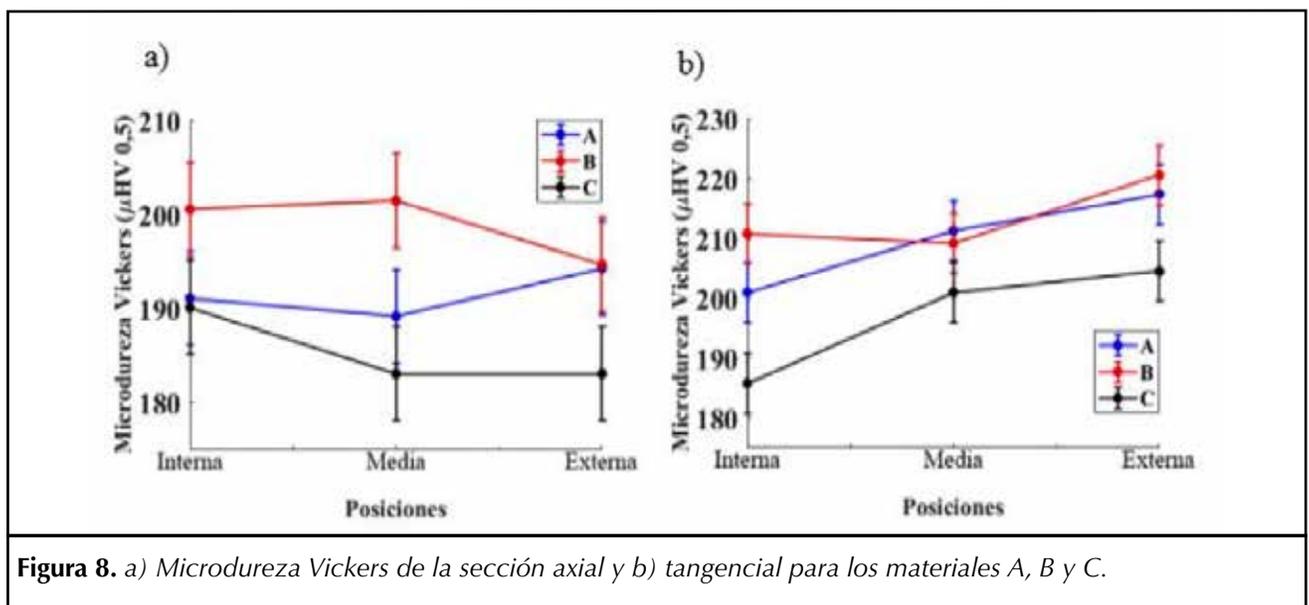
Este análisis muestra que los tres materiales difieren en su dureza en

promedio y si debemos concluir algo, estas técnicas indican que existen inhomogeneidades en los productos de los tres proveedores y que además, aun con cierta ambigüedad en los resultados, se observa un gradiente de endurecimiento a través del espesor de la pared del tubo.

Volviendo a la evolución de la microestructura con la deformación, las variaciones microestructurales que ponen en evidencia las metalografías de la Figura 7 se ven clara-



**Figura 7.** a) Microestructura luego de 22% de reducción de área, posición S2. b), ídem en la posición S4, con un 70% de deformación acumulado. c) Ídem en la posición S5 con 80% de deformación luego de un tratamiento de recrystalización de 2 h a 650°C.



**Figura 8.** a) Microdureza Vickers de la sección axial y b) tangencial para los materiales A, B y C.

mente reflejadas en las variaciones en el tamaño de grano y la microdureza a lo largo del perfil de deformaciones, Figura 9 a) y b). Las diferencias en el tamaño de grano entre S1 (0%, TREX) y S4 (70%) superan el 40%, este se recupera luego de la recrystalización (S5). La microdureza tiene un comportamiento muy similar entre S1 y S4, mostrando un incremento superior al 30% respecto del TREX (S1).

Como síntesis podemos concluir que estas técnicas clásicas de la metalurgia son aptas para caracterizar un proceso de deformación plástica y por ello son de uso habitual en el control de los mismos. También resulta claro que se encuentran en el límite de su resolución cuando se trata de analizar pequeñas variaciones de la propiedad, como ocurre con la comparación realizada entre los tubos materia prima A, B y C.

Sin embargo, subyace a estos resultados que ambas técnicas, por su naturaleza fenomenológica solo pueden medir cambios relativos de la propiedad eventualmente comparables a una referencia, es decir, no pueden explicar las causas físicas del endurecimiento. Por el mismo motivo no pueden explicarse las causas de las diferencias observadas entre los tubos A, B y C, ya que los materiales tratados térmicamente han llegado al equilibrio y todo vestigio de

la deformación de procesos previos ha desaparecido. Las técnicas sustentadas en el método fenomenológico asumen que el material es un sólido continuo e isotrópico cuyo diferencial de volumen será a lo sumo un orden de magnitud mayor que el de un grano del material ( $\sim 5 \times 5 \times 5 \mu\text{m}^3$ ). Debido a esto no pueden dar información acerca de su estructura cristalina, de su anisotropía ni tampoco de la anisotropía generada en el propio proceso de deformación. Algo similar ocurre con las dislocaciones. Esto es intrínseco al método ya que no considera la naturaleza atómica del material.

### ■ LAS TÉCNICAS BASADAS EN EL FENÓMENO DE DIFRACCIÓN

Desde el descubrimiento de la difracción de los rayos X en 1912 por M. von Laue y W. Bragg y la verificación de la estructura cristalina de buena parte de los sólidos, las técnicas de difracción se han aplicado a la resolución de sus estructuras (Cristalografía) y a la caracterización de sustancias cristalinas en química, biología, farmacología y por supuesto en metalurgia (hoy Ciencias de los Materiales). Su aplicación a

la metalurgia inicia hace más de 70 años pero tuvo un fuerte impulso a comienzos de los años 60'. Por otra parte en la década del 50' las técnicas de difracción de electrones hicieron su aparición con el desarrollo del primer microscopio electrónico. Posteriormente, con los primeros reactores de investigación, en los 70' comienza a utilizarse la técnica de difracción de neutrones. Finalmente desde los 90' la utilización y el desarrollo de aceleradores (Sincrotrones) como potentes fuentes de rayos X de gran intensidad, monocromaticidad y en algunos casos, de alta energía (rayos X duros), vinieron a completar el vasto espectro de técnicas basadas en el fenómeno de difracción de que se dispone actualmente.

De las técnicas de difracción, la de rayos X es la más utilizada debido a la gran versatilidad de los instrumentos, bajo costo relativo y alta resolución. No obstante si se requiere un análisis en una escala volumétrica representativa del sólido macroscópico (mesoscópica<sup>[13]</sup>) sin perder de vista la naturaleza atómica del sólido, un objetivo básico en las aplicaciones tecnológicas, entonces la difracción de rayos X y

la difracción de neutrones tienen un lugar de privilegio, pues permiten relacionar estas escalas dimensionales que difieren en varios órdenes de magnitud.

### ■ DETERMINACIÓN DE TEXTURA CRISTALINA

La descripción de la textura se realiza mediante figuras de polos. Una figura de polos es esencialmente un mapa de curvas de nivel de las intensidades difractadas en todo el espacio por alguna familia de planos del policristal. Lógicamente el mapa necesita ser orientado respecto de un sistema de coordenadas relevante para vincularlo a la geometría del objeto en estudio. Por razones de simetría relacionadas con la capacidad del cerebro humano de reconocerlas, el sistema de ejes principales del cuerpo (Figura 10) es fuera de toda duda el más conveniente para realizar estas representaciones.

Se obtuvieron figuras de polos de los tres tubos A, B y C. Dado que se conoce por la especificación técnica que la textura de estos tubos es circunferencial (el eje de los prismas hexagonales está orientado en la di-

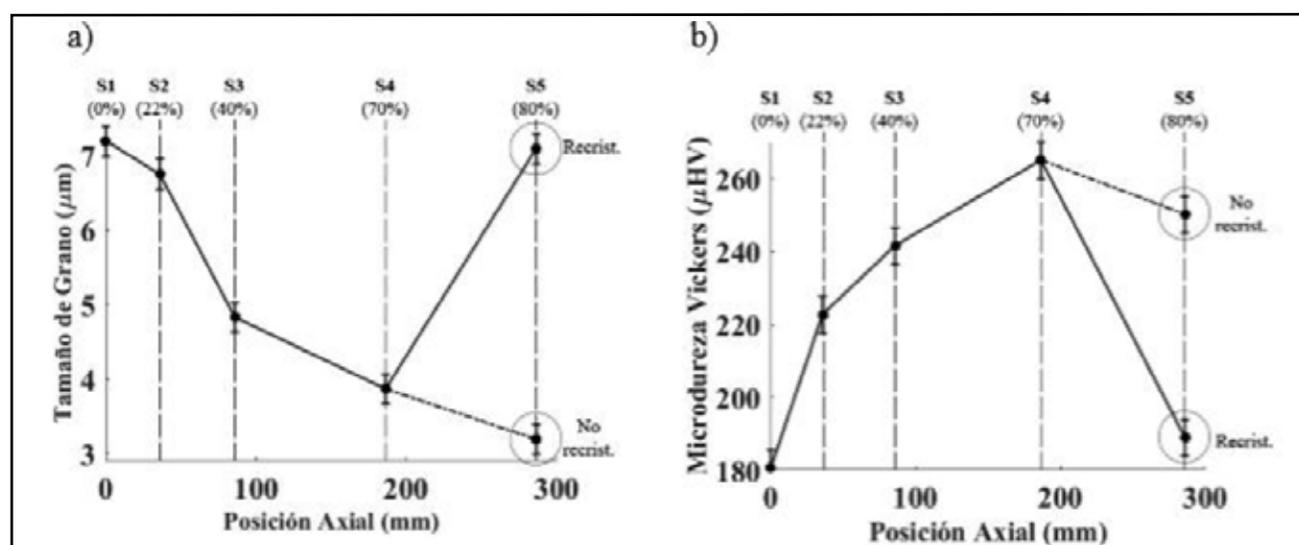
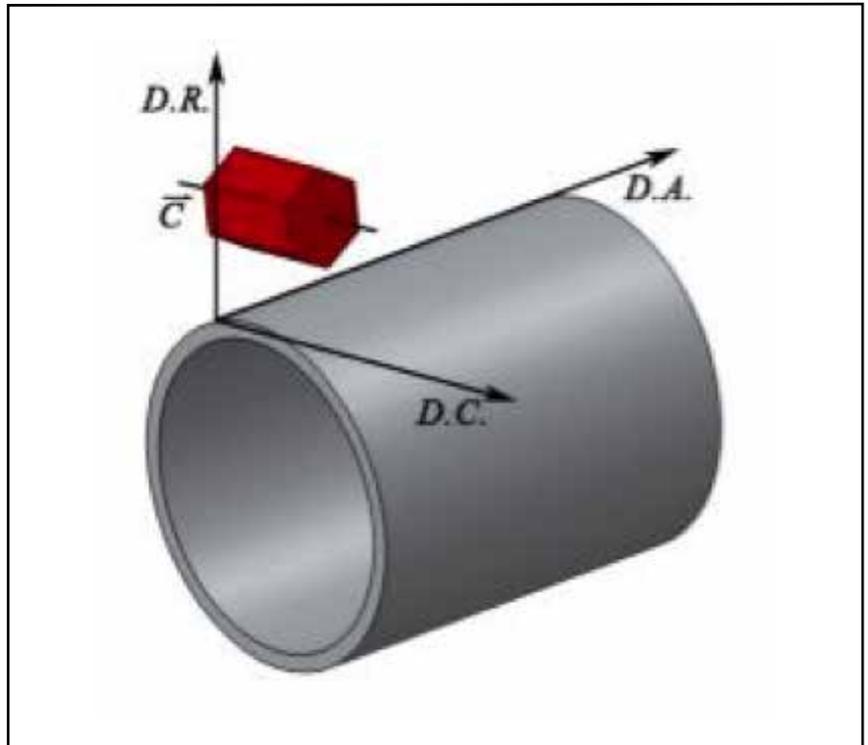


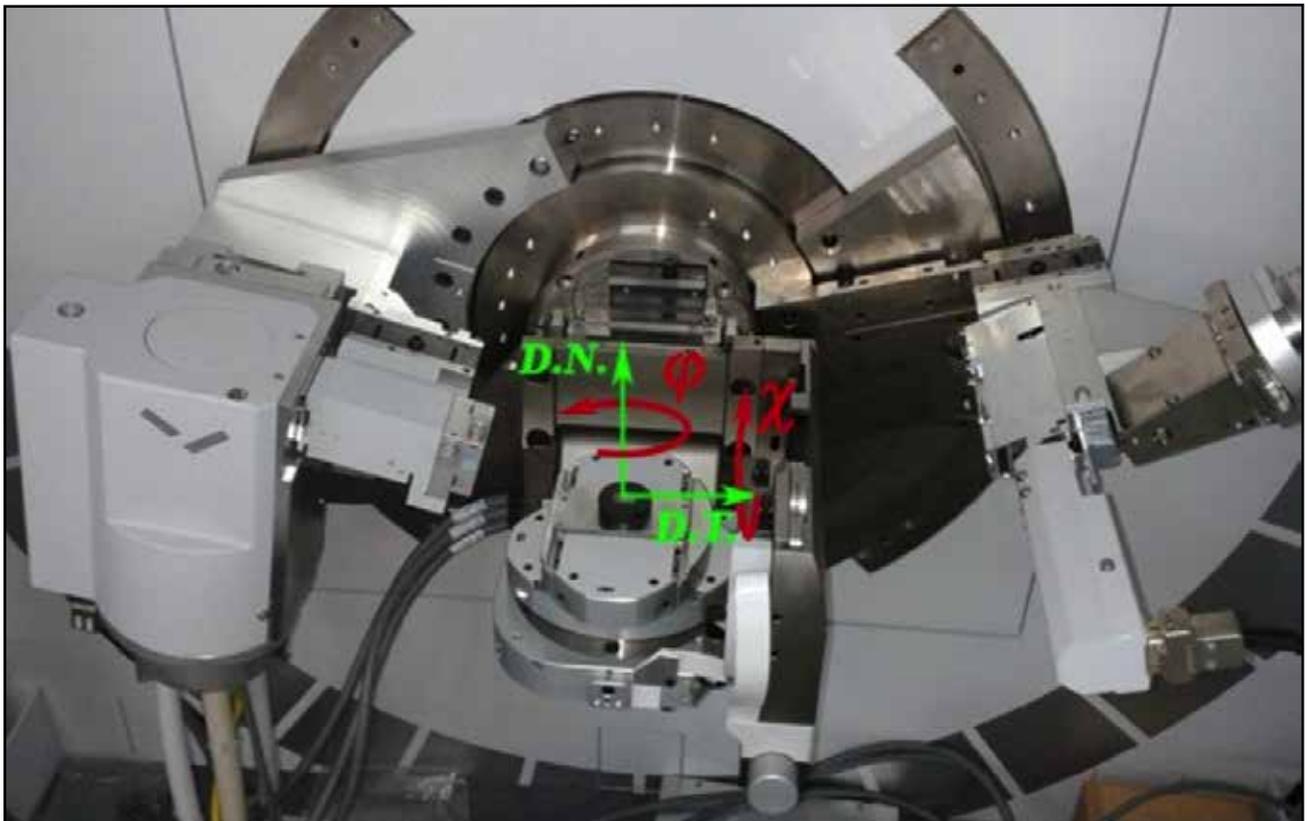
Figura 9. a) El tamaño de grano se reduce fuertemente a lo largo del perfil de deformación y se recupera en el extremo (S5) luego de la recristalización. b) Endurecimiento del perfil del material con la deformación.

rección circunferencial, DC), Figura 10, las orientaciones que contienen mayor información de la microestructura para este tipo de textura son las caras tangencial (plano DR-DA, ya que mayoritariamente el polo basal es perpendicular a la sección tangencial del tubo) y axial (plano DR-DC, ya que mayoritariamente los polos prismáticos son perpendiculares a la sección axial).

Las figuras se obtuvieron con tres técnicas basadas en la difracción: difracción de rayos X en un difractor de laboratorio modelo Empréan (LMFAE, DTC, CNEA), difracción de electrones retrodispersados, EBSD, de los laboratorios LMFAE y del laboratorio de microscopía del Departamento de Materiales de la Universidad Eötvös Lorand (Budapest, Hungría) y difracción de neutrones utilizando los instrumentos Stress-Spect del FMR-II (Múnich,



**Figura 10.** Esquema de un tubo TREX, ejes principales. El prisma hexagonal en dirección tangencial describe la orientación de la componente de la textura más importante en esta microestructura.



**Figura 11.** Geometría de difracción en el instrumento Empréan. Se observa la muestra sobre una cuna de Euler y las zonas de incidencia (der.) y recepción (izq.), direcciones normal (D.N.) y transversal (D. T.) a la muestra.

Alemania) y Kowari de ANSTO (Sidney, Australia).

### ■ DIFRACCIÓN DE RAYOS X (LMFAE)

Las figuras de polos se obtuvieron de dos muestras cortadas de manera que la superficie irradiada sean las secciones axial y tangencial del TREX. Las muestras fueron incluidas en bakelita, pulidas mecánicamente con papel de SiC y luego atacadas electroquímicamente en una solución de etanol (10%) y ácido perclórico (90%) para eliminar deformación superficial del pulido.

Como se observa en la Figura 11, el instrumento tiene geometría de reflexión. Para medir textura se utiliza un haz puntual, la muestra se coloca en una cuna de Euler de 5 grados de libertad. En la zona de incidencia (der. Figura 11) se ubica una lente concentradora policapilar de 1mm x 1mm y en la zona de recepción (izq. Figura 11) una rendija de 3 mm, utilizándose una máscara de 20 mm. Se realizaron barridos en  $\chi$  entre 0° y 70° y en  $\phi$  entre 0° y 360° con un paso de 5° y un tiempo de 10 segundos por paso. La radiación X en este caso proviene de un

tubo de cobre ( $\lambda=1,5045 \text{ \AA}$ ).

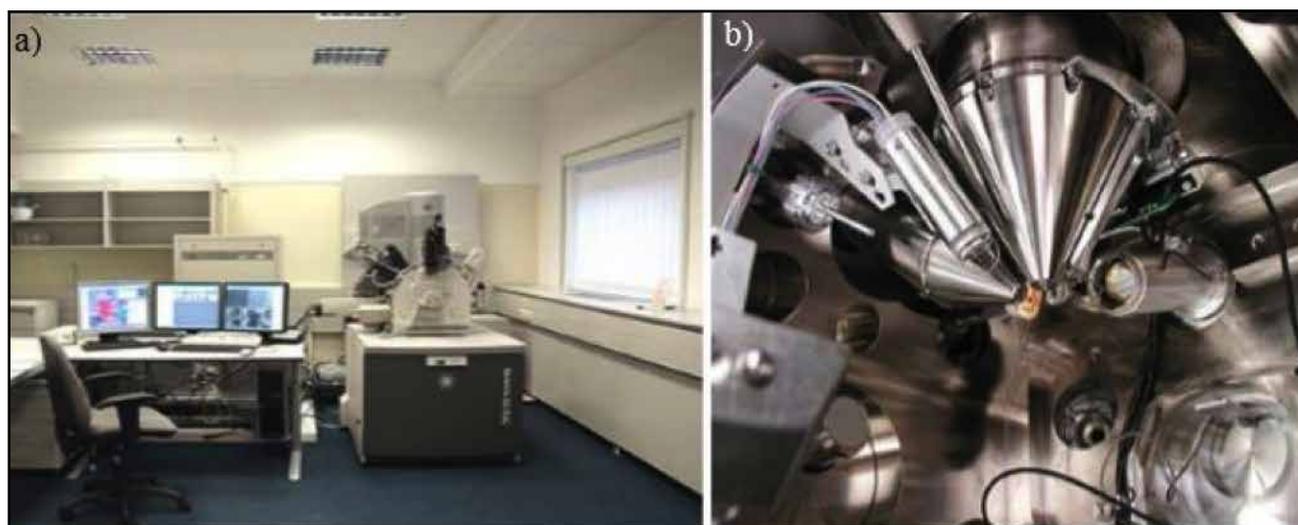
### ■ DIFRACCIÓN POR ELECTRONES RETRODISPERSADOS, EBSD (EÖTVOS Y LMFAE)

Se estudiaron dos muestras de la sección axial del TREX A. El procedimiento de preparación de muestras consiste en un pulido mecánico con papeles de SiC de granulometría decreciente desde 600 a 4000 grit, continuando con pasta de diamante (1 $\mu\text{m}$ , y 0,3 $\mu\text{m}$ ) y finalizando con sílica coloidal (0,05 $\mu\text{m}$ , y 0,02 $\mu\text{m}$ ). A posteriori se realiza un electro-pulido con una solución de 70% etanol, 20% ácido perclórico y 10% glicerina aplicando una tensión de 25V y corriente de alrededor de 1,4 Amp.

El instrumento utilizado es el 3D Dual Beam Scanning Electron Microscope de FEI, Figura 12. Las mediciones fueron realizadas con el software TSL OIM Data Collection 5 y los datos fueron procesados con el software TSL OIM Analysis 5 de FEI. Para cada muestra se realizaron mapas de orientación en las zonas interna, media y externa del espesor del tubo. Cada mapa de orientaciones se procesó realizando mapas de calidad, de granos y de misorientaciones<sup>[14]</sup> de borde de grano. El tamaño de grano se determinó mediante histogramas de diámetro y área de los mismos, ponderados en la fracción de área respectiva. Para determinar la microtextura se construyeron las figuras de polos (0001), (1010), (1120), (1011), y (1012) y se calcularon los factores de textura o de Kearns (proyecciones medias de los polos basales,  $\langle c \rangle$ , sobre los tres ejes principales). Para dar una idea de la potencia de esta técnica, si se considera el total de mapeos de 50 x 50  $\mu\text{m}$  en pasos de 0,15 a 0,5  $\mu\text{m}$  en ambas muestras, se midió en 1378000 posiciones.

■ **DIFRACCIÓN DE NEUTRONES EN LOS INSTRUMENTOS STRESS-SPEC (FMRII) Y KOWARI (ANSTO)**

La gran penetración de los neutrones en la materia determina que en difracción (entre otras técnicas basadas en estas partículas) la geometría de transmisión sea la más utilizada. Esto permite realizar determinaciones de textura y tensiones residuales a grandes componentes, como se ve en el cuello de laminación del TREX en la Figura 13.a), o bien introducir dispositivos de gran porte como una máquina de trac-

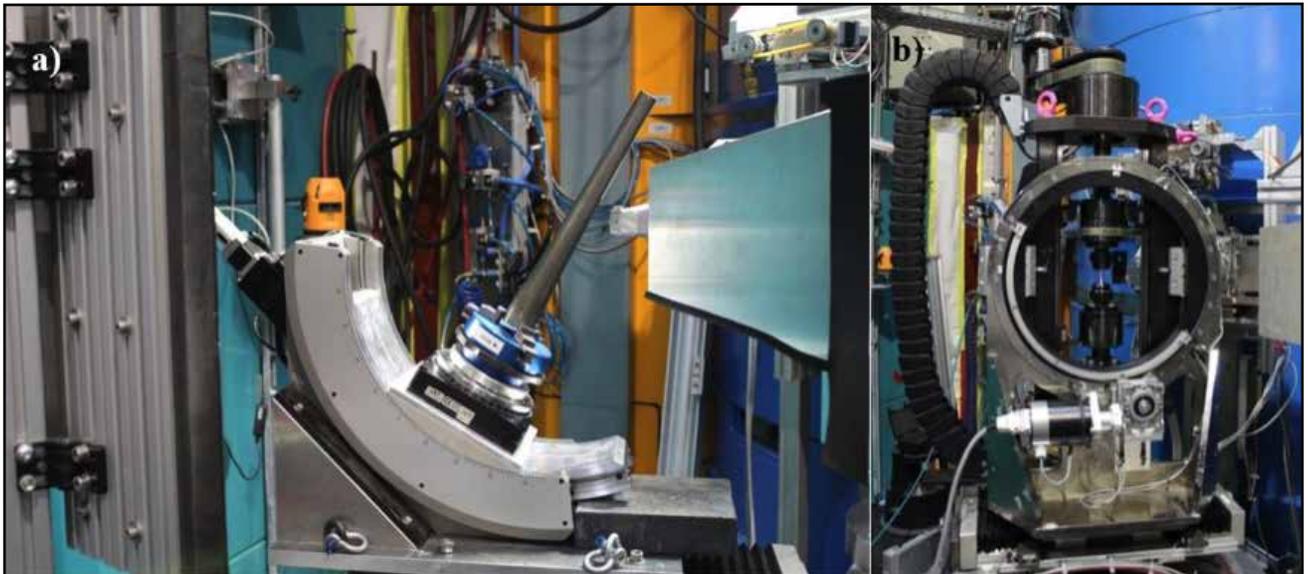


**Figura 12.** a) Instrumento es un 3D Dual Beam Scanning Electron Microscope. b) Cámara de medición.

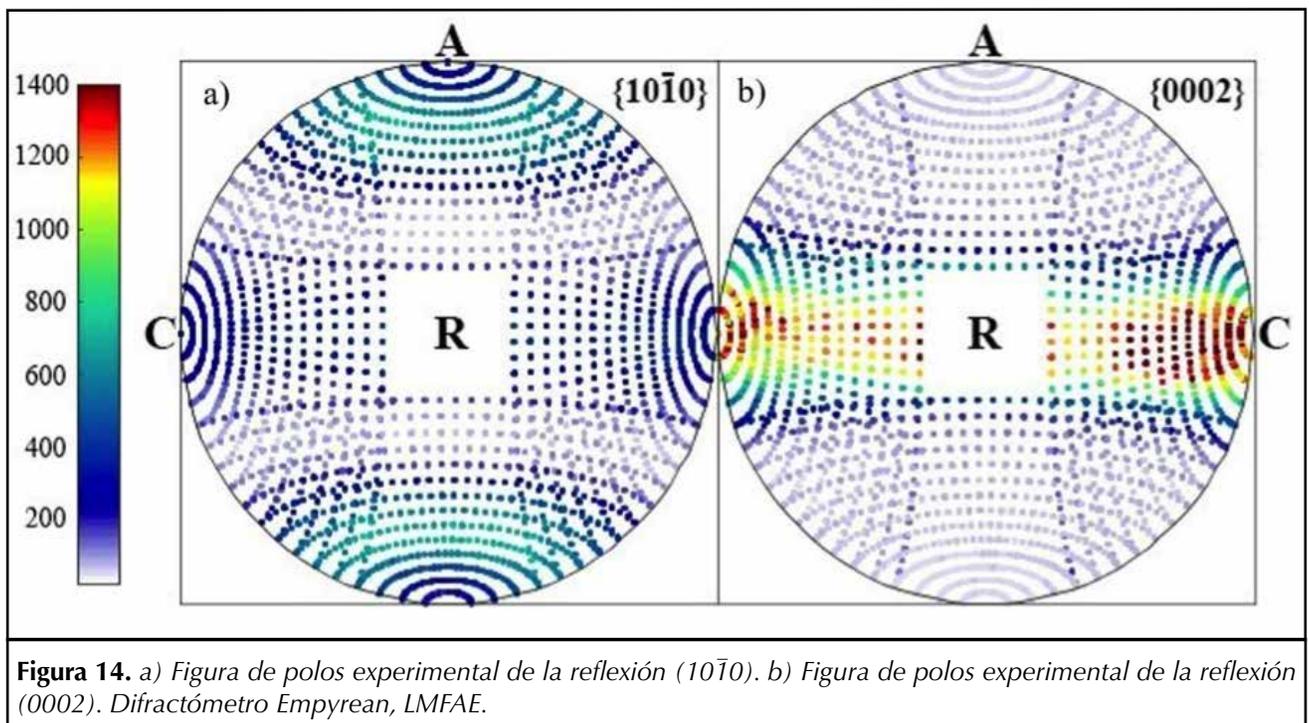
ción para realizar experimentos in situ, Figura 13.b). En difracción de neutrones el volumen calibrado de material se mantiene constante durante el experimento (prisma de 12 mm<sup>3</sup> en el caso de Stress Spec). A consecuencia de ello no se produce el efecto de desenfoco característi-

co de la difracción por reflexión de los difractómetros de rayos X convencionales. Esto permite que además del barrido completo en  $\varphi$  (0° a 360°) el ángulo  $c$  varíe entre 0° y 90°, colectándose así la intensidad difractada en todo el espacio. La disposición experimental es la misma

en ambos instrumentos. Se utilizó una longitud de onda de  $\lambda = 1,60 \text{ \AA}$  sin limitar el haz, los colimadores se mantienen abiertos tanto en la zona de incidencia como en la de recepción. En ambos casos se utilizó un monocromador de Germanio (Ge511) que garantiza la máxima



**Figura 13.** a) Zona de trabajo de deformación de tubo TREX sobre la cuna de Euler del instrumento Stress-Spec para determinación de textura y tensiones residuales. b) Máquina de tracción para determinar constantes elásticas in-situ durante un ensayo de tracción. FRM-II, Garching, Múnich, Alemania.

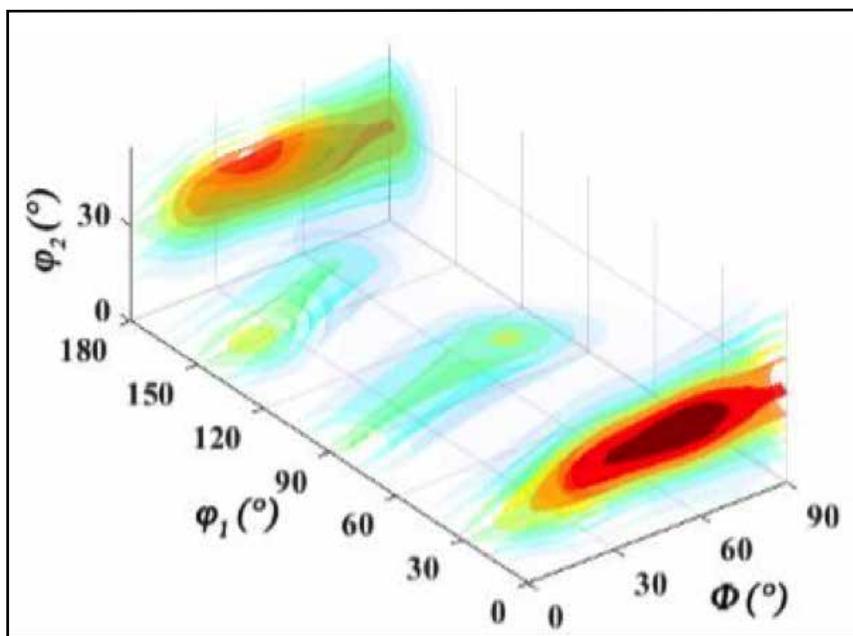


**Figura 14.** a) Figura de polos experimental de la reflexión  $(10\bar{1}0)$ . b) Figura de polos experimental de la reflexión  $(0002)$ . Difractómetro Empeyan, LMFAE.

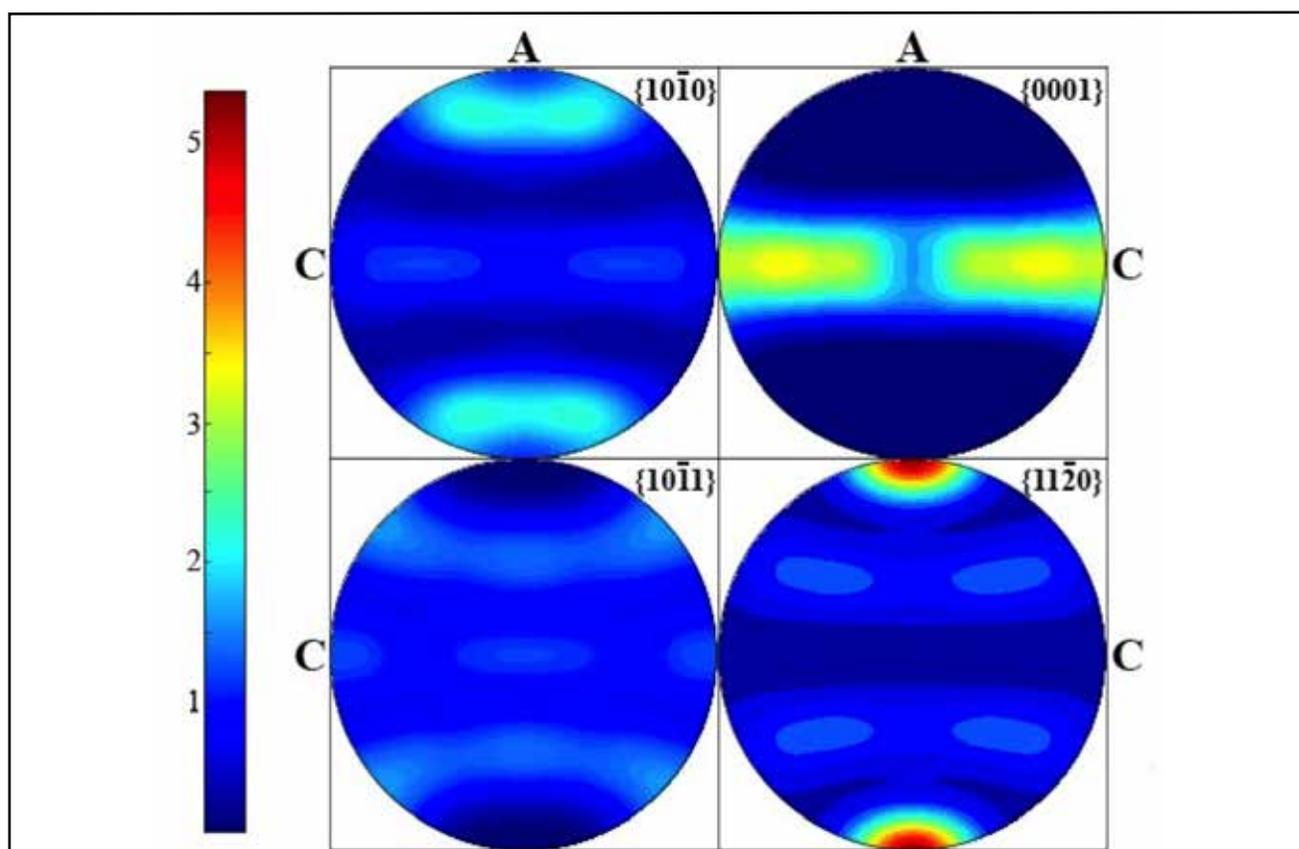
resolución en un ancho intervalo angular ( $35^\circ \leq 2\theta_M \leq 110^\circ$ ). Por otra parte las dimensiones del detector, 25cm x 25cm, permiten medir varias reflexiones de Bragg cercanas en forma simultánea. En cada paso (posición angular  $\chi$  y  $\varphi$  específica) se midió durante 10 minutos.

### ■ RESULTADOS QUE PROVEEN LAS TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN

En la Figura 14.a) y b) se observan las figuras de polos experimentales correspondientes a las reflexiones de las familias de planos  $\{10\bar{1}0\}$  y  $\{0002\}$  obtenidas con instrumento Empyrean en LMFAE. Estas figuras están compuestas por dos figuras obtenidas irradiando las secciones axial y tangencial. Para representar los datos experimentales se ha elegido convencionalmente al eje horizontal coincidente con la direc-



**Figura 15.** Función distribución de orientaciones correspondiente al tubo TREX A. La microestructura presenta una fuerte textura. Se observa un lóbulo de gran intensidad en el los cortes  $\varphi_1 = 0^\circ$  y  $180^\circ$  cuyo máximo se encuentra aproximadamente en  $\varphi_2 = 30^\circ$  y  $\Phi = 60^\circ$ .

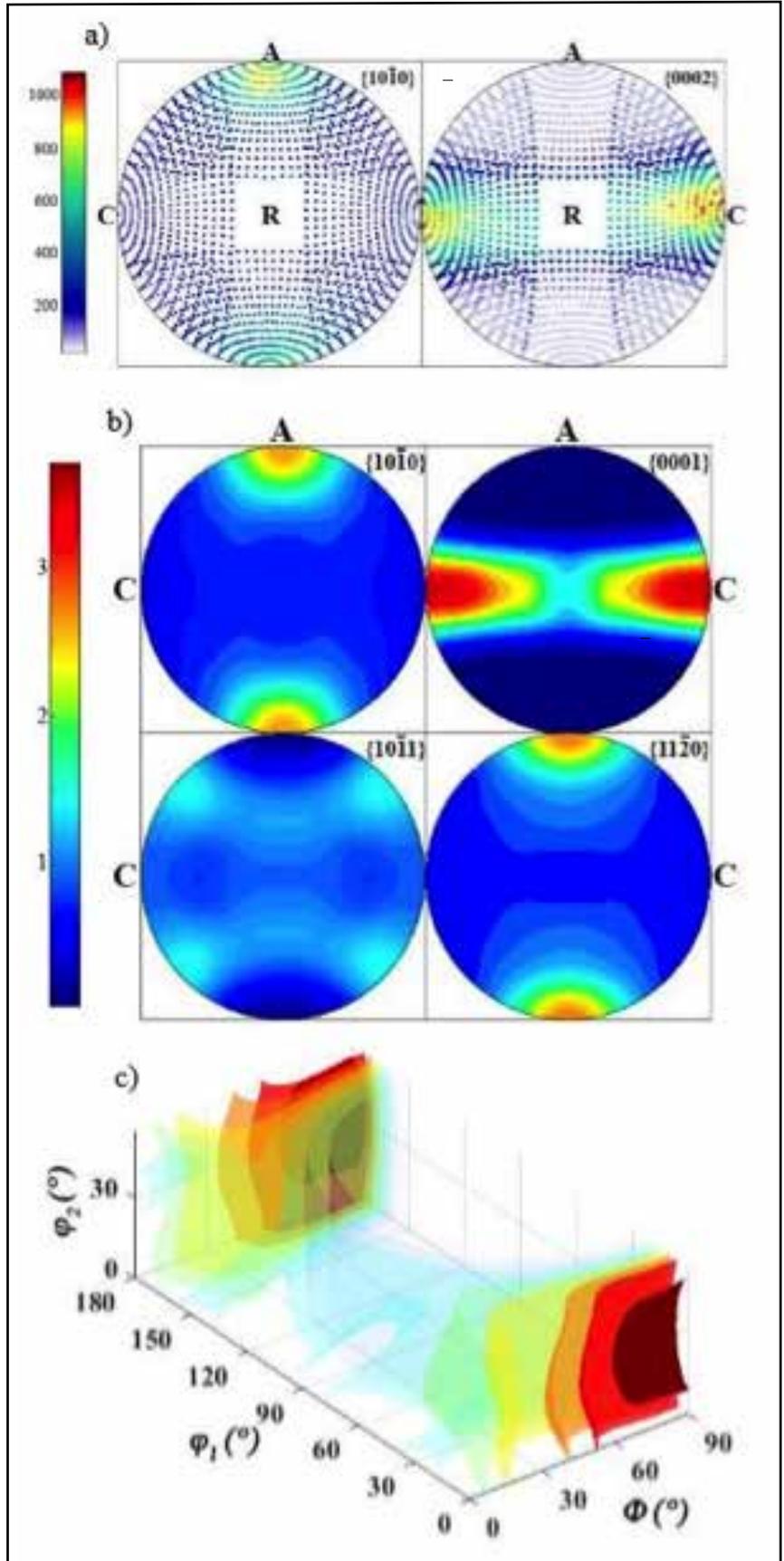


**Figura 16.** Figuras de polos del TREX A calculadas a través de la herramienta MTEX para los planos  $\{10\bar{1}0\}$ ,  $\{0002\}$ ,  $\{1,0\bar{1}1\}$  y  $\{11\bar{2}0\}$ .

ción circunferencial del tubo y al vertical paralelo a la axial, siendo la dirección radial perpendicular al plano de la figura. Para realizar la representación de la figura de polos compuesta es necesario rotar los datos experimentales obtenidos para cada reflexión de modo que todos respeten la convención elegida. Es interesante notar que en ninguna de las dos figuras se ha cubierto todo el espacio (zona central sin datos). En las geometrías de reflexión para ángulos  $\chi$  mayores que  $70^\circ$  entre el vector de difracción y la normal a la muestra el haz difractado disminuye significativamente su intensidad debido al fenómeno de desenfoque (pérdida de radiación distorsión de la proyección del haz sobre la muestra) de manera que estos datos se pierden. No obstante, esto no representa un problema cuando dicha información no es representativa de la orientación preferencial de la microestructura.

De este modo las figuras de polos quedan asociadas al sistema ejes principales del tubo, algo fundamental para visualizar la orientación preferencial de la microestructura. La lectura de los datos experimentales, las rotaciones descritas y finalmente la composición de las mediciones en una figura única para cada reflexión se realiza con programas elaborados bajo la plataforma MatLab™.

La herramienta de cálculo MTEX, que funciona también bajo MatLab™ permite construir a partir de las figuras de polos experimentales, la geometría de la muestra y la estructura cristalina, la función de distribución de orientaciones, ODF. Esta función contiene toda la información de las orientaciones del policristal y representa 15736 orientaciones posibles de un cristal en el espacio. A partir de ella puede calcularse la figura de polos de cualquier familia de planos



**Figura 17.** a) Figuras de polos experimentales compuestas del TREX C para las reflexiones  $(10\bar{1}0)$  y  $(0002)$ ,  $(10\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{2}0)$ . b) ODF. c) Figuras de polos calculadas.

de la estructura cristalina. La Figura 15 presenta la ODF 3D del material A con la que se calcularon las figuras de polos  $(10\bar{1}0)$ ,  $(0002)$ ,  $(10\bar{1}1)$  y  $(11\bar{2}0)$  que se observan en la Figura 16.

La localización de los lóbulos intensos en la dirección axial, en el caso de la reflexión  $(11\bar{2}0)$ , indica la fuerte textura de esta microestructura, la reflexión  $(10\bar{1}0)$  aparece como anillos intensos con máximos a unos  $30^\circ$  de la dirección axial y dos de intensidad menor sobre el plano radial-circunferencial. La rotación de  $30^\circ$  de este lóbulo de intensidad respecto del plano prismático  $(11\bar{2}0)$  se debe a la geometría del prisma hexagonal (las normales a estos planos forman un ángulo de  $30^\circ$ ). Resulta interesante notar que el polo  $(0002)$  se desarrolla sobre una fibra contenida en el plano radial-circunferencial con un máximo más cercano a la dirección circunferencial dentro de la fibra. Los factores de Kearns tienen los valores  $f_1$  (Radial) = 0,445,  $f_2$  (Axial) = 0,082 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,471 indicando la preponderancia de la textura radial-circunferencial en esta microestructura.

Con idéntico procedimiento se determinaron las figuras de polos de las reflexiones  $(10\bar{1}0)$ , y  $(0002)$  en el material C. Utilizando MTEX y herramientas desarrolladas también en la plataforma MatLab™ se calcularon la ODF y las figuras de polos correspondientes a las reflexiones  $(10\bar{1}0)$ ,  $(11\bar{2}0)$  y  $(0002)$ . Los resultados experimentales, ODF y figuras de polos calculadas para las dos reflexiones prismáticas y la basal se observan en la Figura 17 (Ídem Figura 16).

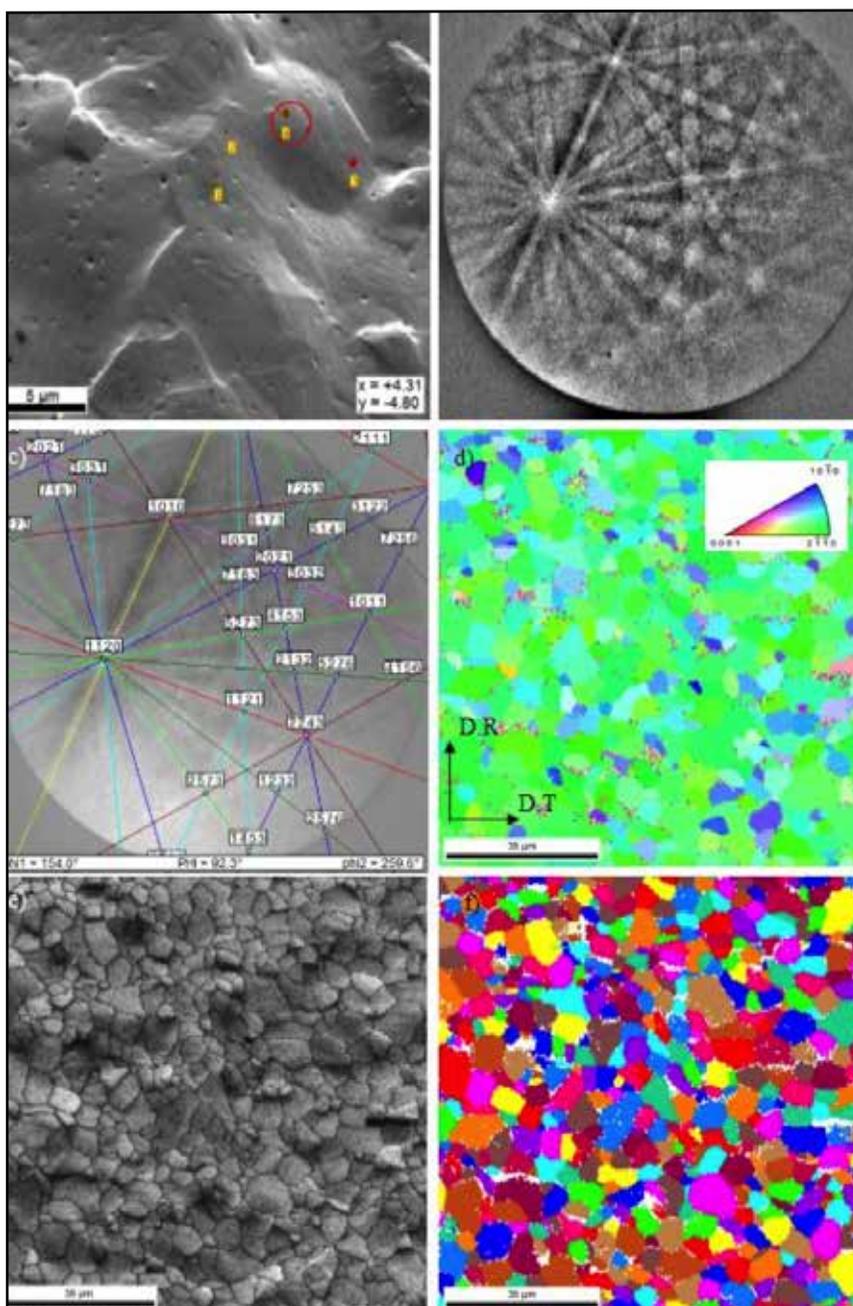
Si bien las ODF de ambos tubos son similares, el lóbulo de máxima intensidad que también se ubica en los cortes  $\varphi_1 = 0^\circ$  y  $180^\circ$  de la ODF

del TREX C muestra una intensidad más expandida en este plano y el máximo más próximo a  $\phi=90^\circ$  ( $\sim 75^\circ$ ). Los factores de Kearns son en este caso  $f_1$  (Radial) = 0,398,  $f_2$  (Axial) = 0,098 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,501. Comparando con los valores de  $f_1$  y  $f_3$  del tubo A se observa en

este caso una textura más circunferencial ( $f_3$  es un 25% mayor que  $f_1$ ).

## ■ DIFRACCIÓN DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS (EBSD)

La Figura 18 resume los resultados obtenidos para una muestra del



**Figura 18.** a) La imagen SEM corresponde a una zona de la sección axial del TREX A con cuatro puntos de observación indicados. b) Patrón de Kikuchi del punto 4. c) Indexación de planos cristalográficos y direcciones en el punto 4 y asignación de orientación en función de ángulos de Euler ( $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ). d) Mapa de orientaciones (datos crudos), direcciones de referencia y figura de polos inversa e) Mapa de calidad. f) Mapa de granos.

TREX A (sección axial): en la 18.a) se identifica un punto de observación (punto 4) al que corresponde el patrón de difracción de Kikuchi, en la 18.b) la indexación de planos y direcciones cristalográficas realizada con el software y la indexación de estas líneas en la 18.c). En 18.d) se observa un mapa de orientaciones completo (100 x100 $\mu$ m) y a modo de referencia la figura de polos inversa, en (18.e) el mapa de calidad y el mapa de granos en (18.f). Se estableció una misorientación mínima de borde de grano de 2°. El ~95% de los bordes de grano corresponden a misorientaciones mayores a 15°.

#### ■ ESTUDIO DE TAMAÑO DE GRANO

El "área" correspondiente a cada

grano se calcula con el número de posiciones de medición en el mapa de orientaciones de cada grano. También puede estudiarse el tamaño de grano mediante su diámetro medio.

Para realizar el estudio estadístico del tamaño de grano se construyeron histogramas utilizando las variables "área" y "diámetro" en las zonas correspondientes a la zona exterior, media e interior de la sección axial del tubo. El histograma brinda la información del tamaño de grano promedio para una serie de 20 intervalos de fracción de área, esto es, la fracción de área que corresponde a una dada cantidad de granos con un área determinada y normalizada respecto de la superficie total del mapa. Luego se cal-

cula un promedio ponderado entre el valor de la variable "diámetro" o "área", multiplicado por la fracción de área para cada intervalo. Se realizó un histograma en función de la fracción de área para cada mapa, se calculó un promedio para los valores obtenidos entre todos los mapas que corresponden a una misma región de la muestra y se realizó un promedio general, Tabla 4. Como resultado se obtiene un tamaño de grano de  $\langle d \rangle = 4,9 \mu\text{m}$  y área  $\langle A \rangle = 22,5 \mu\text{m}^2$ . A su vez, al comparar el tamaño de grano promedio respecto de las zonas exterior, centro e interior vemos que éste es menor en la zona externa y tiende a aumentar hacia la zona interna.

**Tabla 4.** Tamaños de grano calculados partir de variables "diámetro" y "área" de mapas EBSD ponderados por fracción de área para cada mapa. Promedios para cada región de la muestra, promedio general y dispersiones, TREX A.

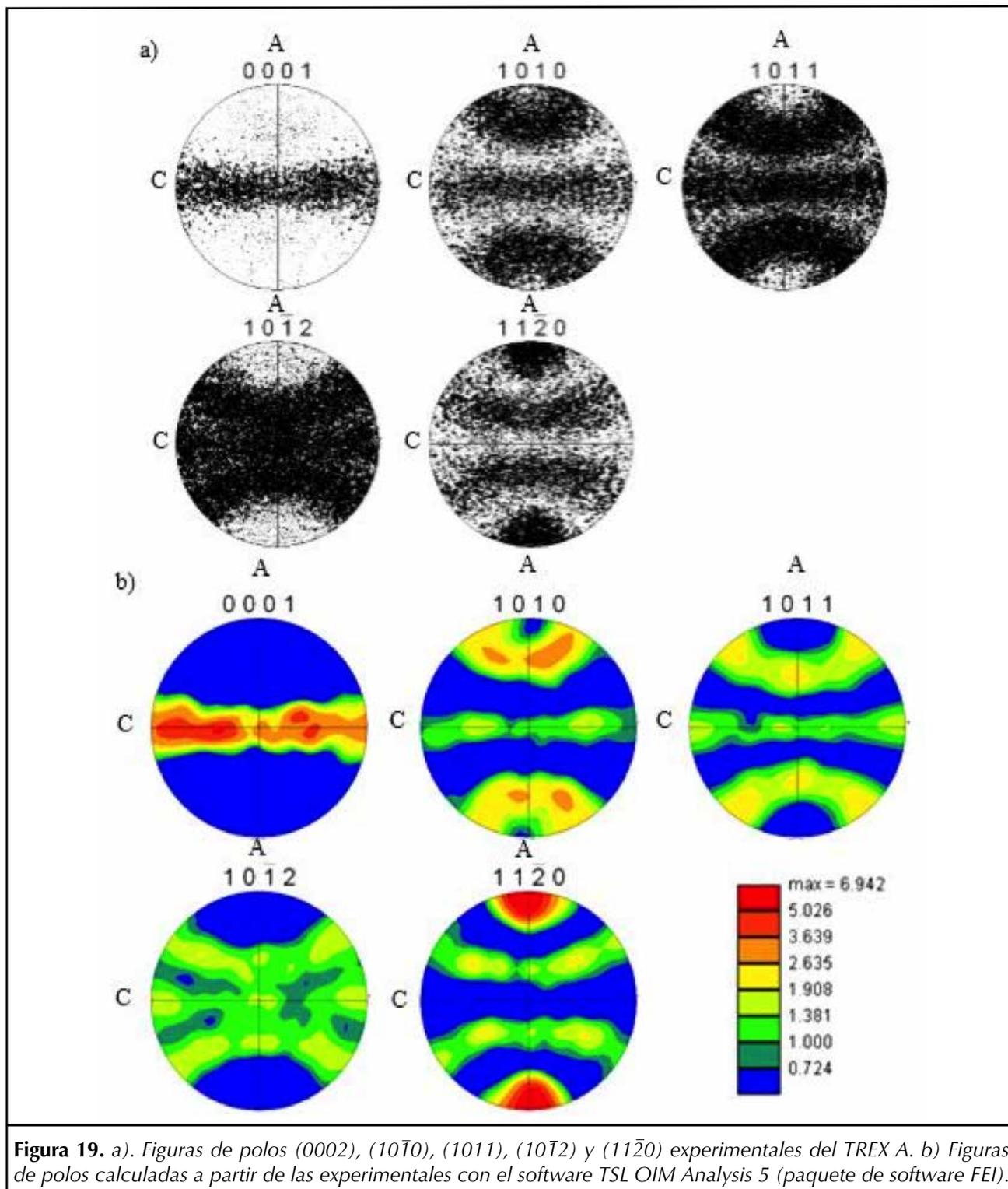
	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Dispersión	Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Dispersión
<b>Zona externa (puntos de medida)</b>				
1	4	1,3	14,7	5,5
2	4,6	1	21,8	4,6
3	4,8	1,6	20,2	10,1
Promedio	4,5	1,3	18,9	6,7
<b>Zona media</b>				
1	3,7	1,3	11	4,2
2	5,1	1,7	23,6	9
3	4,2	0,9	16,8	3,6
4	4	1,4	14,6	6,6
5	4,2	1,2	16,6	5,2
6	5,9	2,1	30,6	15,3
Promedio	4,5	1,4	18,9	7,3
<b>Zona interna</b>				
1	5,8	1,9	31,2	11,3
2	4,9	1,3	21	5,6
3	6,4	2,5	36,9	17,9
Promedio	5,7	1,9	29,7	11,6
Promedio general	4,9	1,5	22,5	8,6

## ■ MICROTEXTURA

La Figura 18.d) permite visualizar la fuerte textura del TREX. Observando la distribución de orientaciones son preponderantes los planos prismáticos con el polo basal en dirección axial mayoritariamente paralelos a la super-

ficie de la muestra (sección axial). En la figura de polos inversa (ángulo superior en 18.d) las orientaciones están representadas con colores del azul al verde. No se observan granos con el polo basal en dirección axial o próximo a esta (rojo). La evaluación microestructural se completó

realizando muchos mapas en las tres zonas anteriormente definidas. En las Figuras 19.a) y b) se observan las figuras de polos construidas a partir de los datos de todos los mapas, sean datos crudos o seleccionados a partir de un criterio de calidad o índice de confianza ( $CI > 0,1$  en este caso). De

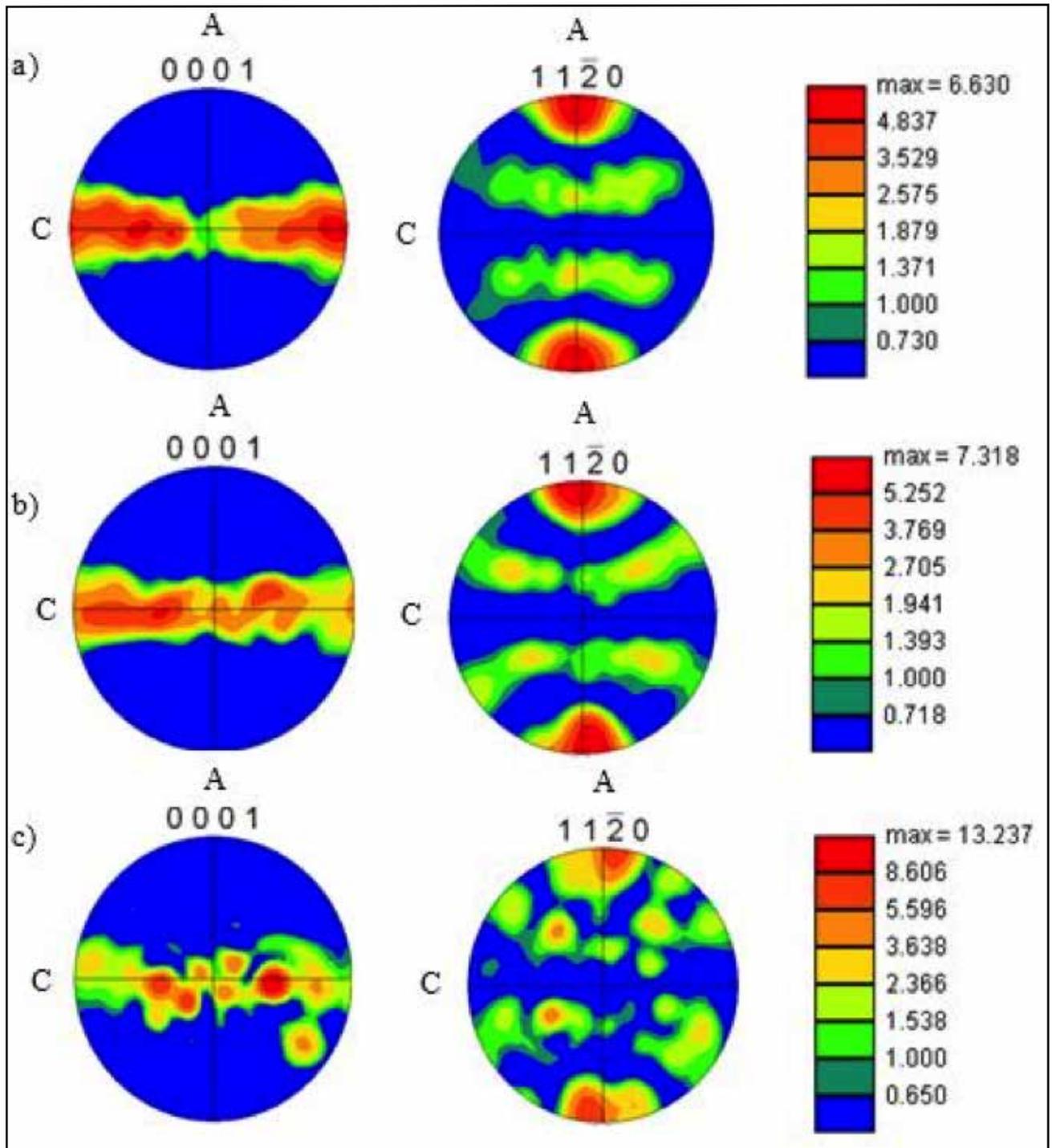


**Figura 19.** a). Figuras de polos (0002),  $(10\bar{1}0)$ ,  $(1011)$ ,  $(10\bar{1}2)$  y  $(11\bar{2}0)$  experimentales del TREX A. b) Figuras de polos calculadas a partir de las experimentales con el software TSL OIM Analysis 5 (paquete de software FEI).

estas figuras observamos la textura circunferencial-radial esperada para el TREX. En particular, en la figura del polo basal se observa el máximo de intensidad sobre una fibra que corre en el plano circunferencial-radial, algo similar a lo que se observa

en las figuras de polos obtenidas por difracción de rayos X para el TREX A, Figura 16. En los planos prismáticos de primer orden y pirámidales de primero y segundo orden la orientación se presenta en forma de fibras también, una característica de

esta microestructura. Es pertinente destacar que la orientación axial del lóbulo de máxima intensidad en el plano prismático de segundo orden coincide con la determinación realizada con difracción de rayos X para el mismo polo en la Figura 16, no



**Figura 20.** a). Figuras de los polos calculadas (1010) y (1120) de la zona externa del espesor del TREX A. b) ídem zona media. c) ídem zona interna.

obstante el mismo polo en el TREX C tiene una distribución de intensidades algo diferente, Figura 17. En síntesis, todas estas observaciones permiten asegurar que el resultado de un conjunto de mapas al azar con la técnica EBSD permiten obtener los valores que produce la difracción de rayos X.

### ■ GRADIENTES DE TEXTURA EN EL ESPESOR DEL TUBO

La técnica EBSD permite realizar mediciones de orientación preferencial en regiones muy localizadas del policristal. Solo para dar una idea, el área irradiada con rayos X para medir textura (haz puntual) es de  $\sim 0,5$  cm<sup>2</sup>, mientras que con la técnica EBSD un área típica tiene  $10^4$   $\mu\text{m}^2$ , es decir, la región irradiada es unas  $\sim 5000$  veces más pequeña. Esta localización afecta la cantidad de granos que definen la figura de polos obtenida, ya que para un tamaño de grano de 5 mm, en un mapa típico de EBSD se están observando unos  $\sim 400$  granos mientras que el área escaneada por la técnica de rayos X incluirá más de un millón de granos de las mismas dimensiones. Debido a esto resulta importante la verificación realizada en el punto anterior. No obstante, el principal objetivo de uso de esta técnica es detectar in-

homogeneidades microestructurales en la forma de tendencias, gradientes y/o dispersiones que puedan ser significativos en el comportamiento macroscópico a lo largo de un proceso de deformación. El resultado de la integración de los datos de las tres regiones (exterior, media e interior) se observan en las figuras basal y prismática de segundo orden en la Figura 20. Observando la basal, la fibra en el plano radial-circunferencial está presente en las tres zonas, sin embargo la posición de los máximos de intensidad varía. En la Figura 20.a) el máximo está muy cerca de la dirección circunferencial, en la 20.b) el máximo se halla en un punto intermedio entre las direcciones radial y circunferencial ( $\sim 45^\circ$ ), mientras que en la 20.c) la textura es cuasi-radial, con el máximo de intensidad ubicado a unos  $25^\circ$ - $30^\circ$  de la dirección radial.

Este análisis cualitativo se ve reflejado en el cálculo de los factores de Kearns en la Tabla 5, en los que se observa una reducción del factor circunferencial de 0,56 a 0,43 (inversamente ocurre con el factor radial) poniendo en evidencia el gradiente de textura de la pared del TREX.

Se ha analizado todo el conjunto de datos (datos crudos) y también se

ha realizado una selección según la calidad de los mismos ( $CI > 0,1$ ). Los primeros tienen la ventaja de tomar en cuenta la totalidad medida del mapa, la segunda, al imponer un límite de confianza al dato obtenido disminuyen la dispersión. Comparando las figuras de polos discretas (datos crudos, Figura 19.a) con las calculadas con los datos seleccionados, se observan efectos de segundo orden como por ejemplo la localización más precisa de los máximos de intensidad sobre el plano radial-circunferencial en la figura de polos basal. Se ha encontrado por ejemplo, que el factor axial se mantiene prácticamente constante en las tres zonas del espesor ( $\Delta f_{2\text{max}} = 0,01$ , relativo al promedio general). Si se evalúa la variación de los coeficientes de la región externa hacia la interna, en el caso de los datos crudos el coeficiente radial se incrementa ( $\Delta f_{1\text{max}} = 0,04$ ) y el circunferencial disminuye ( $\Delta f_{3\text{max}} = 0,05$ ), relativo al promedio general. Este comportamiento se ve realizado considerando solo los datos selectos ( $\Delta f_{1\text{max}} = 0,09$  y  $\Delta f_{3\text{max}} = 0,09$ ).

### ■ DIFRACCIÓN DE NEUTRONES

La difracción de neutrones es posiblemente la técnica más adecuada para determinar textura cristalina. Su

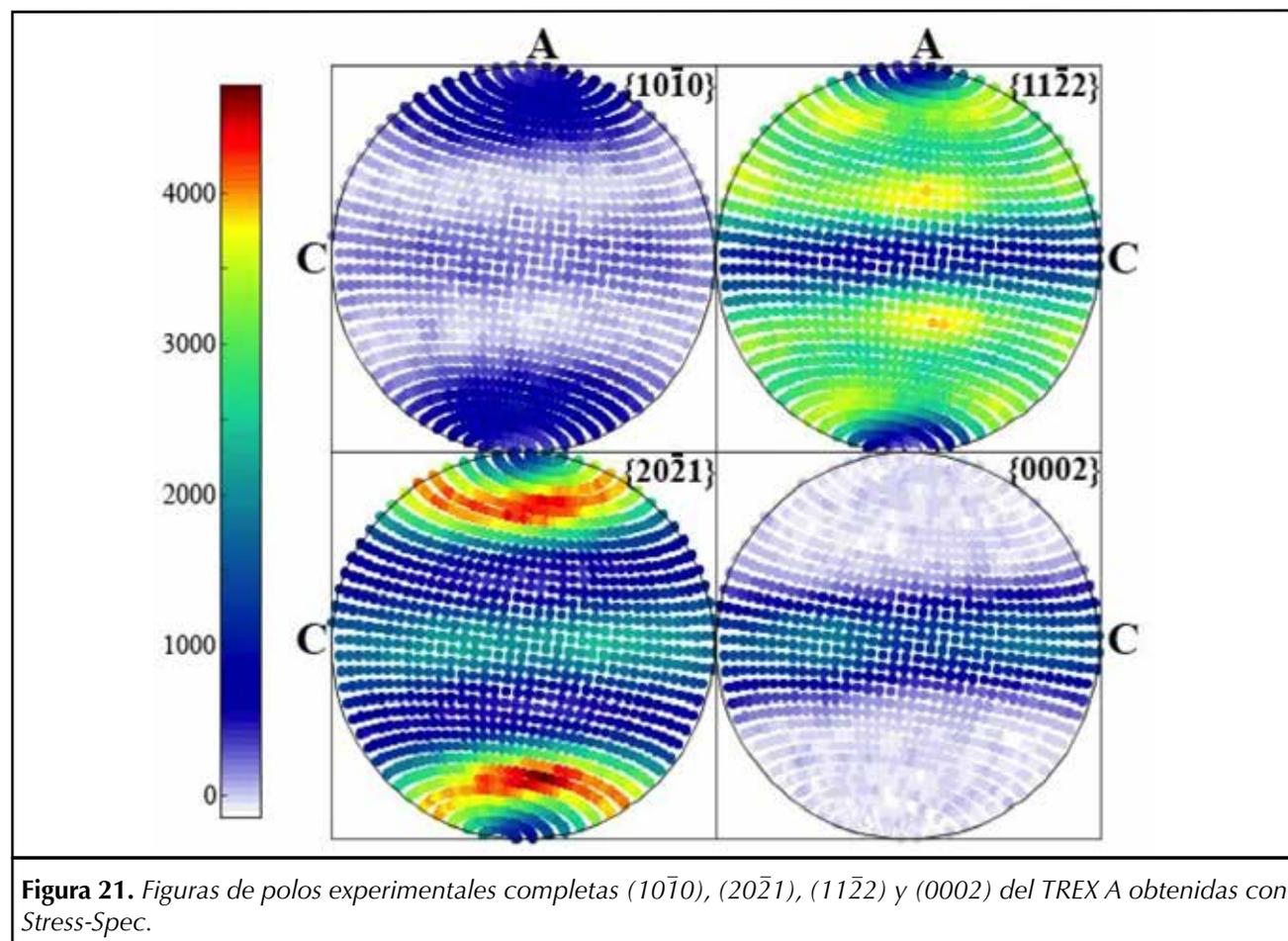
**Tabla 5.** Coeficientes de Kearns calculados a partir de los datos agrupados en las regiones interna, media y externa del TREX A.

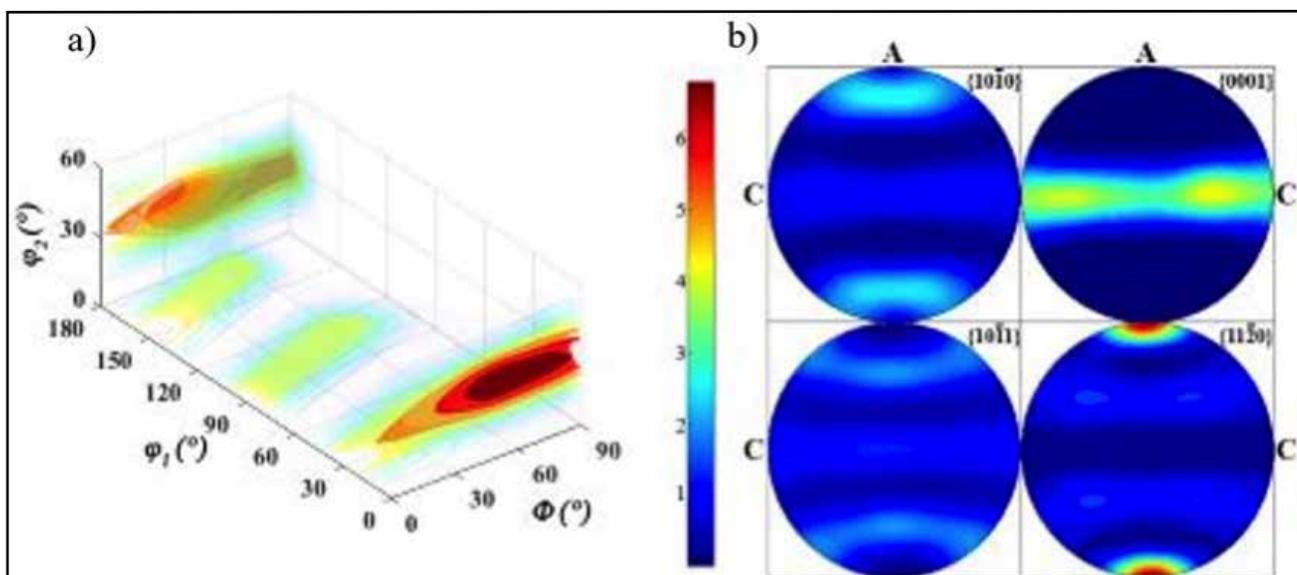
Posiciones	$f_A$	$f_R$	$f_C$
Zona externa (crudos)	0,13	0,37	0,50
Zona externa (CI>0,1)	0,04	0,40	0,56
Zona media (crudos)	0,15	0,42	0,43
Zona media (CI>0,1)	0,04	0,50	0,46
Zona interna (crudos)	0,15	0,43	0,42
Zona interna (CI>0,1)	0,05	0,52	0,43
PROMEDIO GENERAL	0,14	0,41	0,45
Considerando todos los datos crudos	0,14	0,42	0,43
Considerando todos los datos selectos	0,04	0,49	0,47

buena resolución sumada a la gran penetración de estas partículas en la materia permite realizar estudios volumétricos muy representativos de la escala macroscópica. El volumen calibrado para el experimento en Stress-Spec es de  $12 \text{ mm}^3$ , que para un grano de  $5 \text{ mm}$  de tamaño promedio ( $125 \mu\text{m}^3$ ) incluirá del orden de  $\sim 10^8$  granos en la medición y sin ningún efecto de la superficie debido a la geometría de transmisión. En el caso del experimento realizado en Kowari el haz no fue colimado y el detector estaba abierto, con lo cual las muestras, en este caso cilindros de  $5 \text{ mm}$  de diámetro y  $7 \text{ mm}$  de altura ( $137 \text{ mm}^3$ ), fueron bañadas completamente por el haz ( $\sim 10^9$  granos). Esta es la mejor medición volumétrica de la textura que se puede obtener del conjunto de técnicas aquí presentadas.

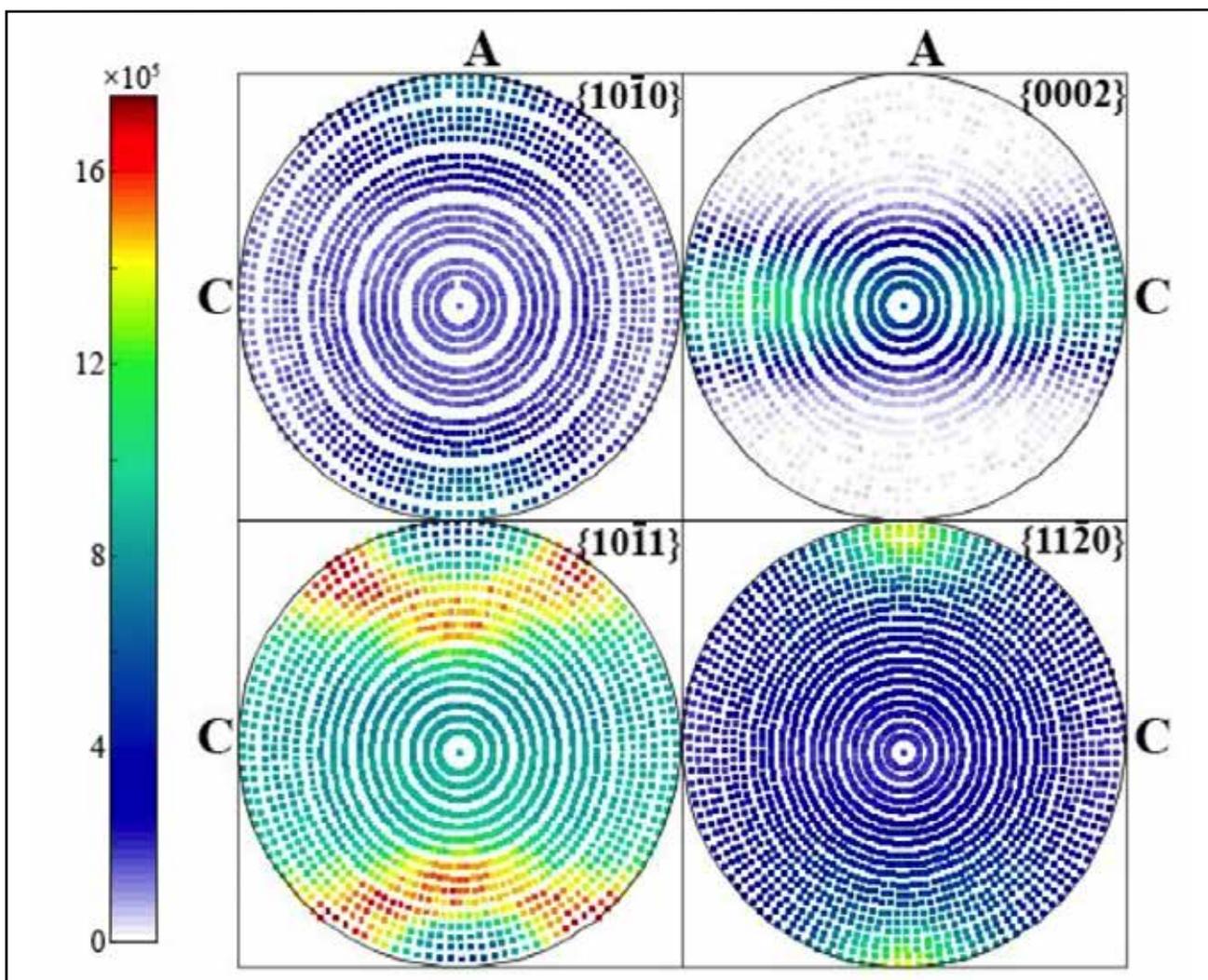
De los experimentos realizados con Stress-Spec (FMR-II) y Kowari (ANSTO) se presentan aquí figuras de polos experimentales completas de los TREX A y C. En la Figura 21 se muestran las figuras de polos experimentales completas de los planos prismáticos de primer orden, piramidales de primero y segundo orden y basal, correspondientes al TREX A (Stress-Spec). La ODF y las figuras de polos calculadas se observan en la Figura 22 y en la Figura 23 las figuras de polos prismáticas, piramidales y basal del TREX C obtenidas con Kowari. Las figuras de polos calculadas se observan en la Figura 24. Una revisión de las figuras de polos calculadas a partir de las experimentales obtenidas con el Emyrean con difracción de rayos X para el TREX A (Figura 16) y el TREX C (Figura 17.c) muestra que son muy similares a las correspondientes Figuras 22.b) y 24.

Cuantitativamente, la comparación de los factores de Kearns obtenidos con difracción de rayos X para cada tubo:  $f_1$  (Radial) = 0,445,  $f_2$  (Axial) = 0,082 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,471 para el TREX A y  $f_1$  (Radial) = 0,398,  $f_2$  (Axial) = 0,098 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,501 para el TREX C, muestra que son virtualmente idénticos a los obtenidos para el TREX A:  $f_1$  (Radial) = 0,447,  $f_2$  (Axial) = 0,090 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,478 y el TREX C  $f_1$  (Radial) = 0,448,  $f_2$  (Axial) = 0,065 y  $f_3$  (Circunferencial) = 0,485 con difracción de neutrones en los instrumentos Stress-Spec y Kowari respectivamente.

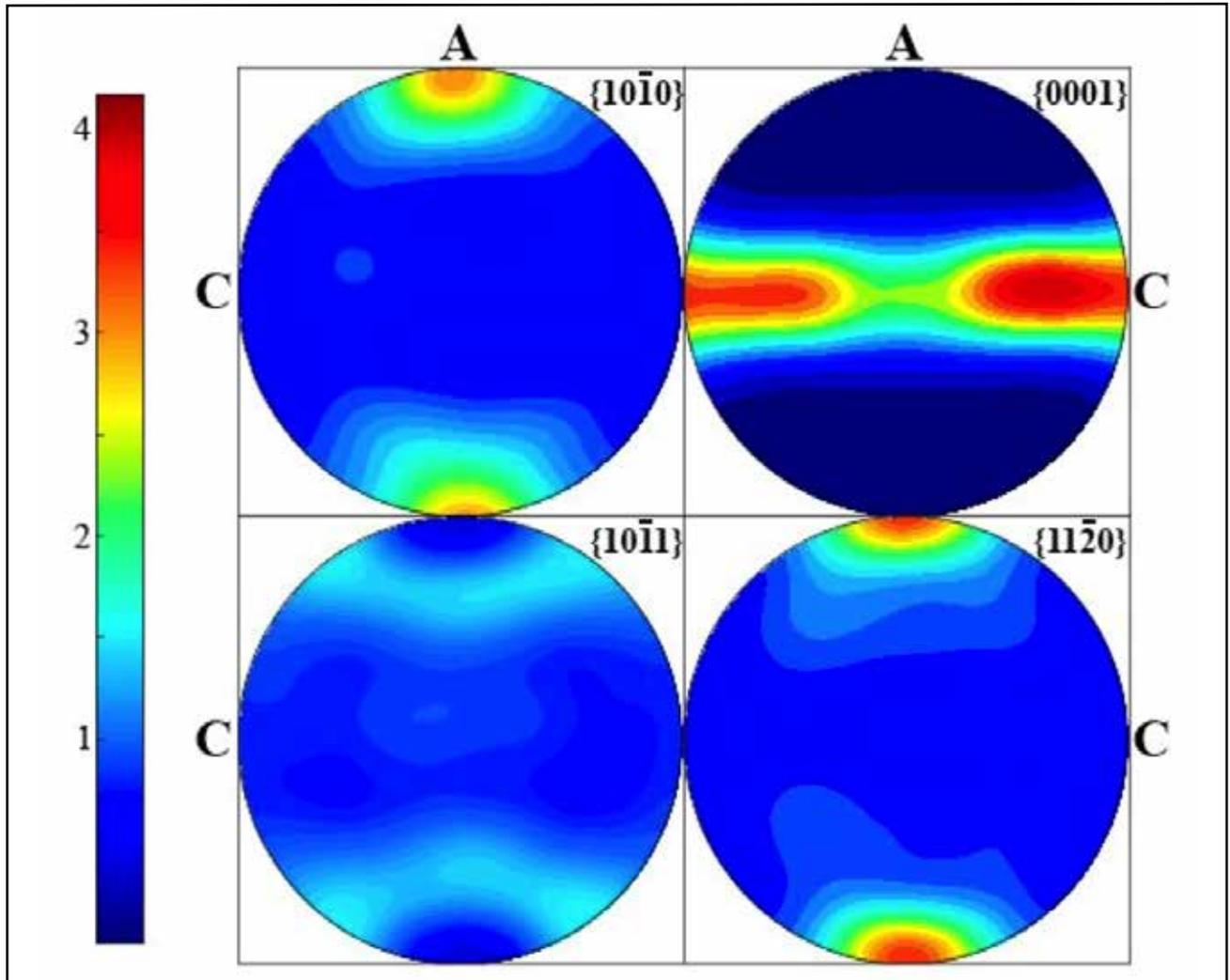




**Figura 22.** a) ODF del TREX A calculada a partir de las figuras de polos experimentales y b) figuras de polos  $(10\bar{1}0)$  y  $(0002)$ ,  $(10\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{2}0)$  calculadas con MTEX.



**Figura 23.** Figuras de polos experimentales completas  $(10\bar{1}0)$  y  $(0002)$ ,  $(10\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{2}0)$  del TREX C obtenidas con el instrumento Kowari.



**Figura 24.** Figuras de polos  $(10\bar{1}0)$  y  $(0002)$ ,  $(10\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{2}0)$  del TREX C calculadas con MTEX a partir de las experimentales obtenidas con Kowari.

■ **¿DE QUÉ MANERA PUEDEN UTILIZARSE ESTOS ESTUDIOS PARA MEJORAR EL DESARROLLO DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE COMBUSTIBLES NUCLEARES?**

La caracterización de la transformación de los materiales en el proceso de fabricación o en la ingeniería de diseño de una nueva aleación es de fundamental importancia para conseguir las propiedades buscadas para el buen funcionamiento de un componente en servicio. En particular, el uso de técnicas de caracterización basadas en la difracción permite hacer predicciones muy certeras de

las propiedades que se alcanzarán en un dado proceso de fabricación de la vaina de un elemento combustible nuclear en este caso, así como también encontrar nuevas rutas de laminación que permitan alcanzar las propiedades deseadas. Los tempranos trabajos experimentales de Marshall desarrollaron parámetros empíricos como Q que permitieron resolver el problema tecnológico que implicaba la precipitación de hidruros en dirección radial en la pared de una vaina, desarrollando procesos de laminación en los que la reducción del espesor del tubo prevaleciera sobre la de diámetro ( $Q > 1$  y lo más alto posible), Figura 25.

Los trabajos de E. Tenckoff relacionaron Q con la evolución de la textura durante los mismos procesos de deformación, con la posibilidad de optimizar las propiedades mecánicas en direcciones específicas del componente. Podemos preguntarnos ahora ¿Qué nos aportan las modernas técnicas de difracción? Bien, a partir de la ecuación [1] podemos realizar mapas de Q para la primera etapa de laminación en frío (Figura 4.b) de las zonas de trabajo de los TREX A y C y obtener los perfiles de Q que se observan en las Figuras 26 y 27. Estos mapas muestran la distribución de valores de Q. En el material A se observa un fuerte gradiente

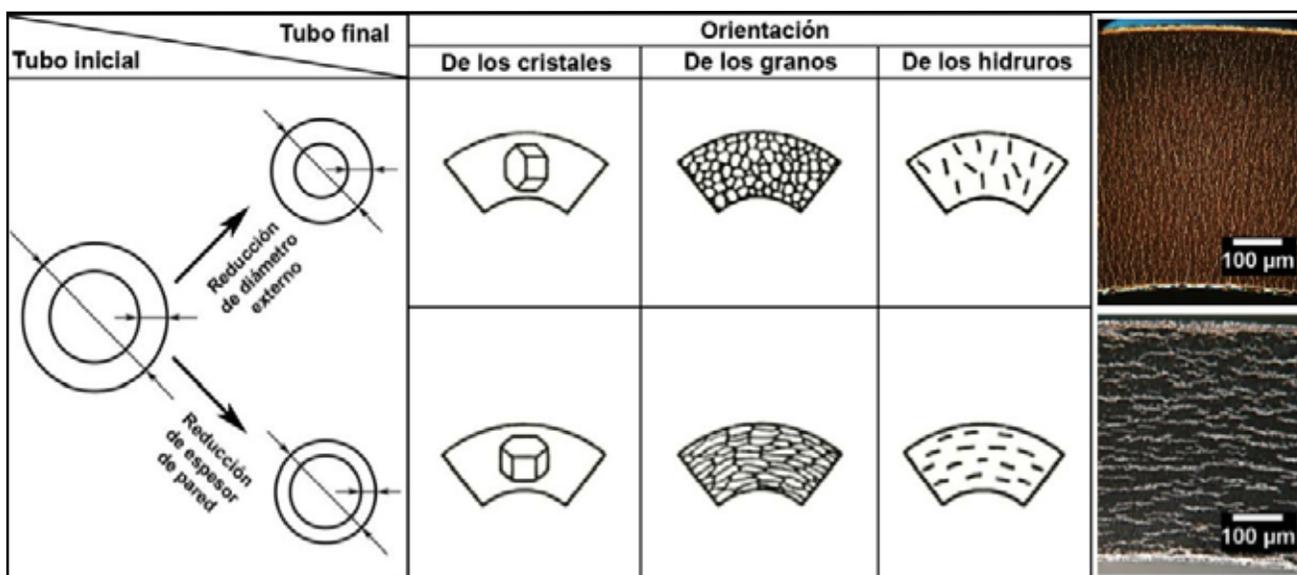


Figura 25. El esquema muestra la vinculación entre procesos de deformación en los que prevalece la reducción del espesor de pared del tubo o la reducción de diámetro y la orientación de los hidruros precipitados en una vaina.

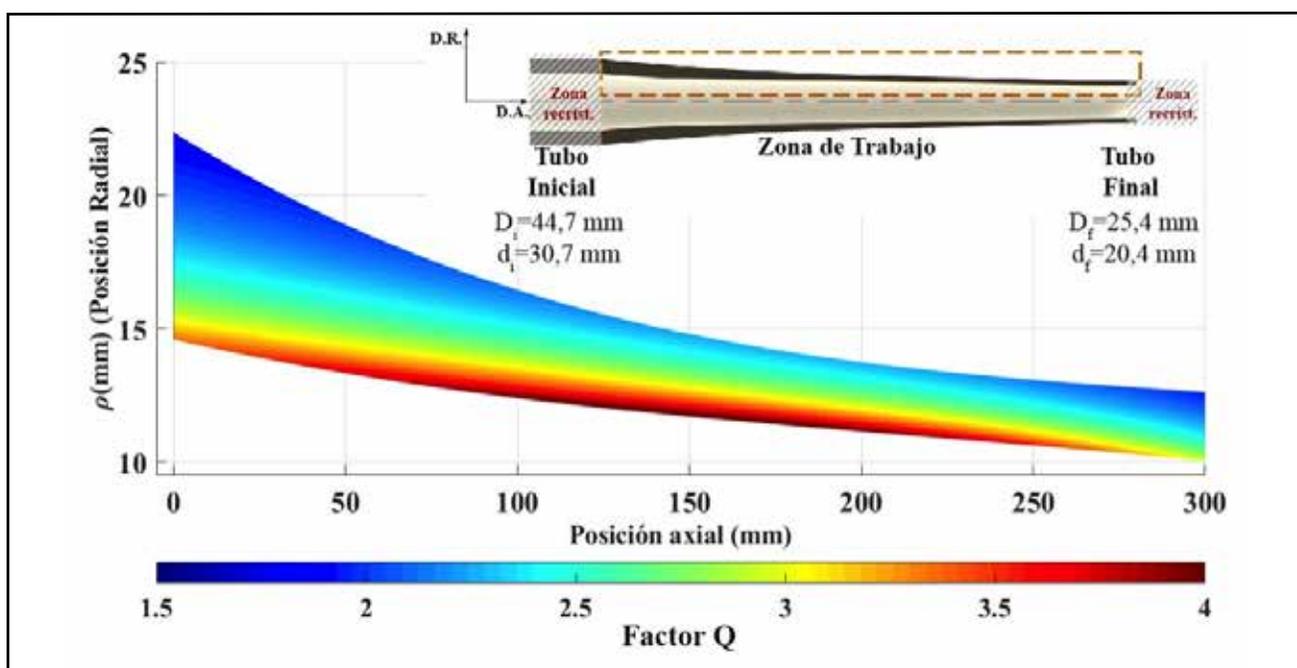


Figura 26. Mapa del factor Q para la primera etapa de laminación de una vaina para el combustible Atucha. TREX A, 80 % de reducción de área.

en el espesor, prácticamente a lo largo de toda la zona y una fuerte variación entre sus extremos (min. 1,5 a max. 4), mientras que en el C el mapa es mucho más inhomogéneo. Prevalece la reducción en diámetro hasta los 200 mm y a partir de allí

se hace más importante la reducción en espesor. En este caso el intervalo de variación de Q es más estrecho (min. 0,8 a max. 2).

Teniendo presente lo anterior queda claro el sentido de los estu-

dios realizados a través de las técnicas de caracterización basadas en la difracción. Estas técnicas ponen en evidencia detalles y diferencias microestructurales entre materias primas que a priori se suponen idénticas: se observan gradientes

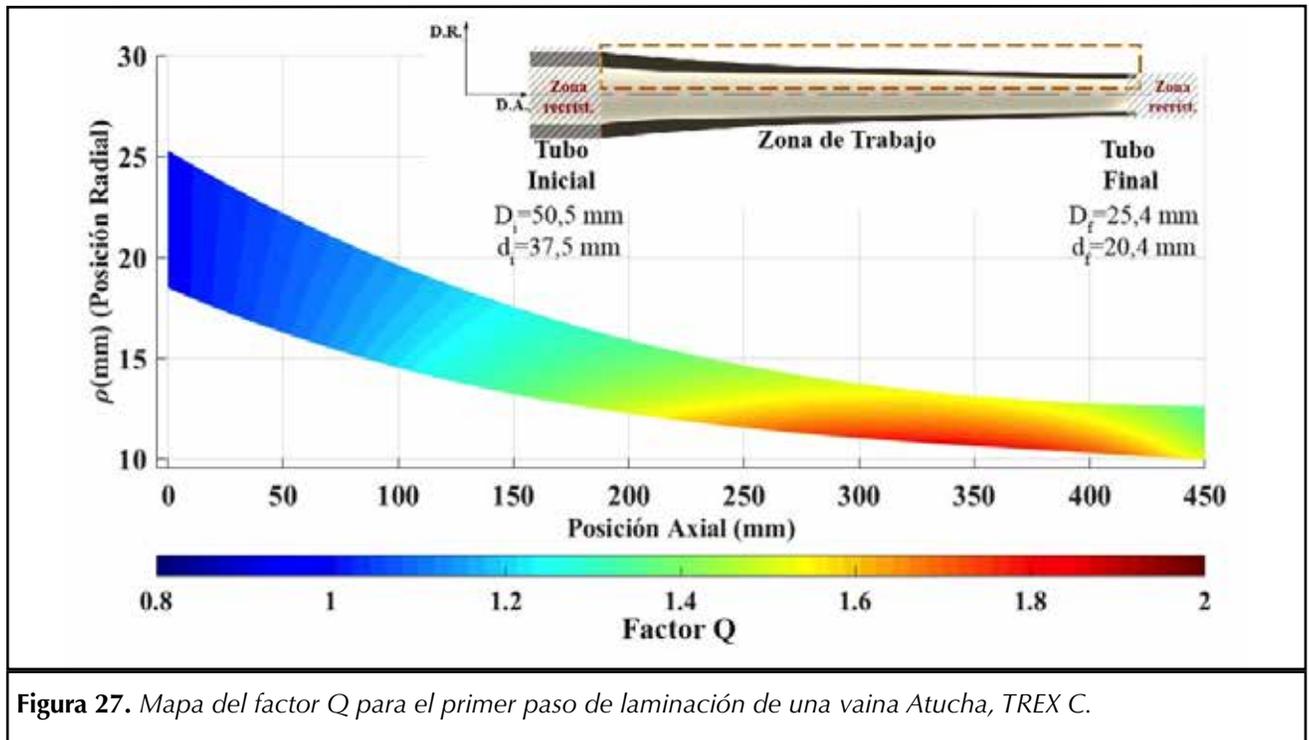


Figura 27. Mapa del factor  $Q$  para el primer paso de laminación de una vaina Atucha, TREX C.

de textura (propiedad intrínseca o atomística) que se ven claramente vinculados a propiedades micro-mecánicas como la microdureza y microestructurales como el tamaño de grano (propiedades fenomenológicas) y permiten explicar las variaciones y tendencias que presentan en términos de reorientaciones de los granos (microestructura) a lo largo de las etapas del proceso de deformación. En el caso que nos ocupa y a medida que se profundicen estos estudios, será posible establecer una relación funcional entre el factor  $Q$  y las propiedades atomísticas como la textura a través de la ODF media y de las ODFs localizadas en las distintas zonas de la geometría del tubo, y lo mismo con el incremento en la densidad de dislocaciones derivada del proceso de deformación, la relación entre la orientación de los granos deformados y la densidad de dislocaciones acumuladas en ellos, todos temas en los que se trabaja actualmente.

Los resultados obtenidos has-

ta aquí permiten, no obstante, una conclusión mucho más general: las técnicas de difracción constituyen la herramienta experimental más robusta para la caracterización de materiales, particularmente en nuestra área temática. Aun con las técnicas de difracción de más reciente aparición (EBSD), todas ellas se muestran complementarias entre sí, aportan resultados comunes pero a la vez permiten caracterizaciones específicas diferentes dependiendo de la escala dimensional accesible a ellas, además de otras variables muy importantes en el campo tecnológico como son la rapidez en la obtención de los datos, la accesibilidad de los instrumentos y, en algunos casos, los costos involucrados en las mediciones.

#### ■ GLOSARIO

[1]. Fenomenológico: método según el cual se caracteriza las propiedades de un material empíricamente para categorizarlo según su respuesta a determinados en-

sayos diseñados específicamente para una aplicación.

- [2]. Textura: orientación preferencial de los cristales individuales que forman un policristal.
- [3]. Hexagonal: celda tridimensional que expresa una de las formas simétricas de organización de los átomos en el espacio.
- [4]. Sección eficaz de captura neutrónica: propiedad de los materiales absorbentes de neutrones.
- [5]. Laminación: proceso de deformación plástica
- [6]. Zircaloy-4: aleación de base circonio.
- [7]. Know how: del inglés "saber cómo" o receta tecnológica, muy usual en la jerga tecnológica.
- [8]. Kroll: proceso químico de separación de un metal desde el mineral consistente en cuatro etapas:

clorinación, reducción, producción de esponja y compactación.

<sup>[9]</sup> TREX: tubo extrudado recristalizado, del inglés, tube recrystallized and extruded.

<sup>[10]</sup> Recristalización: proceso de regeneración de la microestructura deformada consistente en la nucleación y crecimiento de cristales nuevos en el material.

<sup>[11]</sup> Dislocación: defecto cristalino consistente en la presencia de un semi plano atómico extra en la estructura cristalina. Tienen un rol fundamental en la deformación plástica de los metales.

<sup>[12]</sup> Macla: defecto cristalino, banda intragranular que produce una reorientación tipo "reflexión especular" dentro del grano.

<sup>[13]</sup> Mesoscópico: escala "intermedia" entre lo microscópico y lo macroscópico. Es representativa del volumen macroscópico mínimo que expresa las propiedades macro.

<sup>[14]</sup> Misorientación: diferencia de orientaciones entre granos vecinos.

## ■ REFERENCIAS

Allen V.M., Preuss M., Robson J.D., Comstock R.J. (2005) Evolution of Texture in Zirconium Alloy Tubing During Processing. Materials Science Forum, Vols 495-497, 675-680. Trans. Tech Publications, Switzerland.

Decker G. (1996) Synchrotron Radiation Facilities in the USA. Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439 USA

ESFRI (2016) Physical Sciences and Engineering Strategy Working Group, Neutron Landscape Group. Neutron Scattering Facilities in Europe: Present Status and Future Perspectives. ESFRI SCRIPTA Vol. 1. Published by Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Milano, September 2016.

Hume-Rothery W. (1962-Digitised 1999) Applications of X-ray Diffraction to Metallurgical Science Chapter 12. <https://www.iucr.org/publ/50yearsofXraydiffraction/full-text/metallurgical-science>

Juárez G., Bianchi D., Flores A., Vizcaíno P. (2012) Propiedades Mecánicas de Tubos de Zircaloy-4 para elementos combustibles CAREM 25. <https://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/46/.../46119592.pdf>

Juárez G., Loureiro N., Flores A., Bianchi D., Vizcaíno P. (2012) Fabricación de Tubos de Zircaloy-4 para Barras Combustibles Destinadas al Reactor CAREM 25. Informe Técnico DD-ATN40MF-003. 18/12/12.

Konishi T., Honji M., Kojima T., Abe H. (1987) Effect of Cold Reduction on Anisotropy of Zircaloy Tubing. 7<sup>th</sup> Symposium of Zirconium in the Nuclear Industry. ASTM.

Lebensohn, R.A., González M.I., Tomé C.N., Pochettino A.A. (1996) Measurement and Prediction of Texture Development During a Rolling Sequence of Zircaloy-4 Tubes. Journal of Nuclear Materials. 229, 57-64. Doi:10.1016/0022-3115(95)00210-3.

Lemaignan C. (2004) Science des Matériaux pour le Nucléaire. EDP Sciences, France.

Marshall R.P. (1967) Control of Hydride Orientation in Zircaloy by Fabrication Practice. Journal of Nuclear Materials 24, 49-59.

Nagai N., Kakuma T., Fujita K. (1982) Texture Control of Zircaloy Tubing During Tube Reduction. ASTM STP 754, ASTM International, 26-38. Doi:10.1520/STP37044S.

Tenckoff, E. (2005) Review of Deformation Mechanisms, Texture and Mechanical Anisotropy in Zirconium and Zirconium Base Alloys. Journal of ASTM International, 4.

Tenckoff, E. (1988) Deformation Mechanisms, Texture and Anisotropy in Zirconium and Zircaloy. Special Technical Publication (STP 966), 1916 Race Street, Philadelphia 19103, editor ASTM.

## ■ NOTAS

1 La producción se pensó para abastecer a cinco centrales. Para finales de la década de los 80' cuando finalizó este desarrollo, solo había dos centrales en operación (Atucha I y Embalse) y una tercera en construcción (Atucha II).

2 Los objetos metálicos macroscópicos en general son policristales: están constituidos por muchos cristales microscópicos denominados "granos" en metalurgia (microestructura). Estos pueden estar orientados al azar o bien en forma preferencial respecto de alguna de las direcciones del espacio.

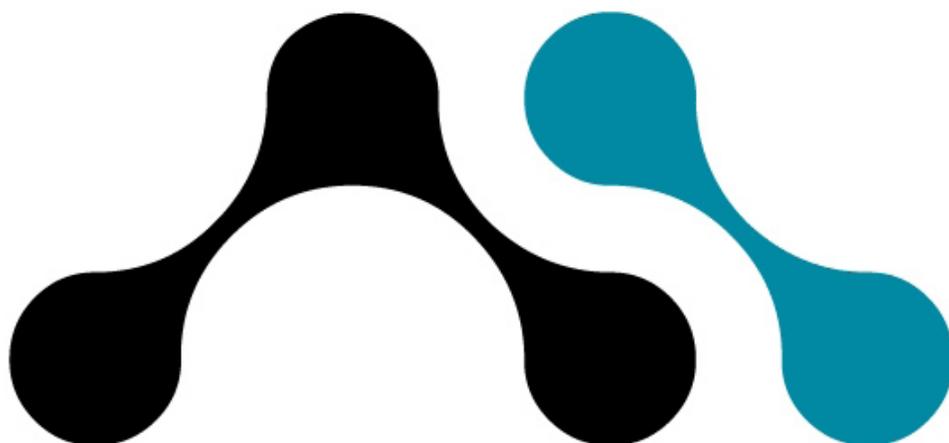
3 Modelo que considera al átomo como una esfera indeformable (rígida) y a las estructuras periódicas que forman los átomos en el espacio (redes cristalinas), como el resultado del apilamiento de capas de esferas (planos cristalinos). Este modelo simplificado explica correctamente

los procesos de deformación plástica en los metales.

4 Planos cristalinos efectivamente ocupados por átomos.

5 Las vainas se presurizan internamente con Helio a presiones mayores a 2.5 MPa. Durante operación debido a la liberación de productos de fisión gaseosos esta presión se in-

crementa, lo cual genera tensiones circunferenciales que podrían generar la propagación de una fisura a través de su pared en presencia de un hidruro radial.



FUNDACION ARGENTINA DE  
**NANOTECNOLOGIA**

(5411) 4518-1715/4518-1716 - 25 de Mayo 1021. C.P. 1650.  
San Martín. Provincia de Buenos Aires. Argentina - [www.fan.org.ar](http://www.fan.org.ar) - [info@fan.org.ar](mailto:info@fan.org.ar)

# EL INSÓLITO CAMINO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

## Desde la ciencia básica hasta el desarrollo tecnológico

**Palabras clave:** celdas solares, paneles, materiales, investigación, tecnología espacial.  
**Key words:** solar cells, panels, materials, investigation, space technology.

Los paneles o módulos fotovoltaicos están constituidos por celdas solares, dispositivos capaces de generar energía eléctrica cuando son iluminados. Sus aplicaciones pueden variar desde meros productos de consumo a grandes centrales de potencia e incluso abastecer de energía a un satélite. En este último caso los requerimientos son muy estrictos y se exige que tengan el menor peso, mayor eficiencia, mayor confiabilidad y alta resistencia a la radiación. De esta manera resulta de interés realizar investigación y desarrollo sobre los dispositivos y los materiales intervinientes teniendo como finalidad el mejor desempeño tecnológico.

The photovoltaic solar cells are devices capable of generating electrical energy when they are illuminated. Its applications might vary from simple consumer products to large solar power plants and even supply energy in a space mission. For the last case the requirements for the solar cells are highly strict in order to have the lowest weight, highest efficiency, highest reliability and high radiation resistance. In this way it is of interest to carry out research and development on the devices and materials involved, aiming at the best technological performance.

### ■ ALGUNOS ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LAS CELDAS SOLARES

Los paneles solares o módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica a partir de la energía solar. A su vez los módulos están constituidos por celdas solares, que se pueden considerar como el dispositivo más importante en la etapa de conversión fotovoltaica.

Un material es apropiado para ser utilizado en celdas solares si cumple con ciertos requisitos, como

por ejemplo tener la absorción apropiada y estabilidad en tiempo. Además, desde el punto de vista de su uso comercial, la celda debe tener facilidad de producción, reproducibilidad en los parámetros eléctricos, buena eficiencia de conversión fotovoltaica y bajo costo de producción. Se deja de lado este último aspecto en el caso de las aplicaciones espaciales, ya que en ese caso cobra relevancia el requerimiento de eficiencia.

Ahora bien, desde el punto de

vista de la investigación y desarrollo, es importante estudiar materiales que logren avanzar en eficiencias y demás parámetros eléctricos y superar los problemas de degradación que puedan tener a lo largo de su vida útil.

El primer punto para comprender el comportamiento de los dispositivos fotovoltaicos y los materiales que lo conforman es comprender la naturaleza de la radiación solar [Grossi]. El espectro solar visible está compuesto por distintas longi-

### ■ Marcela Barrera y Hernán Socolovsky

Gerencia Investigación y Aplicaciones, Departamento Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

E-mail: barrera@tandar.cnea.gov.ar



Figura 1. Radiación solar.

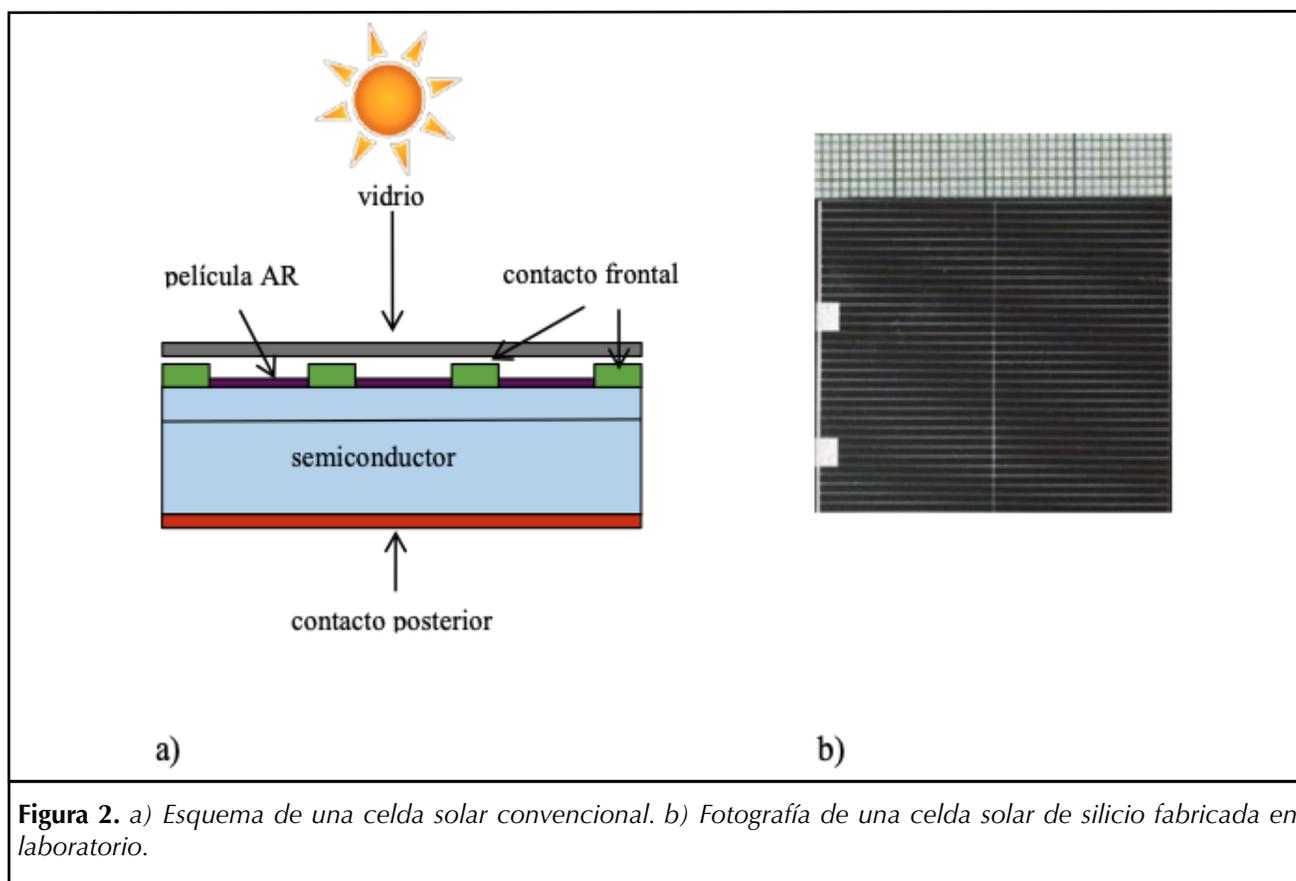


Figura 2. a) Esquema de una celda solar convencional. b) Fotografía de una celda solar de silicio fabricada en laboratorio.

tudes de onda. Además de esto existen longitudes de onda no visibles, como por ejemplo el ultravioleta (UV) y el infrarrojo (IR) (Figura 1).

El espectro de radiación solar posee mayor irradiancia (es más intenso) para longitudes de onda comprendidas entre 400 y 800 nm. Por lo tanto, es razonable pedir que los

materiales de interés fotovoltaico tengan la capacidad de absorber la radiación en ese intervalo. Por ejemplo, el silicio (Si) absorbe hasta aproximadamente 1100 nm, el arseniuro de galio (GaAs) hasta 880 nm y el germanio (Ge) hasta 1850 nm.

Una celda solar fotovoltaica convencional es básicamente un dio-

do<sup>[1]</sup> (Figura 2). Posee un contacto frontal que es una grilla metálica frontal que cubre parcialmente la superficie; esto es para que la luz solar incida directamente sobre el material semiconductor, mientras que el contacto posterior cubre toda el área. Además presenta una película antirreflejante (AR) que tiene la finalidad de aumentar la radiación

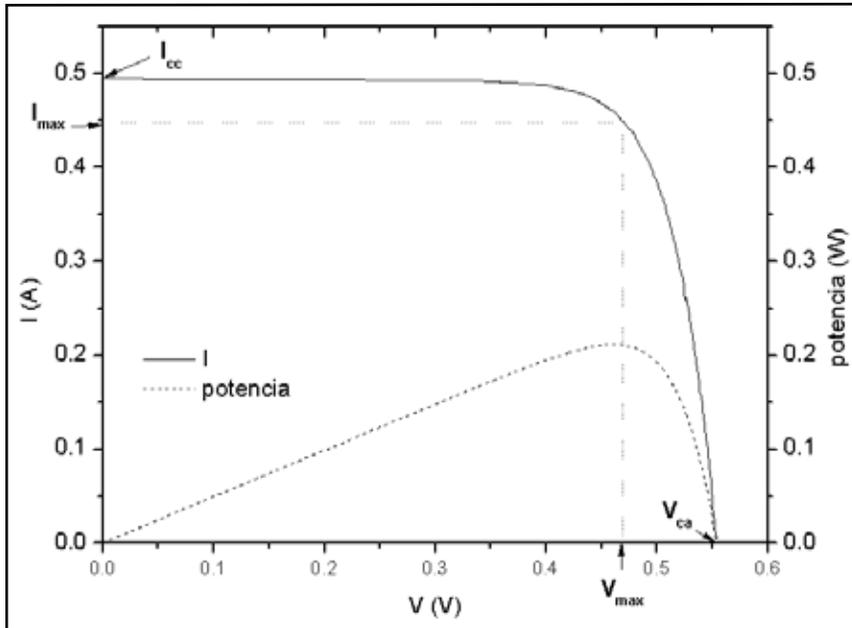


Figura 3. Curva I-V característica para una celda solar.

■ MATERIALES DE INTERÉS FOTOVOLTAICO

El silicio cristalino ha sido el material más utilizado para la producción de celdas solares desde 1954, año en que se desarrolló la primera celda solar [Chapin et al.]. Esto se debe a las ventajas inherentes del silicio como semiconductor, las que se presentan en la Tabla 1 [Bruton; Goetzberger et al.].

Actualmente el Si, ya sea cristalino o amorfo, continúa siendo utilizado como material de base para el desarrollo y fabricación de celdas fotovoltaicas comerciales.

Existe también una gran variedad de compuestos semiconductores, por ejemplo aquellos que se obtienen al combinar los elementos de las columnas III y V de la tabla periódica (Figura 4), como el GaAs y el InGaP. También son de interés los compuestos semiconductores de las columnas II y VI de la tabla periódica, como el CdS y el CdTe. En los últimos años cobraron relevancia las celdas solares orgánicas, que están formadas por moléculas orgánicas [Luque et al.].

En la Tabla 2 pueden apreciarse los parámetros eléctricos de celdas solares de distintos materiales. Estas celdas son de la máxima eficiencia certificada hasta el momento a nivel laboratorio [Green et al.].

solar absorbida.

Las celdas y paneles solares son caracterizados principalmente mediante la curva característica corriente - tensión (I-V), propia del dispositivo. La misma puede representarse en el primer cuadrante (Figura 3).

Algunos parámetros que se definen sobre la curva I-V son [Green (1986)]:

- La corriente de cortocircuito, correspondiente a una tensión nula entre contactos

$$I_{cc} \text{ o } J_{cc} \tag{1}$$

donde  $J_{cc}$  es la densidad de corriente de cortocircuito y surge al dividir  $I_{cc}$  por el área de la celda.

- tensión a circuito abierto, correspondiente a  $I=0$

$$V_{ca} \tag{2}$$

- eficiencia de conversión, definida en el punto donde la potencia es máxima

$$h = \frac{V_{max} I_{max}}{P_i} \tag{3}$$

donde  $P_i$  es la potencia de la radiación solar incidente sobre la celda.

- factor de forma, da una medida de cuan alta es la potencia máxima  $P_{máx}$  con respecto al tope ideal determinado por el producto entre  $V_{ca}$  e  $I_{cc}$

$$F = \frac{I_{max} V_{max}}{I_c V_a} \tag{4}$$

Tabla 1  
Ventajas del silicio como material para celdas solares

- es el segundo elemento en abundancia en la corteza terrestre
- no tóxico
- posee óxido nativo pasivante
- bajo coeficiente de segregación para muchos metales
- se puede dopar fácilmente (n o p)
- bajo costo
- vasto conocimiento de sus propiedades físicas



función de la ventana es pasivar la superficie de la celda, que significa que va existir una menor pérdida en la corriente generada.

Por otra parte, para aumentar la eficiencia de celdas solares se deben implementar mejoras en el diseño, como por ejemplo la incorporación

de técnicas AR. Estas técnicas tienen como finalidad disminuir la reflectividad de la cara frontal del dispositivo, maximizando de este modo la fracción de luz absorbida. Pueden consistir de multicapas dieléctricas<sup>[2]</sup> optimizadas o texturas en la superficie.

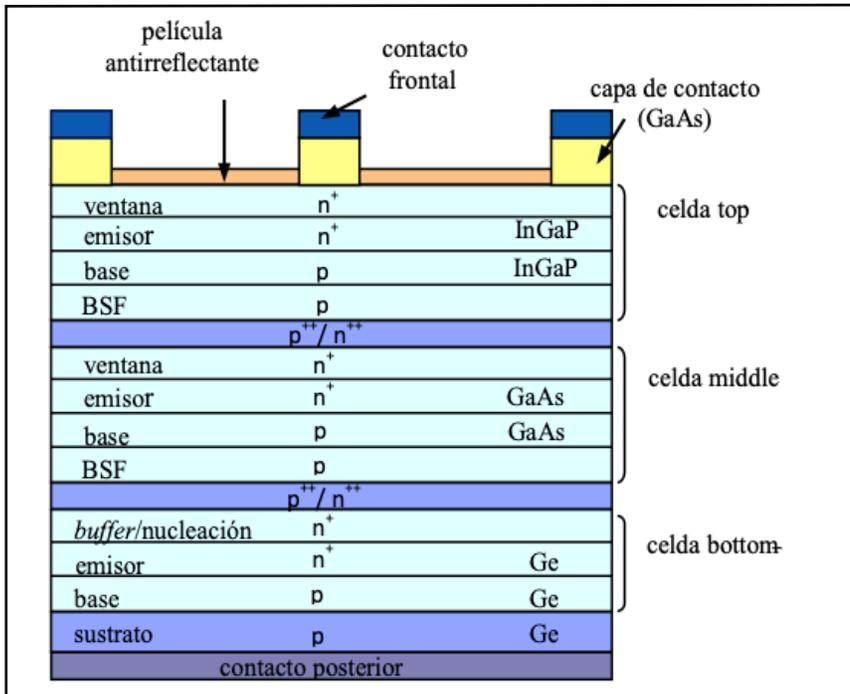


Figura 5. Vista transversal de una celda multijuntura InGaP/GaAs/Ge.

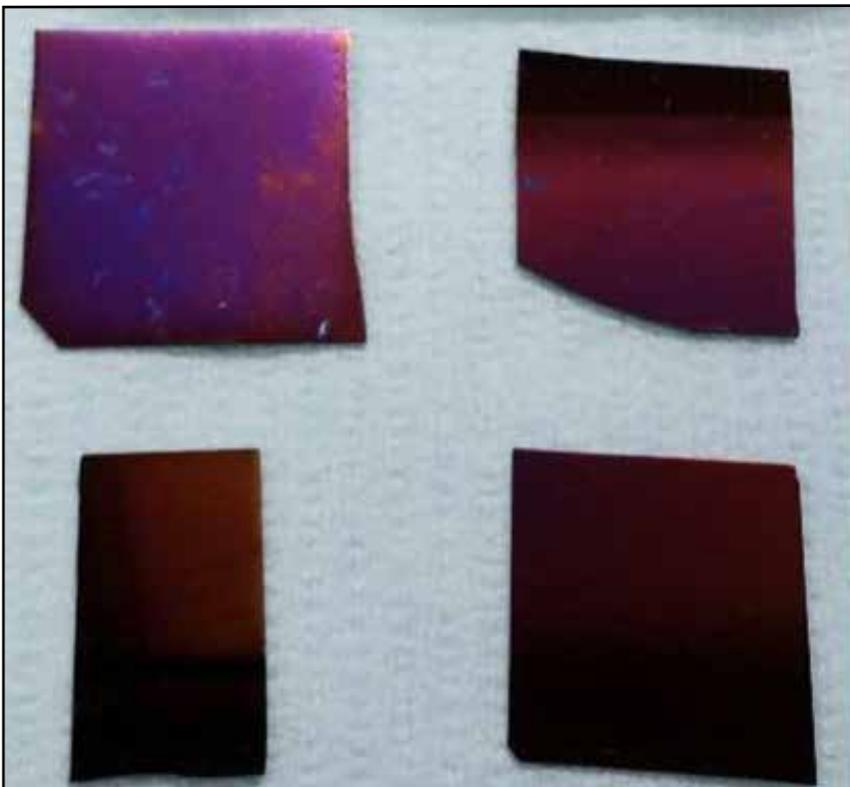
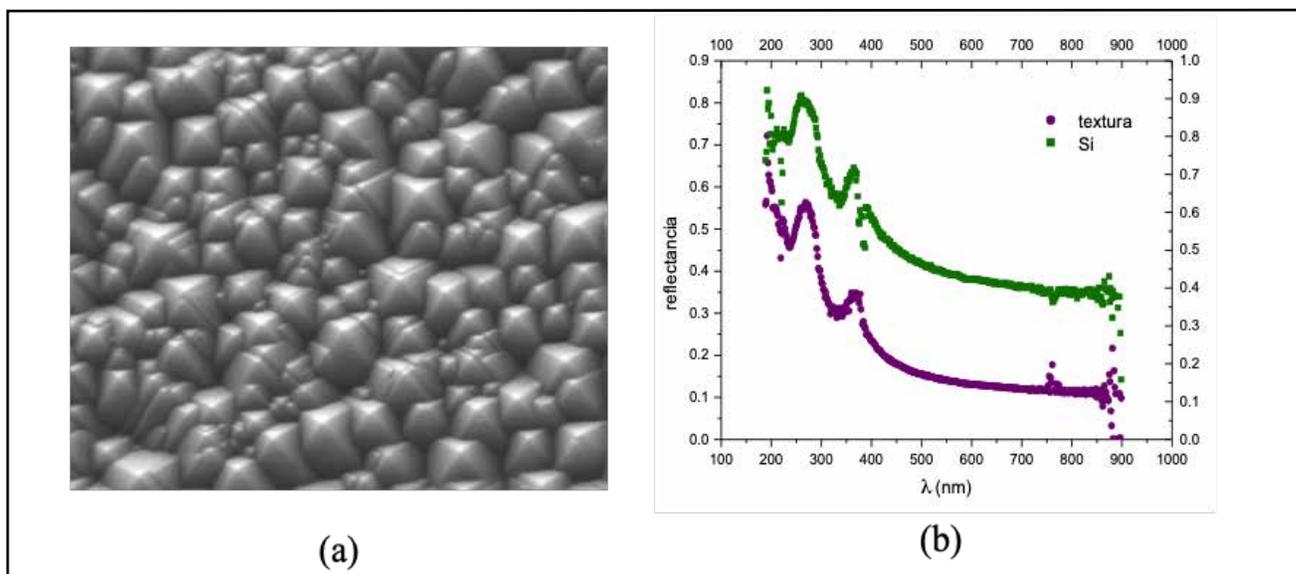


Figura 6. Muestras de Si con depósito de ZnS con espesor de 40 nm.

Dos materiales dieléctricos con las características adecuadas para funcionar como AR en celdas solares de Si son el TiO<sub>2</sub> y el ZnS (Figura 6). Mediante ataques químicos anisótropos puede conseguirse una estructura de pirámides sobre Si (Figura 7). Los dispositivos comerciales más conocidos poseen capas de nitruro de silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

■ ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES

El proceso de elaboración de las celdas solares depende fuertemente de los materiales. En el caso de celdas de silicio convencionales, la etapa más importante en la elaboración consiste en la formación del diodo n-p, donde n y p son regiones con características electrónicas distintas. Estas diferencias se consiguen mediante la adición de un pequeño porcentaje de átomos extraños (dopado) en la red cristalina regular del silicio. El agregado de átomos de impurezas con cinco electrones de valencia, por ejemplo el fósforo, produce semiconductores de tipo n, por la contribución de electrones extras. Semiconductores de tipo p pueden obtenerse, por el contrario, por el agregado de átomos de impurezas con tres electrones de valencia, entre otros el boro, porque llevan a la producción de "huecos" o deficiencia de electrones. Por ejemplo, una opción para formar el diodo partiendo de obleas tipo p dopadas con boro, es realizar una difusión de fósforo mediante un proceso térmico a alta temperatura, que puede ser de 900°C en ambiente de nitrógeno y/u

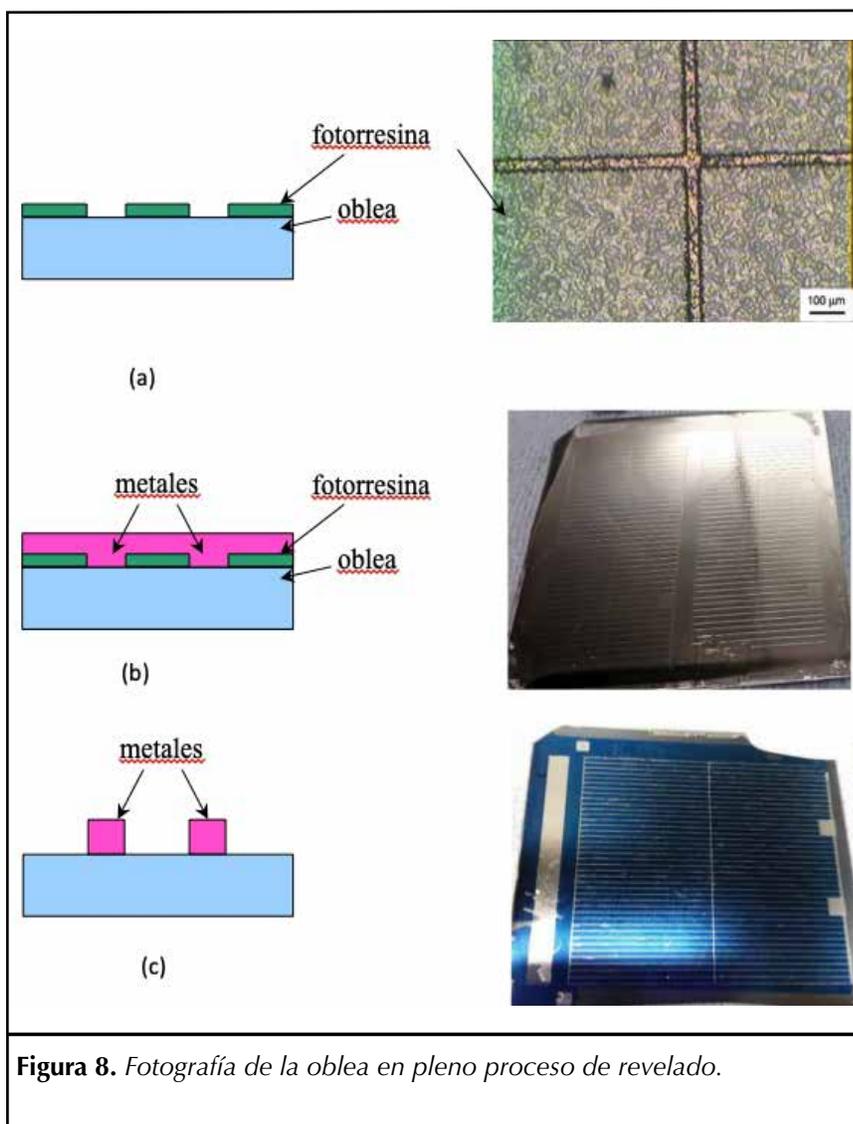


**Figura 7.** (a) Micrografía de una oblea de Si texturada obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), el tamaño de las pirámides varía entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ . (b) Reflectividad antes (verde) y después (violeta) del ataque químico para obtener la textura.

oxígeno según cuál sea la etapa del proceso.

La grilla metálica frontal que forma parte de la celda es diseñada para permitir que la luz incida en el material semiconductor y asegurar simultáneamente una máxima superficie de absorción y una baja resistencia eléctrica. El patrón de este contacto frontal se consigue, a nivel laboratorio, mediante un proceso denominado fotolitografía, que se utiliza con frecuencia en microelectrónica (Sze). Para esta técnica se recubre la oblea con un material sensible a la radiación UV llamado fotorresina. A su vez, la fotorresina se recubre con una máscara parcialmente transparente. En el caso en el que la fotorresina sea positiva, zonas que fueron expuestas a la radiación UV pueden ser removidas durante el revelado (Figura 8a).

Los contactos, en el caso de las celdas de laboratorio, pueden ser titanio - paladio - plata, que pueden ser depositados mediante distintas técnicas. La manera más común es mediante evaporación térmica. Para ello se utiliza una evaporado-



**Figura 8.** Fotografía de la oblea en pleno proceso de revelado.

ra, allí se calientan los metales, que se evaporan depositándose sobre las muestras (Figura 8b). Finalmente, se remueve la resina con acetona y, de ser necesario, bajo la acción de ultrasonido. De este modo, el metal depositado sobre la fotorresina se desprende, quedando solamente sobre la oblea el patrón de la grilla; esta técnica es conocida con el nombre de *lift-off* (Figura 8c).

Cabe aclarar que en el proceso industrial de fabricación de celdas solares los contactos se depositan mediante un proceso diferente llamado serigrafía (*screen - printing*).

Las celdas solares basadas en semiconductores III-V se fabrican mediante procesos más complejos que el de los dispositivos de silicio. Una de las técnicas que puede emplearse se denomina MOVPE (*Metalorganic Vapor Phase Epitaxy*). La epitaxia en fase vapor se produce cuando las moléculas o especies intermedias de dicho vapor se descomponen cerca

de la zona de crecimiento, pasando a formar parte de un cristal (Luque). De todos modos hay que tener en cuenta que el objetivo principal sigue siendo formar el diodo o unión n-p.

### ■ CARACTERIZACIÓN

La técnica de caracterización principal para las celdas solares y módulos fotovoltaicos es la medición de la curva corriente – tensión (I-V). La medición se realiza bajo condiciones estándares, donde se especifica las condiciones de iluminación y la temperatura del dispositivo [norma i-v].

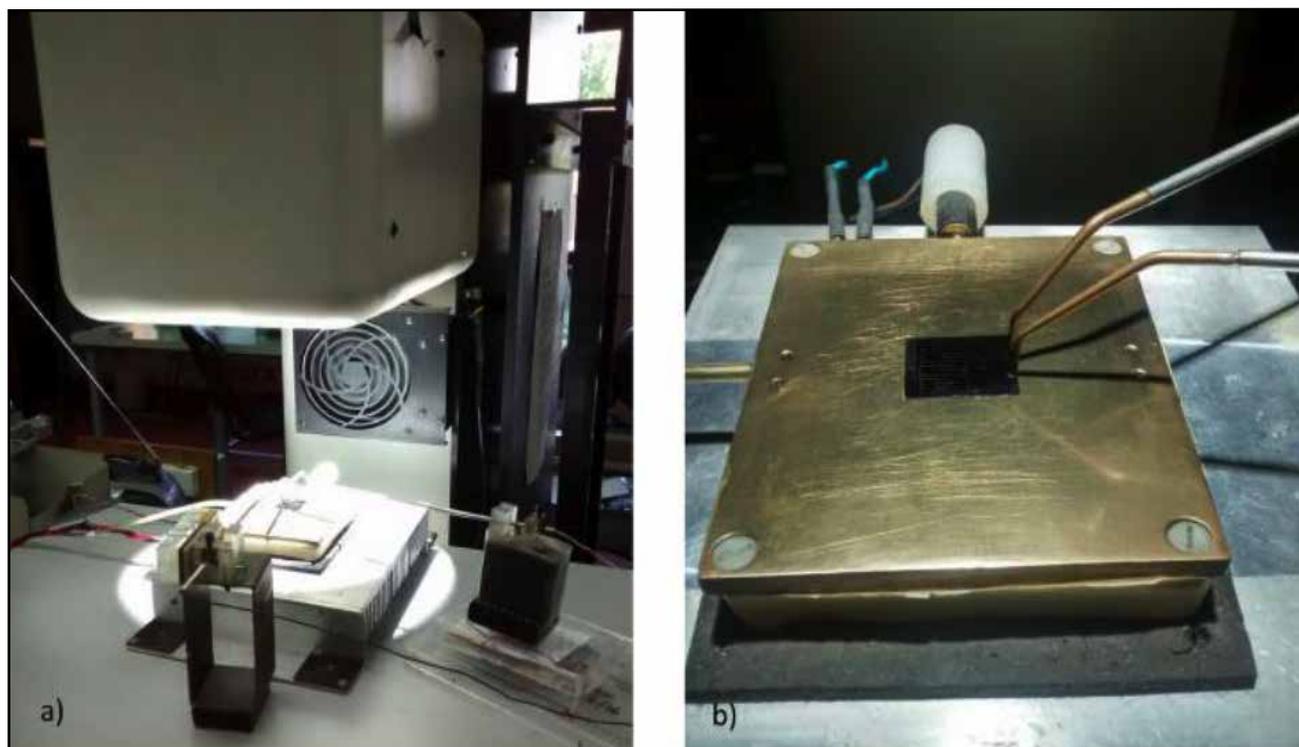
En la Figura 9a se observa una fotografía del simulador solar, la celda en el plano de medición y un sistema de puntas destinado a la medición eléctrica. Además, se utiliza un equipo de adquisición de datos. En la Figura 9b se observa un dispositivo apoyado sobre una base termostatazada para mantener la tempera-

tura, que generalmente es de 25°C.

Otras caracterizaciones que tienen principal interés para comprender el funcionamiento de las celdas solares son la medición de la respuesta espectral [norma RE; Wenham et al.] y el tiempo de vida media de portadores minoritarios [Sinton et al]. La respuesta espectral caracteriza el comportamiento de la Icc para distintas longitudes de onda. Por otra parte, es importante mencionar que es preferible trabajar con materiales y dispositivos en los cuales los portadores minoritarios tengan un mayor tiempo de vida media.

### ■ SIMULACIÓN NUMÉRICA DE DISPOSITIVOS

Las herramientas de simulación, y en particular de celdas solares, nos permiten corroborar la validez de nuevas teorías y nos brinda una profunda comprensión de las relaciones existentes entre los parámetros de los materiales y del dispositi-



**Figura 9.** a) Medición de curva I-V de una celda solar en un laboratorio, b) Base de medición.

tivo. La principal ventaja es que el simulador permite evaluar diseños novedosos antes de la fabricación del dispositivo. También es muy importante validar las suposiciones hechas en los modelos mediante la comparación con los resultados experimentales.

Entre los códigos más conocidos para modelar detectores ópticos y celdas solares se encuentran, por un lado, los de origen académico como ASA desarrollado por Delft University, Holanda [Pieters et al.], ADEPT de Purdue University, USA [Gray et al.], AMPS de Penn State University, Estados Unidos [McElheney et al.], ASPIN de *Ljubljana University*, Eslovenia [Vukadinovic et al.], etc. También existen programas de origen comercial como el PC1D o PC2D [Basore et al.], el ATLAS [Michael et al.] y el Medici [Choe]. Todos resuelven ecuaciones habituales de física de dispositivos, como las de Poisson y de continuidad con distintos grados de aproximación.

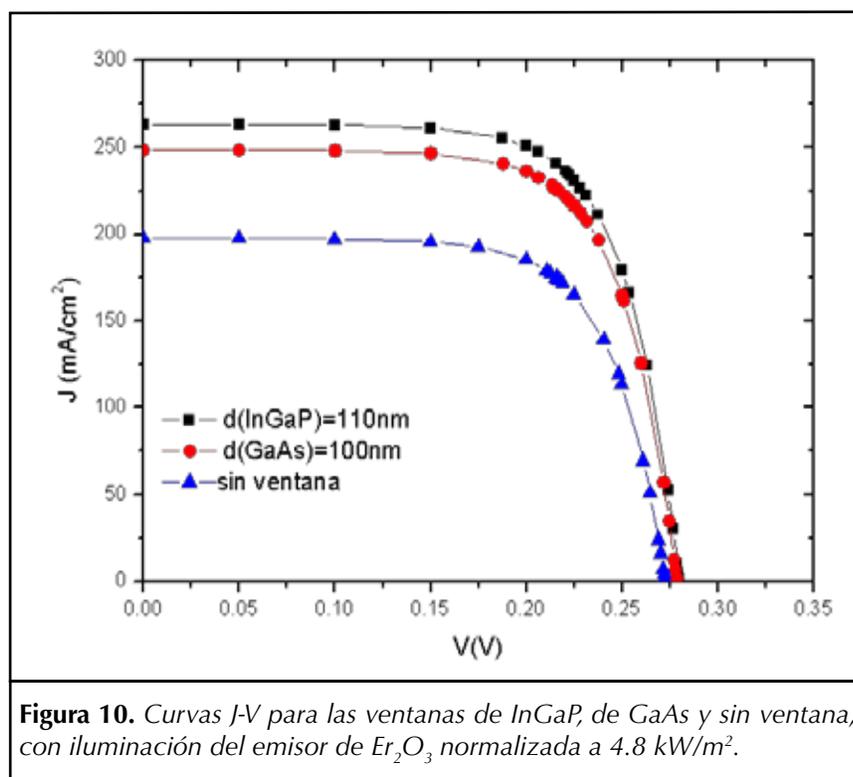
Por ejemplo, se puede modelar numéricamente una celda solar de GaAs y luego reproducir los resultados experimentales [Barrera et al. (2007)]. En la Tabla 3 se presenta la comparación entre los parámetros eléctricos de la celda solar simulados y experimentales.

Otro ejemplo de simulación es el estudio del funcionamiento de una

celda solar para aplicaciones termofotovoltaicas en misiones espaciales lejanas al Sol [Barrera et al. (2012)]. El suministro de energía eléctrica para el vehículo o satélite proviene de celdas solares iluminadas con una fuente de calor. En este ejemplo se consideró una fuente de calor de  $Er_2O_3$  y una celda de Ge, con la capa ventana de GaAs o InGaP. La figura 10 muestra cómo varía la curva J-V para distintos espesores y materiales de la capa ventana. Esto permitiría seleccionar la estructura óptima del dispositivo para las condiciones ambientales deseadas.

### ■ DEL LABORATORIO A LA APLICACIÓN TECNOLÓGICA

Las misiones espaciales requieren paneles solares diseñados específicamente para satisfacer la demanda de energía eléctrica del satélite y de todos sus subsistemas. Teniendo en cuenta el elevado precio de dichos paneles en el mercado internacional, y con el objeto de disponer en el país de las herramientas de diseño, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para las misiones satelitales del Plan Espacial Nacional, la CNEA comenzó en el



**Figura 10.** Curvas J-V para las ventanas de InGaP, de GaAs y sin ventana, con iluminación del emisor de  $Er_2O_3$  normalizada a  $4.8 \text{ kW/m}^2$ .

**Tabla 3:** Parámetros eléctricos experimentales y simulados con D-AMPS-1 D para la celda de GaAs.

	$V_{ca}$ (mV)	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
parámetros experimentales [12]	1035	26,7	84,3	23,3
parámetros simulados con D-AMPS-1D	1039	26,4	88,1	24,1

año 2001 una estrecha colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) a través de sucesivos contratos firmados en el marco de la Ley No 23.877 de Innovación Tecnológica. Como resultado de este proceso se pudieron fabricar los paneles solares de la misiones SAC-D, SAOCOM 1A y 1B en el Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA (Alurralde et al.).

Las celdas solares que forman parte de un panel solar de uso espacial deben satisfacer una serie de requerimientos. Por un lado deben tener la mayor eficiencia posible, incidiendo este aspecto directamente en un menor tamaño de panel solar para una determinada potencia. Y un panel más pequeño es por supuesto más liviano, siendo esto muy crítico considerando el elevado costo que tiene poner en órbita cada kilogramo de carga.

Por otro lado, las celdas solares a diferencia de cualquier otro dispositivo electrónico que viaja en un satélite quedan directamente expuestas al ambiente espacial lo que

implica, por ejemplo, que van a recibir una mayor cuota de radiación (especialmente partículas cargadas y radiación UV) con respecto al resto de los componentes que van en el interior del satélite. Por ende, deben ser capaces de sobrevivir durante su vida útil al impacto permanente de protones, electrones y otras partículas provenientes del sol. Así mismo recibirán una dosis de radiación ultravioleta mucho mayor que la equivalente en la superficie de la tierra. La capacidad de resistir el ambiente espacial es fundamental a la hora de seleccionar una celda solar y cada componente que viaja al espacio.

Ambos requerimientos, alta eficiencia y resistencia a la radiación, son actualmente satisfechos por la tecnología denominada celdas solares multijuntura, las cuales están constituidas por materiales III-V crecidos en forma cristalina sobre un sustrato de germanio y que a su vez es la tecnología que actualmente ostenta el record mundial de eficiencia en celdas solares [NREL]. Como ya se mencionó, se trata de un arreglo de tres junturas n-p fabricadas en

forma de tándem que optimiza la generación de energía en función del espectro de la luz que incide. Este efecto se logra utilizando distintos materiales semiconductores capaces de absorber la radiación solar en distintas zonas del espectro. Hoy en día todo el mercado de celdas solares espaciales es exclusivamente dominado por esta tecnología debido a los aspectos ya mencionados. Existen algunos pocos proveedores a nivel global que fabrican y comercializan estos dispositivos calificados para uso espacial.

Por tal motivo, las celdas solares utilizadas en los satélites del plan espacial nacional llevado adelante por CONAE son también celdas comerciales, quedando el dimensionamiento del sistema y su adaptación al ambiente espacial (el cual es específico de cada tipo de órbita) a manos del diseñador, es decir nuestro departamento. A modo de ejemplo, cuando el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA diseña un panel solar para un Rover marciano, utiliza las mismas celdas solares multijuntura pero el diseño



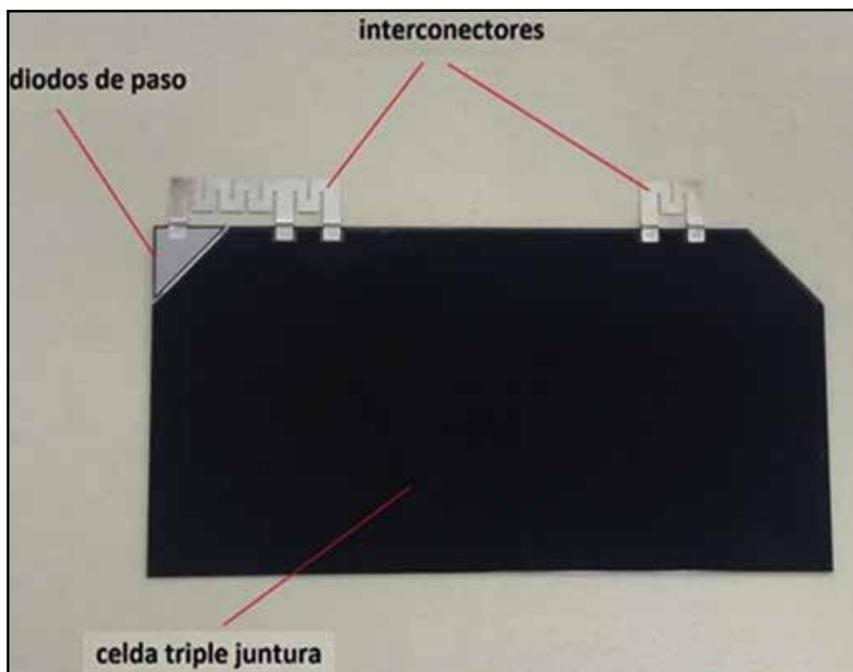
**Figura 11.** Vista interior del laboratorio de integración de paneles solares para uso espacial del Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA.

se adapta a las condiciones particulares del ambiente en Marte.

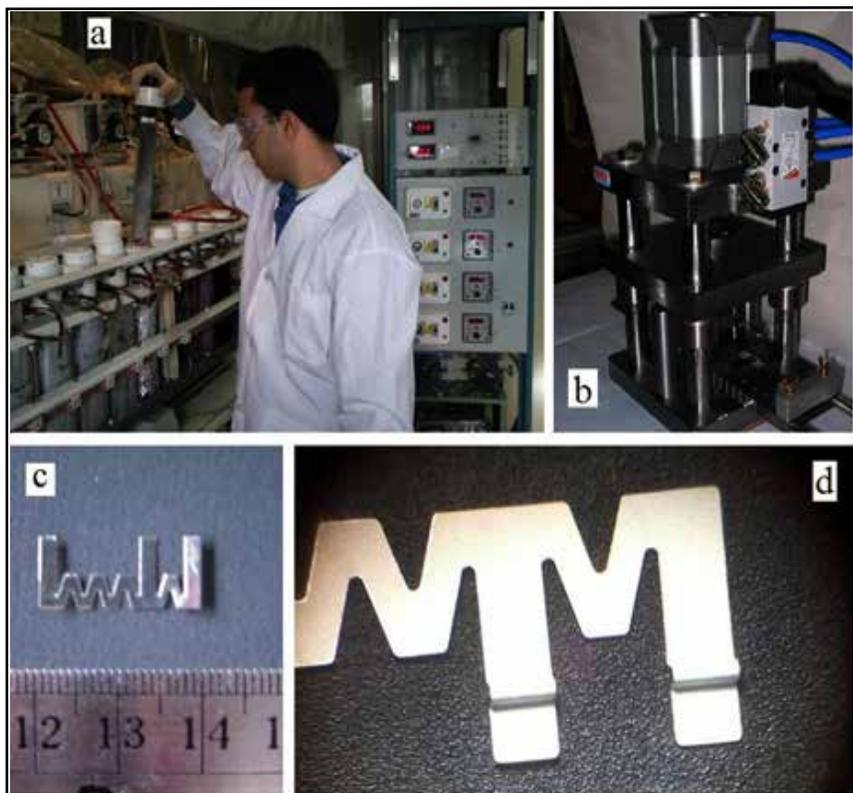
## ■ FABRICANDO PANELES SOLARES ESPACIALES

La integración de los modelos de vuelo se realiza en el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA (CAC-CNEA). Se trata de un área limpia con temperatura y humedad controladas de 220m<sup>2</sup> de superficie clasificada como ISO7 ó clase 10.000 (Figura 11). Dicha clasificación implica que en un volumen de aire de un pie cúbico no puede haber más de 10.000 partículas que superen el tamaño de medio micrón. El sistema de aseguramiento de la calidad desarrollado en la CNEA está basado, principalmente, en la trazabilidad de todo el proceso de integración cumpliendo con los estándares habituales de la industria espacial de NASA y de la agencia espacial europea ESA [Nasa std.; ESA std.].

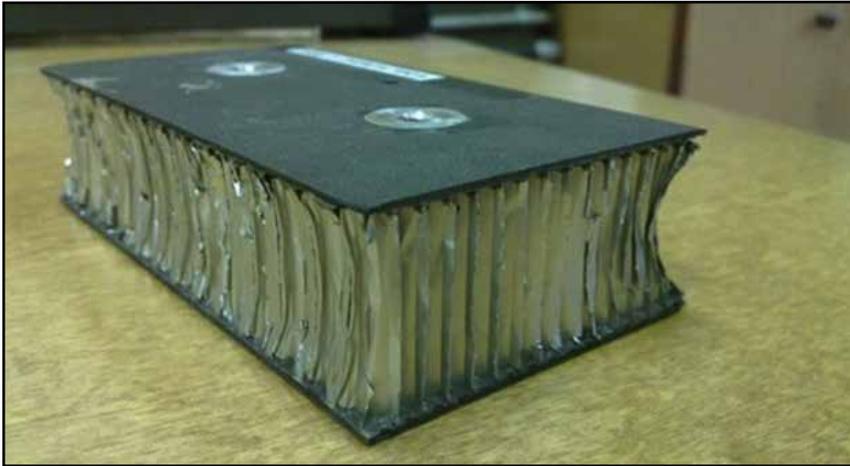
El primer paso de la integración eléctrica de una celda (Figura 12) es el soldado de los interconectores y un diodo de paso de silicio para posteriormente realizar el pegado de la cubierta protectora de vidrio de 100 micrones de espesor. Los interconectores utilizados están formados por una delgada lámina de Kovar<sup>®</sup> [3] plateada y fueron fabricados en la CNEA (Figura 13). Los conjuntos formados por la celda solar, el diodo de paso, los interconectores soldados y la cobertura de vidrio, denominados CIC (por su nombre en inglés, "Covered Interconnected Cell"), se interconectan entre sí en serie, formando subcadenas de N cantidad de celdas dependiendo de la tensión que se desee alcanzar. La interconexión de estas subcadenas, para formar cadenas de celdas en serie, se realiza sobre el sustrato



**Figura 12.** Celda solar triple junta integrada con los interconectores plateados, el diodo de paso y la cubierta protectora de vidrio de 100 micrones.



**Figura 13.** a) Cubas electrolíticas para el plateado de cintas de Kovar<sup>®</sup>; b) matriz de corte de interconectores; c) dimensión del interconector de Kovar<sup>®</sup>; d) lazo de alivio para absorber dilataciones/contracciones del sustrato por ciclados térmicos.



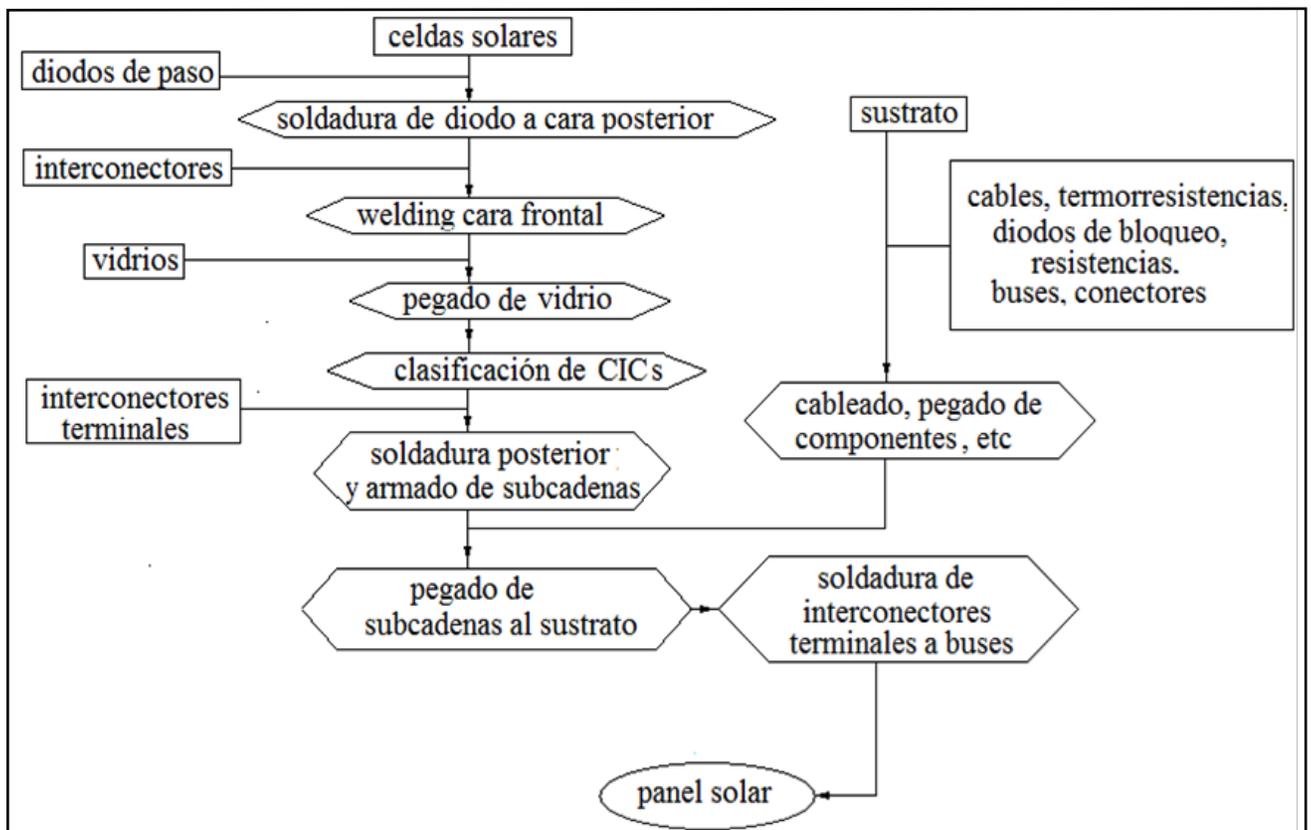
**Figura 14.** Recorte de un sustrato de panel solar con la estructura de panel de abejas de aluminio y las tapas de fibra de carbono laminadas sobre él. El sustrato fue fabricado en CNEA.

(base rígida sobre la cual se pegan las celdas solares ) mediante cintas de conexión de Kovar plateadas llamadas buses. Dicho sustrato está fabricado mediante el laminado<sup>[4]</sup> de dos caras de fibra de carbono conteniendo en su interior una estructura del tipo "honey-comb" (panel

de abejas) de aluminio dando como resultado una pieza de gran rigidez y de muy bajo peso (Figura 14). Entre el sustrato y las celdas es necesario intercalar una delgada lámina de kapton<sup>[5]</sup> que cumple las veces de material aislante y que además mejora la adherencia del pegamen-

to que se utiliza en las celdas. Así por ejemplo, en el caso de los paneles solares del satélite SAOCOM se fabricaron cadenas de 32 celdas en serie alcanzando una tensión de aproximadamente 80V. A su vez, las cadenas se conectan entre sí en paralelo, mediante cables, formando módulos de M cadenas dependiendo ahora de la corriente eléctrica necesaria. Nuevamente para las misiones SAOCOM se colocaron 5 cadenas en paralelo para alcanzar un valor de corriente de módulo cercana a 2,5A. Cada sección del panel maneja entonces una potencia cercana a 150 W. Entre los tres paneles solares de satélite se totalizan 24 módulos de modo tal de completar la potencia requerida por la misión de aproximadamente 3600 W.

Para la soldadura de los interconectores a la cara frontal de cada celda solar se utilizó la técnica de soldadura por resistencia (*Resistance*



**Figura 15.** Esquema de la secuencia de integración de un panel solar para uso espacial en el CAC.

welding). El vidrio protector que lleva cada celda solar es pegado con un adhesivo siliconado transparente apto para uso espacial (Dow Corning® 93-500). El proceso de pegado se realiza en una cámara de vacío para minimizar la posibilidad de la formación de burbujas en el adhesi-

vo, ya que las mismas podrían llegar a romper la celda o el vidrio protector al intentar despresurizarse en el vacío del espacio. Para tal fin, se desarrollaron tres dispositivos: un sistema de alineación para el vidrio y la celda solar, un distribuidor de adhesivo y la cámara de vacío. El control

de calidad se basó en inspección visual y ensayos de adherencia en probetas por cada lote de adhesivo preparado.

En la Figura 15 se muestra un esquema de las etapas de integración, en la Figura 16 una fotografía del proceso de detección de microfisuras en celdas mediante electroluminiscencia y en la Figura 17 un panel terminado.

Finalmente se cablean entre sí todas las cadenas de celdas en la parte posterior del panel y se sueldan todos los interconectores terminales a los buses de interconexión ya pegados sobre el sustrato. Para finalizar la integración del panel se colocan además sobre el sustrato dos termoresistencias de platino que brindarán información de temperatura del panel en vuelo (telemetría) y un par de resistores de descarga que garantizarán que los paneles solares y el satélite se mantengan equipotenciales frente a la carga electrostática del ambiente espacial.

## ■ ENSAYOS AMBIENTALES Y DE DAÑO POR RADIACIÓN

Los ensayos realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, permiten estudiar la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir su comportamiento al final de su vida útil, pudiéndose realizar entonces un diseño apropiado de los paneles solares de un satélite. En la industria espacial ensayar es siempre preferible a realizar simulaciones o estimaciones teóricas, otorgando mayor robustez y confiabilidad al desarrollo. Los ensayos ambientales a los que comúnmente se someten los componentes de un satélite son los de ciclado térmico y vacío dado que la ausencia de atmósfera en el espacio ocasionan temperaturas extremas, sobre todo en las partes



**Figura 16.** Detección de microfisuras en celdas mediante electroluminiscencia. La subcadena bajo inspección consiste de seis celdas soldadas en serie.



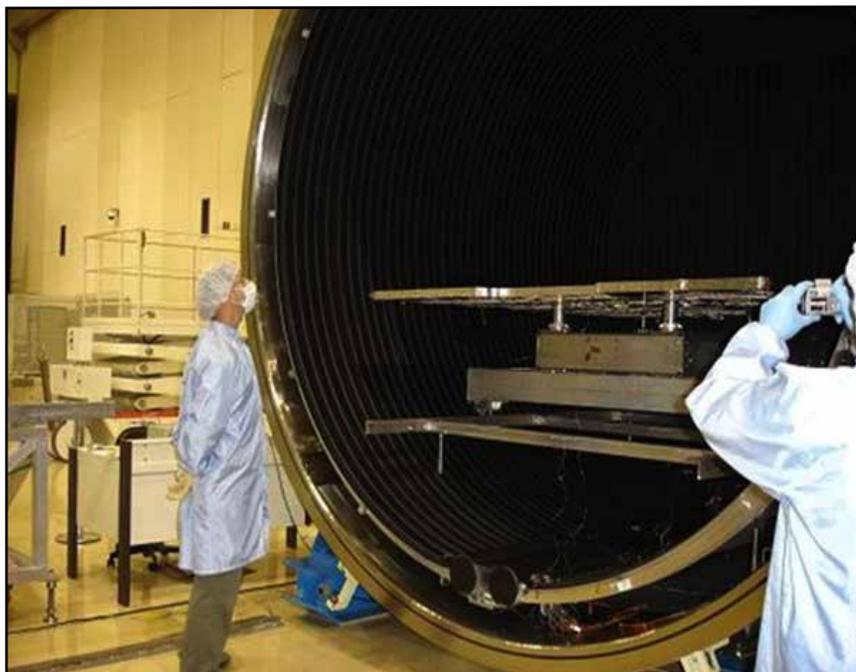
**Figura 17.** Uno de los tres paneles solares del SAOCOM 1B en el laboratorio de integración (CAC-CNEA). La potencia total del sistema de potencia es de 3584 W.

exteriores de un satélite. Por ejemplo, un panel solar expuesto al sol puede alcanzar temperaturas cercanas a  $+100^{\circ}\text{C}$  en la cara iluminada mientras que en sombra (cuando es eclipsado por la tierra) la misma

puede descender a valores cercanos a  $-100^{\circ}\text{C}$ . Estas enormes amplitudes térmicas pueden ocasionar que los componentes del panel solar fallen debido al continuo ciclo de dilatación-contracción que experimentan

junto con el sustrato por las variaciones de temperatura. Por ejemplo para un satélite de órbita LEO (Low Earth Orbit) se cumplen 16 de estos ciclos por día, lo que en una misión de cinco años implica cerca de 30.000 ciclos térmicos. En la figura 18 se muestra uno de los paneles solares de ingeniería de la misión SAC-D ingresando a una cámara de termovacío para realizar el ensayo de ciclado térmico. El objetivo de fabricar modelos de ingeniería es la de calificar y validar todos los procesos de integración y fabricación de los paneles solares sometidos posteriormente a ensayos ambientales y mecánicos.

Una característica distintiva del CAC es que se cuenta con el acelerador de iones pesados "Tandar" el cual nos permite realizar ensayos de daño por radiación en celdas y componentes electrónicos. Si bien el fabricante de celdas solares espaciales reporta la degradación en tensión y corriente (y por ende de potencia) que la celda tendrá para distintas fluencias de electrones de 1MeV ( $\text{e}/\text{cm}^2$ ), siempre es mejor tratar de re-



**Figura 18.** Panel de ingeniería del SAC-D ingresando a la cámara de termovacío en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE-Brasil) en 2010. Los ensayos realizados incluyeron ciclos de  $+85^{\circ}\text{C}$  a  $-100^{\circ}\text{C}$  de amplitud térmica.



**Figura 19.** Cámara de termovacío para ensayos de daño por radiación y línea de haz de protones de 10 MeV en el acelerador de iones "Tandar" del CAC-CNEA.

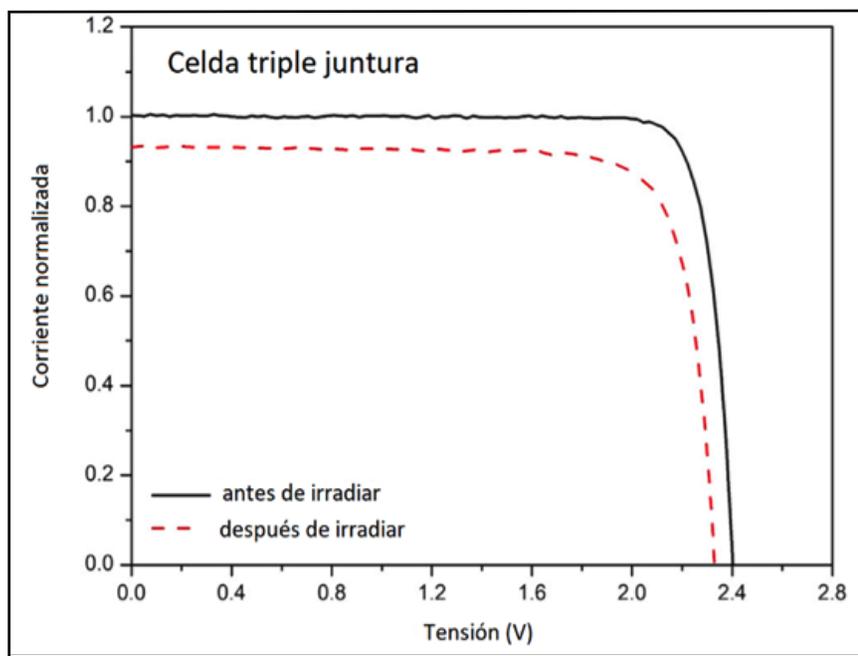
crear el ambiente espacial lo más parecido posible a las condiciones reales. En este aspecto, considerando que una importante cuota de la radiación de partículas provenientes del sol son protones de distintas energías contamos con la posibilidad de simular tales radiaciones en

la línea EDRA (ensayo de daño por radiación) (Figura 19). Esta línea de trabajo del Tandem cuenta con un haz de protones de 10 MeV y la fluencia del ensayo se iguala a la que recibiría en órbita el panel solar a lo largo de los cinco años de vida útil de la misión (Ibarra et al.). En la Figura 20 se muestra la diferencia entre los parámetros eléctricos de una celda solar de triple juntura antes y después de ser irradiada con una fluencia de  $3,6 \cdot 10^{11}$  protones por cada centímetro cuadrado de celda.

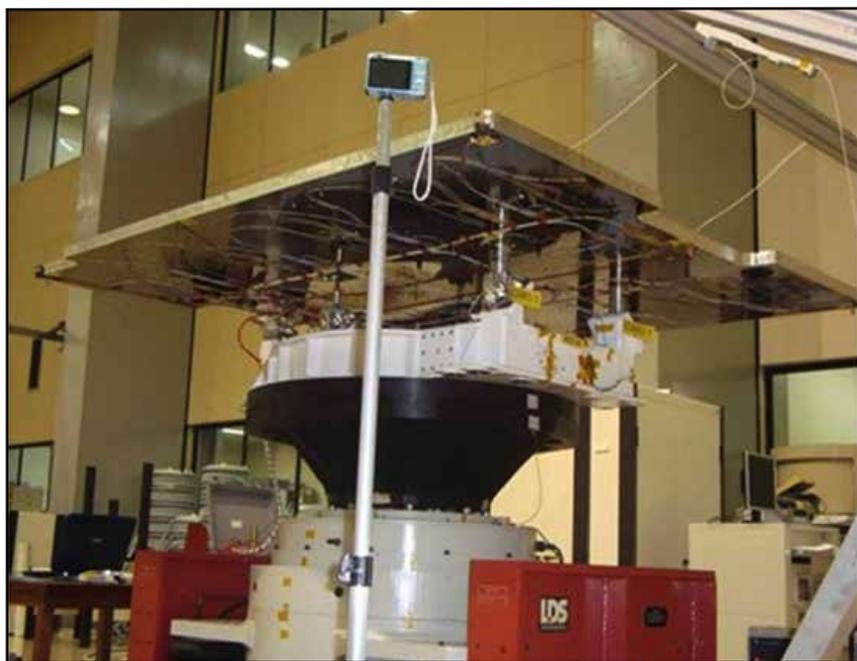
Por último, dado que durante el lanzamiento de un cohete se producen enormes ondas vibratorias y presiones acústicas dentro del mismo, es necesario someter a los paneles y al satélite a ensayos de vibraciones y acústicos a fin de garantizar su supervivencia al shock recibido durante la etapa de despegue y puesta en órbita. En la Figura 21 se muestra uno de los paneles solares de la misión SAC-D siendo vibrado durante su campaña de aceptación en Brasil.

## ■ DESARROLLANDO SENSORES SOLARES DE POSICIÓN

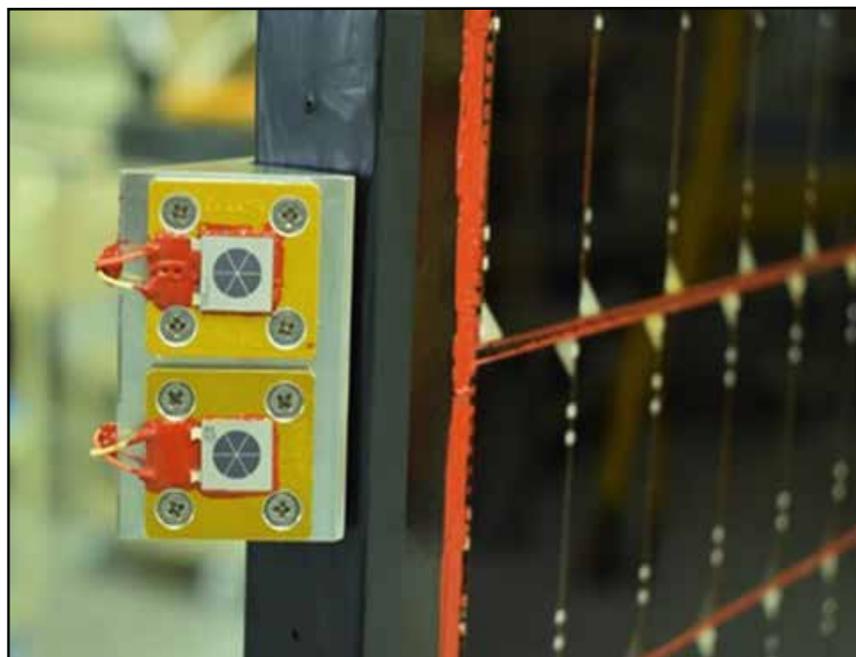
Los sistemas de control de posición angular de los satélites artificiales utilizan habitualmente sensores de radiación solar para determinar en forma aproximada dicha posición con respecto al Sol (Figura 22). A estos sensores se los denomina "sensores solares gruesos" (CSS, por sus siglas en inglés) y son una parte fundamental del sistema de orientación del satélite. Los sensores solares de posición son pequeñas celdas fotovoltaicas cuya corriente eléctrica es proporcional a la radiación solar incidente. De este modo, la señal de corriente generada por el sensor sigue fielmente la ley del coseno de modo que midiendo una corriente eléctrica en distintos sensores es posible determinar la posición del sol con respecto a los mismos. En las



**Figura 20.** Degradación de los parámetros eléctricos de una celda solar de triple juntura luego de ser irradiada con  $3.76 \times 10^{11}$  p/cm<sup>2</sup> protones de 10MeV. Al final de la vida útil (End Of Life) la generación de potencia cae un poco más del 10% con respecto a su valor BOL (Beginning Of Life). El dispositivo ensayado es una celda de triple juntura desarrollada en laboratorio.



**Figura 21.** Panel solar del SAC-D montado sobre un "shaker" para ensayos de vibraciones en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE-Brasil) en 2010.



**Figura 22.** Sensor solar de silicio fabricado en el DES-CNEA utilizado en las misiones SAOCOM 1A y 1B y en Aquarius/SAC-D.

misiones SAOCOM los paneles solares poseen 6 sensores gruesos que fueron diseñados y fabricados en uno de los laboratorios del Departamento Energía Solar de la CNEA. En este caso el proceso incluyó la difusión térmica de fósforo sobre una oblea de silicio y la deposición de los contactos metálicos de la cara frontal y posterior [Tamasi et al.].

## ■ EPÍLOGO

La energía solar fotovoltaica ofrece un amplio campo de trabajo que puede ir desde la investigación básica a la aplicación tecnológica. Si se tiene en cuenta el ámbito de investigación y desarrollo, se pueden explorar los distintos materiales de interés fotovoltaico y las mejoras que se pueden implementar en los dispositivos. Se puso énfasis en la explicación de la fabricación de celdas solares de silicio a nivel laboratorio, pero teniendo en cuenta también que distintos materiales involucran un proceso de fabricación diferente. A nivel laboratorio se puede elegir la propiedad o característica del dis-

positivo a estudiar o simular numéricamente. A este nivel puede o no ser necesario tener en cuenta si la aplicación de la celda solar va a ser terrestre o espacial.

Puede ocurrir que la necesidad de estudiar celdas o paneles solares surja a partir de una necesidad concreta tecnológica. Tal es el caso de las Misiones Satelitales Argentinas.

Con el objeto de disponer en el país de las herramientas de diseño, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para las misiones satelitales del Plan Espacial Nacional, la CNEA comenzó en el año 2001 una estrecha colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Como resultado, en el Departamento Energía Solar (DES) del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA se pudieron fabricar los paneles solares de las misiones SAC-D, SAOCOM 1A y 1B. Estos paneles son diseñados para satisfacer la demanda de energía eléctrica del satélite y de todos sus subsistemas.

Las descripciones realizadas en el trabajo, permiten una recorrida por el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales de ese departamento, un área limpia con temperatura y humedad controladas de 220m<sup>2</sup> de superficie clasificada como ISO7 ó clase 10.000, en la que se lleva a cabo la integración de los modelos de vuelo.

Por otra parte, también presentan los ensayos realizados en tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, que permiten conocer la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir su comportamiento al final de su vida útil. Estos ensayos ambientales a los que han sido sometidos los componentes de nuestros satélites son los de ciclado térmico y vacío dado que la ausencia de atmósfera en el espacio ocasionan temperaturas extremas. Un apoyo particular con que cuenta el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales lo da el acelerador de iones pesados "Tandar" del CAC que permite realizar ensayos de daño por radiación en celdas y componentes electrónicos. En particular, una línea de trabajo del Tandar cuenta con un haz de protones que permite recrear la importante cuota de la radiación de partículas provenientes del sol, protones de distintas energías y la fluencia del ensayo puede igualarse a la que recibiría en órbita el panel solar a lo largo de los cinco años de vida útil de la misión. Por otra parte, dado que durante el lanzamiento del vehículo espacial se producen enormes ondas vibratorias y presiones acústicas dentro del mismo, es indispensable someter a los paneles y al satélite a ensayos de vibraciones y acústicos a fin de garantizar su supervivencia al shock recibido durante la etapa de despegue y puesta en órbita.

Estudios en el laboratorio de las

celdas, integración de los paneles y ensayos ambientales de estos, son tres etapas indispensables para garantizar el éxito de conversión fotovoltaica.

## ■ REFERENCIAS

- Alurralde et. al. (2010) Integración y ensayos de los paneles solares de vuelo para la misión satelital aquarius/sac-d. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 14, 04.49. ISSN 0329-5184.
- Barrera M., Plá J., Rubineli F. (2007) Simulación numérica de celdas solares de GaAs. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 04.85.
- Barrera M., Rubinelli F., Rey-Stolle I., Plá J. (2012) Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code. *Physica B* 407, 3282.
- Basore P.A., Cabanas-Holmen K. (2011) PC2D: A Circular-Reference Spreadsheet Solar Cell Device Simulator. *IEEE Journal of Photovoltaics* 1, 72.
- Bruton T.M. (2002) General trends about photovoltaics based on crystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 72, 3.
- Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L. (1954) A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics* 25, 676.
- Choe K.S. (2014) Parametric simulation of the back-surface field effect in the silicon solar cell. *Solid State Sciences* 29, 48.
- ESA (European Space Agency) (2004) *Space engineering - Photovoltaic assemblies and components*, document ECSS-E-20-08A.
- Goetzberger A.G., Luther J., Willeke G. (2002) Solar cells: past, present, future. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 74, 1.
- Gray J., Wang X., Vamsi R., Chavali K., Sun X., Kanti A., Wilcox J.R. (2015) Adept 2.1 disponible en doi:10.4231/D39S1KM3S.
- Green M.A. (1986) *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System applications*. University of New South Wales.
- Green M.A., Dunlop E.D., Levi D.H., Ebinger J.H., Yoshita M., Ho-Bailie A.W.Y. (2019) Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics* 27, 565.
- Grossi Gallegos H. (2004) "Notas sobre radiación solar". Universidad Nacional de Luján - Departamento de Ciencias Básicas.
- NREL <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Ibarra M. L. et.al. (2019) E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space. *Radiation Physics and Chemistry* 154, 79–84.
- Luque A. y Hegedus S. editors (2011) *Handbook of photovoltaics*, John Wiley & Sons, Second Edition.
- McElheney P.J., Arch J.K, Lin H.S., Fonash S.J. (1988) Range of validity of the surface-photovoltage diffusion length measurement: A computer simulation. *Journal of Applied Physics* 64, 1254.
- Michael S., Bates A.D., Green M.S. (2005) Silvaco ATLAS as a solar cell modeling tool. Published in: *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 719.
- NASA (2004) *Solar Array Design, Development, and Evaluation for In House Spacecraft*, Directive N° 563-PG-8700.2.2A. *Procedures and Guidelines*.
- Norma i-v (2015) Norma IRAM 210013-2.
- Norma RE (2000) Norma IRAM 210013-12.
- Pieters B.E., Krc J., Zeman M. (2006) *Advanced Numerical Simulation Tool for Solar Cells - ASA5*. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 1513.
- Sze S.M. (1985) *Semiconductor devices. Physics and Technology*. John Wiley & Sons.
- Sinton R., Cuevas A. (1996) Contactless determination of current-voltage characteristics and minority carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. *Applied Physics Letters* 69, 2510.
- Stan M.A., Sharps P.R., Fatemi N.S., Spadafora F., Aken D., Hou H.Q. (2000) Design and production of extremely radiation-hard 26% InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells. *Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1374.
- Tamasi M., Martínez Bogado M., Bolzi C., Prario I., Alurralde M. (2009). *Sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D: desarrollo y ensayos ambientales*. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 23, 19-25.
- Vukadinovic M., Krc J., Brecl K., Smole F., Topic M. (2003) Mode-

lling and simulation of optoelectronic devices with ASPIN. The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool, Ljubljana, Slovenia, 474.

Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E. (1995) Applied photovoltaics. University of New South Wales.

## ■ GLOSARIO

[1] Diodo: es un dispositivo semiconductor que permite que la elec-

tricidad circule en un solo sentido. Consiste en la unión de dos regiones con características electrónicamente distintas (n y p).

[2] Dieléctrico: es un mal conductor de la electricidad.

[3] Kovar: es una aleación compuesta por hierro, níquel y cobalto diseñada para ser compatible con las características de dilatación térmica del vidrio.

[4] Laminado: proceso industrial por medio del cual se reduce el espesor de una lámina de metal o de materiales semejantes con la aplicación de presión.

[5] Kapton: es una película de polímero desarrollada por la empresa DuPont que se mantiene estable en un amplio rango de temperaturas. Se utiliza, entre otras cosas, en electrónica flexible y aplicaciones en satélites o naves espaciales.

# CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

## Un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños

**Palabras clave:** Hormigón Armado, Degradación, Corrosión, Diagnóstico.  
**Key words:** Reinforced Concrete, Degradation, Corrosion, Diagnosis.

En el presente trabajo se muestra un enfoque global del fenómeno de degradación de estructuras de hormigón armado, con especial énfasis en la corrosión de las armaduras. Se hace una breve descripción del material, de la forma en que se degrada, de los mecanismos básicos de la corrosión de las armaduras, de los factores que la desencadenan y de sus consecuencias. Se complementa el trabajo con una descripción de los procedimientos de diagnóstico más habituales.

The present work deals with general aspects of reinforced concrete structures degradation, with special focus on the corrosion of the reinforced steel bars. A brief description of the material, its forms of degradation, the basic corrosion mechanisms of the steel reinforcements, the factors that cause corrosion and its consequences, are addressed. The work is complemented with a description of the diagnostic procedures commonly used.

■ **Gustavo S. Duffó y Silvia B. Farina\***

Gerencia Materiales, Departamento Corrosión,  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas  
y Técnicas  
Universidad Nacional de San Martín

\*E-mail: farina@cnea.gov.ar

El hormigón es uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción actual. Su empleo va desde pequeñas reparaciones hasta grandes obras civiles que comenzaron a construirse desde principios del siglo XX con el comienzo de la fabricación industrial del cemento Portland, pasando por la mayoría de edificios y viviendas del mundo entero. Para tener una idea del consumo anual de este material, basta decir que es 5 veces mayor que el del acero. Esto se debe a su gran versatilidad en formas, acabados y tamaños; excelentes propiedades mecánicas; elevada durabilidad frente a determinados agentes que resultan agresivos para otros materiales; fácil disponibilidad y bajo costo relativo. Las primeras construcciones de hormigón arma-

do datan de mediados del siglo XIX. Eran elementos parciales de algunas construcciones como terrazas y macetas jardineras. Las dos primeras décadas del siglo XX fueron una etapa de búsqueda, estudio y prueba y a partir de la década del 30 se extendió notoriamente el uso del hormigón armado en construcciones civiles, viales y estructurales en general (Grunau, 1992). En nuestro país, entre las primeras construcciones de hormigón armado, podemos citar el edificio Kavanagh, torre de departamentos situada en el barrio de Retiro, inaugurado en el año 1936, y que fue en su momento el edificio de hormigón armado más alto de Sudamérica. De esa misma época data el Obelisco de la ciudad de Buenos Aires, monumento hueco de hormigón armado que se halla en

la Plaza de la República.

El hormigón es, por su naturaleza, un sistema heterogéneo constituido esencialmente por una matriz endurecida (mezcla del cemento, arena y agua) en la que se sitúan internamente partículas o fragmentos de áridos (generalmente canto rodado o piedra granítica). El resultado es un material que presenta una estructura porosa, la cual desempeña un papel muy importante en las propiedades mecánicas y en su durabilidad. Por su parte, el hormigón armado (o reforzado) es una matriz de hormigón que contiene barras de acero en su interior (armaduras). Las excelentes propiedades de este material se deben a la combinación de la resistencia a la compresión, propia del hormigón, y a la

alta resistencia a la tracción que le transfiere el acero (Gani, 1997). Las armaduras empleadas en el hormigón armado pueden utilizarse como barras de acero (lisas o aleteadas), alambres de acero o mallas de acero soldadas. El acero utilizado debe cumplir, como mínimo, con determinadas características mecánicas que incluyen límite de fluencia, resistencia a la tracción, alargamiento porcentual de rotura, aptitud al doblado y desdoblado, entre otros requisitos adicionales que pueden ser exigidos dependiendo de la aplicación, como ser soldabilidad y resistencia a la fatiga. Actualmente esas características están indicadas en las normas del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales conjuntamente con el Instituto Argentino de Siderurgia. Ellas son la norma IRAM-IAS U500-528 de carácter general y la norma IRAM-IAS U500-207 para las armaduras sometidas a soldadura. La composición química establecida en el primer caso limita el contenido máximo de P y S; y en el segundo agrega al N y limita el contenido de C (0,24%).

Además de las ventajas estructurales que resultan de la combinación de ambos materiales (hormigón y armaduras de acero), el hormigón actúa como barrera física de las armaduras respecto del medio ambiente y posee características químicas que le ofrecen al acero una apropiada protección contra la corrosión. No obstante ello, con el tiempo el hormigón armado se deteriora, tanto debido a procesos de degradación del propio hormigón, como a la corrosión de las armaduras. Las causas de la degradación han sido ampliamente estudiadas y, si bien se conocen los métodos para evitar fallas catastróficas, la realidad es que los accidentes siguen ocurriendo y en la mayoría de los casos se deben a la falta de conocimiento de las medidas de precaución así como, mucho

más tristemente, a la negligencia (Biczók, 1981; Rostam, 1992).

Contrariamente a la creencia popular, el hormigón es un material extremadamente complejo y su comportamiento en servicio depende de los materiales utilizados para su fabricación, de los procesos de elaboración, de la estructura de la cual forma parte y del medio ambiente en el cual se encuentra emplazado. A continuación se describirán los principales modos de degradación del hormigón, la corrosión de las armaduras, las consecuencias que conlleva el ignorar estos fenómenos y la forma de evaluarlos y mitigarlos.

### ■ DEGRADACIÓN DEL HORMIGÓN

El cemento (componente del cual depende mayoritariamente la química del hormigón) es una mezcla de minerales, principalmente silicatos de calcio, que cuando reaccionan con el agua se endurecen por hidratación de los distintos compuestos que lo constituyen. Durante

este proceso de hidratación ocurren varios fenómenos. En principio, se conforma la red de silicatos que determina la resistencia mecánica del hormigón. A su vez, se evapora paulatinamente el exceso de agua agregada durante el amasado para hacer trabajable las mezclas, lo cual genera una red de poros y canales que llegan hasta la superficie del hormigón. Los álcalis provenientes de las materias primas así como el hidróxido de calcio segregado durante la hidratación llevan al pH de la fase acuosa de los poros a valores extremadamente alcalinos, generalmente mayores que 13 (Taylor, 1978; Hewlett, 1998).

Estos procesos determinarán en gran medida el desempeño final del material, por lo cual la formulación, ejecución y curado del hormigón deben ser cuidadosos (Mehta, Monteiro 2006). Por ejemplo, la cantidad de agua agregada tiene una gran influencia sobre la calidad del hormigón obtenido. Esto es debido a que la cantidad de agua añadida a la mezcla de áridos y cemento para

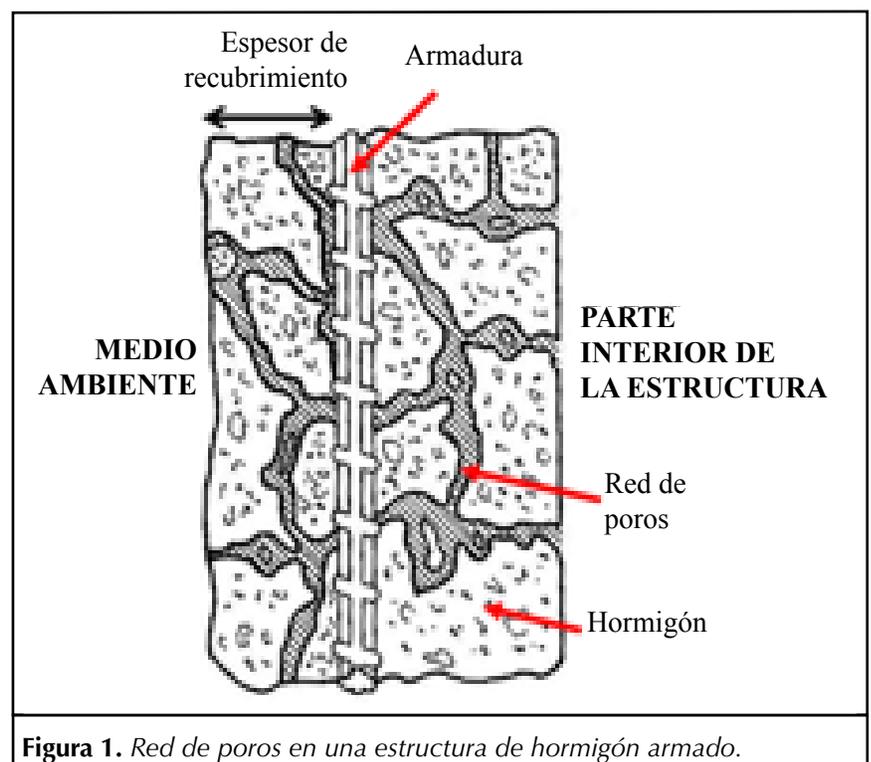


Figura 1. Red de poros en una estructura de hormigón armado.

obtener un hormigón de trabajabilidad conveniente, es mayor a la necesaria para la hidratación completa del cemento anhidro. Sin embargo, se debe evitar su exceso porque aumentará la porosidad del hormigón endurecido y con ello disminuirá su resistencia a la compresión. Posteriormente, la red de poros originada durante el curado hace que el hormigón sea relativamente permeable a líquidos y gases (Figura 1).

Respecto al agua empleada en la fabricación del hormigón, no solo se debe tener en cuenta su cantidad, sino también su calidad. En general cualquier agua potable es aceptable para su uso en la elaboración de hormigones. Pero la existencia de impurezas en dichas aguas puede tener también influencia negativa en los procesos de fraguado, durabilidad y estabilidad de volumen. Con respecto a la utilización de agua de mar, es de destacar que el contenido de sal de la misma tiende a causar un fraguado más rápido y ganancia en la resistencia inicial debido a la acción de los cloruros presentes, pero la resistencia final se reduce entre un 10 y un 20% comparado con los hormigones elaborados con agua potable. Además, la presencia de cloruros incrementa el riesgo de corrosión del refuerzo de acero en los hormigones armados, como se verá más adelante.

El tamaño de los poros puede variar desde unos pocos nanómetros hasta algunos milímetros. El volumen y su distribución dependerán fundamentalmente de la relación agua/cemento de la mezcla, la forma y el tiempo de curado, la introducción de aire en la mezcla, etc. Esta incorporación de aire está orientada a disminuir la permeabilidad, ya que el proceso de evaporación del agua en exceso culmina en las burbujas de aire, evitando la formación de canales que llegan hasta el me-

dio externo. En una primera aproximación, la resistencia mecánica del hormigón es directamente proporcional al contenido de cemento e inversamente proporcional a la porosidad. Cualquier reducción en la relación agua/cemento mediante el uso de mezclas y granulometrías adecuadas, o agentes fluidificantes, repercutirá en una elevación de la resistencia mecánica y de la impermeabilidad. Las nuevas tecnologías aplicadas al hormigón se basan en reducir al máximo la porosidad.

A pesar de su aspecto robusto, el hormigón puede sufrir varios procesos, tanto físicos como químicos, que conducen a su deterioro (Bentur *et al.*, 1997; Irrasar, 2001; Pedferri *et al.*, 2004).

Dentro del deterioro físico, cabe destacar la fisuración provocada por esfuerzos mecánicos de distinta índole (terremotos, por ejemplo), erosión mecánica (acción de vientos o flujo de líquidos) y el denominado "ataque por escarcha". Este último tipo de ataque se produce por la acción de bajas temperaturas (inferiores a la de solidificación del agua) sobre el hormigón. Esto es frecuente en la Argentina en la zona cordillerana y patagónica ya que se presenta esta condición durante varios meses al año. Pero además, estas bajas temperaturas también se presentan en algunas estructuras industriales como cámaras frigoríficas, donde el hormigón puede estar sometido a temperaturas aún más rigurosas. La acción de las bajas temperaturas se manifiesta por el congelado del agua de los poros capilares del hormigón. Es sabido que el agua sólida ocupa un volumen casi 10% mayor que el del agua líquida y esto, cuando ocurre dentro de los poros, genera un aumento en la presión hidráulica provocada por su expansión que conduce a la formación de fisuras. Este tipo de ataque puede

ser minimizado o bien por la reducción del volumen de poros capilares en el hormigón empleando una relación agua/cemento más baja, o por la entrada deliberada de aire al hormigón. El uso de agentes de aireado conduce a la formación de una alta concentración de pequeñas burbujas de aire en el hormigón. Estas burbujas pueden servir para relevar la presión que es el resultado de la formación del hielo dentro de los poros capilares, y de esta forma se previene la expansión y fisurado del hormigón. En aquellas zonas donde es habitual la formación de hielo sobre el pavimento, suelen utilizarse agentes anticongelantes a base de cloruro de calcio o de sodio que -si bien tienden a evitar o mitigar el deterioro por congelación y deshielo- aceleran el deterioro superficial del pavimento de hormigón por descascamiento. También estas sales provocan la corrosión de armaduras (como se verá más adelante) afectando sobre todo a los tableros de puentes y losas de edificios de estacionamiento, estas últimas por la presencia de cloruros debido al transporte y su posterior deposición a través de los neumáticos de los vehículos.

Dentro de los deterioros de origen químico cabe destacar el ataque por aguas blandas, el ataque por sulfatos, el ataque ácido y la reacción álcali-agregado, entre otros.

El agua blanda contiene muy bajas cantidades de iones calcio o magnesio disueltos, y generalmente son levemente ácidas (pH menor que 7). Su agresividad frente al hormigón depende del grado de dureza y de la cantidad de dióxido de carbono libre presente. El deterioro del hormigón en contacto con aguas blandas se produce primeramente porque el agua extrae del hormigón a las especies responsables del mantenimiento de su alto pH. Esto, a su vez, puede

llevar a la descomposición de otros componentes del hormigón que solo son estables a pH altos, tales como los silicatos hidratados, que se descomponen produciendo carbonato de calcio y una red llena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), de muy pobres propiedades mecánicas. Este fenómeno no sólo ocurre en hormigones sumergidos, ya que también puede ser un problema en hormigones expuestos al agua de lluvia. La magnitud de la lixiviación en aguas blandas está influenciada por muchos factores, entre los que se incluyen la dureza del agua (contenido en iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), velocidad del flujo de agua, densidad del hormigón y el estado de su superficie.

El ataque por sulfatos, que ocurre en hormigones en contacto con aguas conteniendo altas concentraciones de este ion o enterrados en suelos arcillosos, se debe a la presencia en el cemento de un componente denominado aluminato de calcio, que al reaccionar con el ion sulfato se descompone generando cristales de "etringita", cuyo volumen es mucho mayor que el del aluminato descompuesto. Estos cristales de "etringita" generan una expansión interna en la masa del hormigón que, al no soportar tensiones de tracción, termina fisurándose.

La acción de los ácidos sobre el hormigón genera la conversión de los compuestos de calcio (hidróxido de calcio, silicatos y aluminatos de calcio hidratados) en las correspondientes sales de calcio, generalmente solubles. Como resultado de esas reacciones, se destruye la estructura del hormigón. La velocidad de la reacción de los diferentes ácidos con el hormigón está determinada no tanto por la agresividad del ácido, sino más bien por la solubilidad de la sal de calcio resultante. A mayor solubilidad de la sal, mayor será el grado de deterioro. De los ácidos

minerales más comunes (clorhídrico, nítrico y sulfúrico), el ácido sulfúrico es el que más frecuentemente se encuentra en aguas subterráneas. Puede ser generado por la acción oxidante de ciertas bacterias sobre compuestos de azufre. El ácido producido reaccionará con el hormigón degradándolo. Este tipo de deterioro es muy frecuente en estructuras de hormigón enterradas. También ocurre este tipo de ataque en cañerías de hormigón de sistemas cloacales, ya que, cuando su contenido queda estancado o fluye muy lentamente, la acción de ciertas bacterias puede producir sulfuro de hidrógeno gaseoso, que se disuelve en la superficie del agua, donde otras bacterias lo oxidan convirtiéndolo en ácido sulfúrico. Es por ello que resulta esencial mantener un flujo permanente de aguas cloacales de modo tal que estas bacterias no tengan tiempo de actuar.

Otra forma de degradación del hormigón es la conocida como reacción álcali-agregado, la cual se produce debido a que los agregados silíceos porosos finamente divididos (arenas, por ejemplo) son muy reactivos ya que tienen un área específica muy grande. En contacto con álcalis (los hidróxidos presentes en el agua de los poros) puede ocurrir una reacción de la cual el producto es un gel rico en silicato de sodio o potasio que es capaz de absorber cantidades grandes de agua y que causan la hinchazón del gel. Este gel completamente hinchado produce un aumento de la presión que culmina con la fisuración del hormigón, similar a lo que ocurre en el ataque por sulfato.

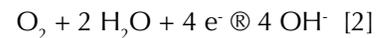
### ■ CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN EL HORMIGÓN

La corrosión de las armaduras de acero en el hormigón armado es una de las causas más frecuente de deter-

rioro de estructuras construidas con este material. La corrosión del acero (que químicamente se lo puede considerar como hierro) en el hormigón es un proceso electroquímico en el cual, el electrolito es la humedad presente (Duffó, Farina 2016). Las reacciones electroquímicas involucradas son la disolución u oxidación del hierro, dando lugar al denominado proceso anódico



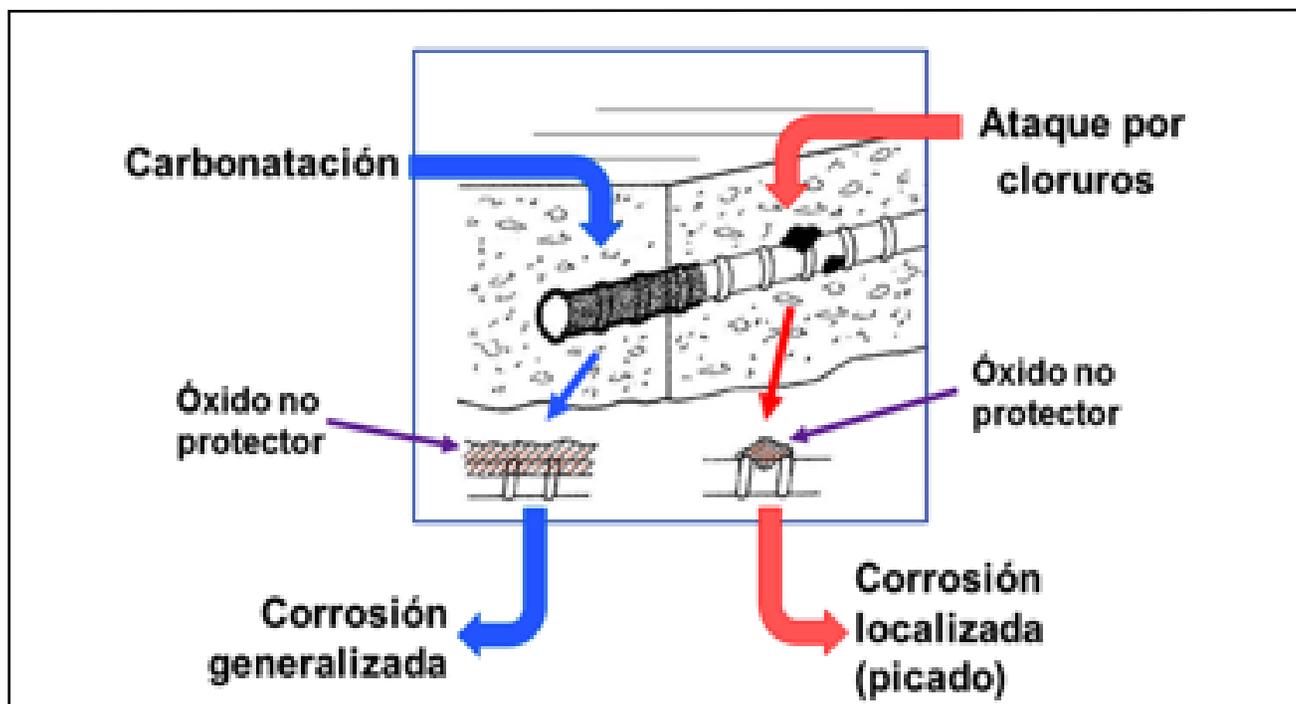
y la reducción del oxígeno presente sobre las armaduras, dando lugar al proceso catódico



Es importante resaltar que, sin la presencia simultánea de oxígeno y humedad, la corrosión no es posible, y que por debajo de una cierta cantidad crítica de ambos, la corrosión se presenta de manera poco apreciable.

En las condiciones de pH existentes en un hormigón "sano" (entre 12,6 y 14), y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra "pasivado", esto es, recubierto por una película de óxidos transparente, compacta y continua de aproximadamente 1 a 100 nanómetros de espesor, que lo protege de la corrosión siempre y cuando el hormigón sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambien sus propiedades fisicoquímicas por agresiones externas. Por tal motivo, entre otras propiedades de la estructura, es necesario que el espesor del recubrimiento (capa de hormigón entre el medio ambiente y la primera fila de armaduras) sea el adecuado para cada ambiente al que esté expuesta la estructura.

No obstante lo expuesto, bajo ciertas condiciones, la película protectora se destruye originando deter-



**Figura 2.** Tipos de corrosión más frecuentes en estructuras de hormigón armado, origen y consecuencias.

minados procesos corrosivos cuyas características dependen de cuál es el agente causante. Las principales causas de corrosión son la disminución de la alcalinidad del medio que conduce a la corrosión generalizada de la armadura; y la presencia de iones cloruro provenientes del medio externo o incorporados durante la etapa de amasado del hormigón, que conducen a la corrosión localizada del acero (Figura 2).

La corrosión generalizada se produce por un descenso en la alcalinidad del hormigón que puede ser debido al contacto con aguas blandas (mencionado más arriba), o por la reacción de los compuestos de carácter alcalino de la fase acuosa del hormigón ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  y  $\text{Ca(OH)}_2$ ) con los componentes ácidos de la atmósfera ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.). El más abundante es el  $\text{CO}_2$ , por lo que a este proceso de reducción de la alcalinidad se lo conoce genéricamente con el nombre de "carbonatación". Una característica de este proceso es la existencia de un frente de avance que se puede apre-



**Figura 3.** Determinación del espesor de la zona carbonatada por medio del rociado con fenolftaleína de la estructura a analizar.

ciar visualmente mediante la coloración con fenolftaleína, que produce una coloración rojo púrpura en la zona correspondiente al hormigón "sano", pH mayor que 12,6; y se torna incolora en la zona carbonatada, pH menor que 9 (Figura 3).

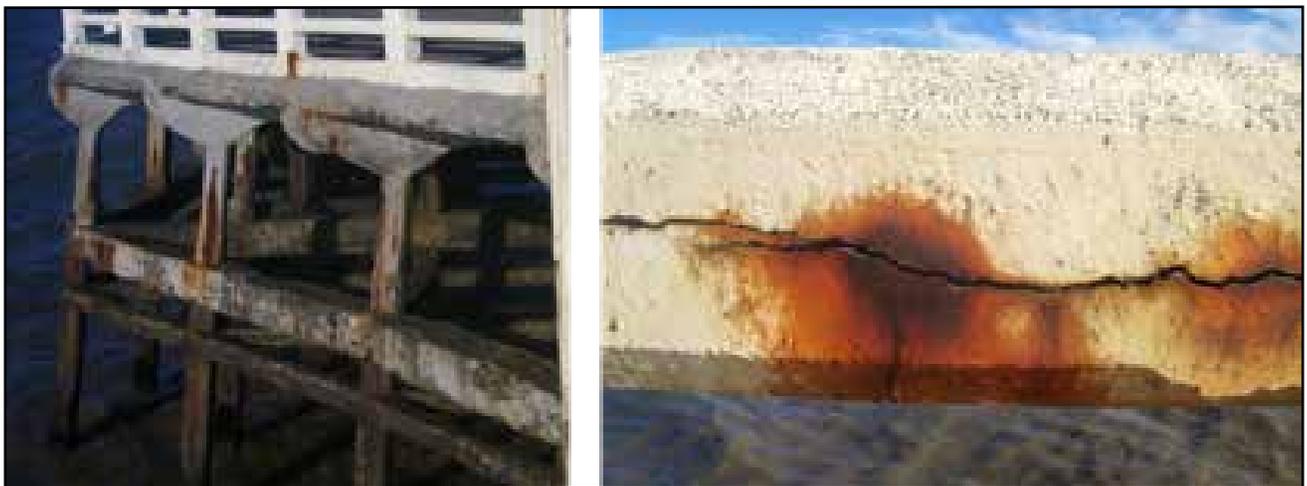
Al disminuir el pH hasta valores por debajo de 9, la película pasiva deja de ser estable; pasando a ser termodinámicamente posible la disolución del hierro, de forma tal que la armadura se disuelve en forma generalizada. Los productos de corrosión (óxidos, hidróxidos, óxidos

hidratados, etc.) tienen un volumen más que 6 veces mayor que el del hierro del cual provienen, por lo cual ejercen presión sobre la cubierta del hormigón hasta provocar fisuras, descascamientos y delaminaciones (Figura 4).

Por su parte, la corrosión localizada es un tipo de corrosión en la que el ataque se produce en zonas muy pequeñas, en algunos casos difíciles de detectar, donde la cantidad de material disuelto no guarda ninguna relación con el daño que puede ocasionar (Galvele, Duffó 2006).



**Figura 4.** Efecto de la carbonatación sobre diferentes estructuras de hormigón armado (izquierda: techo de un estacionamiento subterráneo; derecha: viga de un edificio departamento).



**Figura 5.** Corrosión de las barras de refuerzo en el hormigón armado debido a la presencia de cloruro. Las imágenes corresponden a estructuras en contacto con agua de mar. (izquierda: muelle que muestra la presencia de manchas sobre la superficie del hormigón; derecha: fisuración causada debido a la formación de productos de corrosión del hierro).

Para el caso del hormigón, hay varios agentes desencadenantes de la corrosión localizada, pero los más habituales son los iones depasivantes (que generan ruptura de la película pasiva) y que provienen de las materias primas, de aditivos o por la penetración desde el exterior. La situación más agresiva y la responsable del mayor número de casos de corrosión localizada en el hormigón armado es debida a la presencia de cloruros. Aunque los iones sulfuro y sulfato son también depasivantes, son mucho menos frecuentes; y, por

ende, menos peligrosos que los cloruros.

Los iones cloruro tienen la propiedad de destruir en forma puntual la capa pasivante, lo que provoca un tipo de corrosión denominado "picado". Los cloruros pueden estar en el hormigón, bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua, etc.) o bien porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta última situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales de deshie-

lo en carreteras o puentes en climas fríos. El límite inferior de contenido de cloruros, por debajo del cual no existe la posibilidad de la aparición de picado depende de varios factores como ser el tipo de cemento, relación agua/cemento, contenido de humedad, etc., pero un valor medio generalmente aceptado es de 0,4% en relación al peso de cemento.

Aunque el hormigón no contenga cloruros inicialmente, éstos pueden llegar hasta la armadura a través de la red de poros si la estruc-

tura está situada en ambientes marinos, por ejemplo. En estos casos, la cantidad de cloruros que ingresa se va incrementando con el tiempo, pudiendo llegar a atacar toda la superficie de la armadura y provocar un tipo de corrosión muy peligrosa. En todos los casos, una vez que se inicia el fenómeno de picado, éste no se puede detener y comienzan a acumularse productos de corrosión que expanden al hormigón fisurándolo (Figura 5).

Es importante destacar que es necesaria la presencia de humedad para que todos estos fenómenos de corrosión tengan lugar ya que el agua es imprescindible porque no solo permite la movilidad de los iones a través del electrolito, sino que también interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno en medios neutros o básicos a través de la reacción [2]. Si los poros están saturados de humedad, las velocidades de corrosión serán moderadas o bajas porque el acceso de oxígeno hasta las armaduras (para que pueda ocurrir la reacción catódica) está dificultado por la presencia de agua. Por el contrario, si los poros están secos, el oxígeno tiene fácil acceso a la estructura, pero no hay agua disponible para que la reacción [2] pueda ocurrir. Las máximas velocidades de corrosión se manifiestan en hormigones con contenidos altos de humedad, pero sin saturación de poros. En este caso, el oxígeno llega libremente hasta las armaduras, y el contenido de agua es suficiente como para permitir altas velocidades de corrosión.

### ■ CONSECUENCIAS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

La corrosión se manifiesta sobre el acero disminuyendo su capacidad mecánica al disminuir su diámetro (y con ello su sección eficaz); sobre el hormigón, porque se fisura



**Figura 6.** Diagrama de Tuuti correspondiente a los periodos de iniciación y propagación del ataque corrosivo en una estructura de hormigón armado.

debido a la presencia de productos de corrosión más voluminosos que el acero que lo origina; y sobre la adherencia acero/hormigón, que impide que se ponga de manifiesto el efecto benéfico que tiene sobre las propiedades mecánicas de la estructura el contacto íntimo entre el hormigón y el acero.

Cuando no se toman los recaudos suficientes, las pérdidas ocasionadas por la corrosión de las armaduras de hormigón suelen ser catastróficas. El fenómeno no sólo afecta a edificios y puentes, con la consiguiente pérdida económica, sino que también atenta contra la seguridad y la vida de las personas. Muchas veces escuchamos la triste noticia de que el balcón de un edificio se desmoronó, el techo de una pileta climatizada se cayó y otros accidentes con consecuencias fatales. En muchos casos se trata de problemas evitables durante el diseño de la estructura (por ejemplo, disponer de un suficiente espesor de recubrimiento en el caso de balcones), o de mantenimiento durante su uso (por ejemplo, la protec-

ción extra que necesita el techo de una pileta que se encuentra en un ambiente con mayor cantidad de cloruro que el habitual). Finalmente, los problemas de corrosión en las viviendas tales como la aparición de manchas de óxidos, generación de fisuras y pequeños desmoronamientos de material, si bien pueden no comprometer la estabilidad de la estructura, afean la vivienda y la desvalorizan.

### ■ PROCEDIMIENTO DE DIAGNÓSTICO

Uno de los mayores desafíos para los ingenieros estructurales es determinar la magnitud del ataque corrosivo en una estructura dada, a fin de intervenir en su reparación. Una de las mejores maneras de correlacionar la magnitud del daño por corrosión y la durabilidad de las estructuras, está dado por el diagrama de Tuuti (Figura 6). En él se grafica la magnitud del ataque corrosivo en función del tiempo (Tuuti, 1982). Dicho diagrama consta de dos regiones bien diferenciadas entre sí:

el período de inducción y el período de propagación.

Durante el período de inducción, el ataque corrosivo es despreciable, pero a través de procesos mayoritariamente difusivos, van ingresando al hormigón las especies agresivas (principalmente  $\text{CO}_2$  y cloruro, como se mencionó anteriormente). La duración del tiempo de inducción depende fundamentalmente de los parámetros de transporte de dichas especies (coeficientes de difusión, entre otros). El período de inducción finaliza cuando las especies agresivas llegan hasta las armaduras de acero, es decir, atravesaron completamente el espesor de recubrimiento, y rompen la pasividad (en forma generalizada o localizada), dando comienzo al proceso corrosivo. A partir de dicho instante, se entra en el período de propagación donde se pone de manifiesto el ataque. La velocidad a la cual se manifestará dicho ataque dependerá de factores tales como el contenido de humedad en la estructura, la presencia de oxígeno, la temperatura, la relación  $\text{Cl}/\text{OH}$ , etc. Una vez iniciado el proceso corrosivo, a menos que se intervenga en la estructura, no se lo puede detener. Luego, la

vida útil de la estructura, estará dada por la máxima profundidad de ataque corrosivo aceptable (que dependerá de factores estructurales, principalmente).

A efectos de poder determinar el grado de deterioro que presenta una estructura de hormigón armado que se sospecha puede estar afectada por corrosión, se debe realizar una inspección de la estructura que puede ser del tipo visual o complementada con diversas técnicas que se emplean *in-situ* o en laboratorio (Andrade, 1988).

Esta inspección puede contar con diversos pasos, siendo los más usuales los que se describen a continuación:

a- Observación visual. Es importante para la detección de manchas de óxido, fisuras en el hormigón y/o regiones con delaminación o desprendimientos del recubrimiento de hormigón. La primera manifestación de que un proceso de corrosión está en marcha, es la aparición de manchas de óxido en la superficie, que aparecen paralelas a la dirección de las barras de refuerzo (Figura 7).

Como se mencionó más arriba, la corrosión genera ciertos productos de corrosión cuyo volumen es varias veces superior al acero que lo genera, lo que origina tensiones de tracción. Recordando que el hormigón tiene una resistencia a la tracción nula o escasa, el paso siguiente es la aparición de fisuras paralelas a las barras de refuerzo y, si este proceso no se detiene a tiempo, el siguiente estadio es la delaminación del recubrimiento de hormigón (Figura 8).

En algunos casos es posible que, si la estructura de hormigón está muy húmeda, solo se detecten manchas de óxido, sin la presencia de sectores delaminados o fisurados.

b- Localización de las armaduras. Localizar las armaduras desde el exterior de la estructura y determinar la cantidad de las mismas y su diámetro es de vital importancia para poder evaluar la capacidad de soportar cargas del componente estructural afectado por problemas de corrosión.

La manera de establecer la localización de las armaduras es por medio de un equipo llamado "pácómetro" que detecta la posición de



**Figura 7.** Manchas de óxido a lo largo de las barras de refuerzo en una estructura de hormigón armado.



**Figura 8.** Delaminación del recubrimiento de hormigón debido a la presión generada por los productos de corrosión de las armaduras.

las mismas mediante campos electromagnéticos. Es un caso particular de los denominados “detectores de metales”. Si se conoce con cierta precisión el diámetro de las armaduras, es posible estimar el espesor de recubrimiento de hormigón (Figura 9).

c- Medición de la resistividad eléctrica del hormigón. Como se mencionó más arriba, la resistividad del hormigón es función de la distribución de poros, su contenido de humedad y la presencia de especies iónicas. Se disponen de diversas técnicas para su medición, siendo la más habitual la denominada “de las cuatro puntas” (conocida también como método de Wenner). El principio básico de este método es la inyección de una corriente entre dos electrodos y la medición del potencial generado entre otros dos electrodos simétricamente ubicados. La resistividad resulta de la relación entre ambos parámetros. A partir del valor de resistividad medido, es posible por medio del empleo de tablas de referencia, conocer la agresividad del hormigón para la corrosión de las armaduras. En la Tablas 1 y 2 se muestran, a modo de ejemplo, dos de las recomendaciones sugeridas en la literatura.

d- Medición del potencial de corrosión. El valor del potencial de corrosión permite determinar, de manera cualitativa, cuál es el estado de corrosión de las armaduras (activo, pasivo o indefinido). Para su medición, se hace un contacto eléctrico con las armaduras, se utiliza un electrodo de referencia (habitualmente se emplea uno de cobre/sulfato de cobre saturado) y se mide el potencial entre las armaduras y el electrodo de referencia con un voltímetro de alta impedancia (Figura 10). La manera habitual de interpretar los resultados es hacer empleo de la norma ASTM C 876 (Tabla



**Figura 9.** Localización de las armaduras por medio de un “pacómetro”.

3), aunque análisis más complejos (Tabla 4) que incluyan datos relacionados con la concentración de cloruro, presencia de oxígeno, pH y contenido de humedad basado en la humedad relativa ambiente pueden llevar a predicciones más precisas (Troconis de Rincón *et al.*, 2006).

e- Medición de la velocidad de corrosión de las armaduras. La velocidad de corrosión de las armaduras es la única propiedad del sistema que permite establecer relaciones cuantitativas con el grado de deterioro de la estructura, ya que su medición provee el valor instantáneo de la velocidad del deterioro en términos de disminución del diámetro (o de la sección efectiva) de las armaduras (Fontana, 1986). Hay varias técnicas y equipos comerciales que permiten su determinación (Figura 11).

Conocido el valor de la velocidad de corrosión y su evolución

con el tiempo, es posible emplear normas o recomendaciones que dan cuenta de la peligrosidad del valor

obtenido. La de empleo más habitual en el ámbito latinoamericano, es la provista por el Manual de Ins-



**Figura 10.** Medición del potencial de corrosión de las armaduras con un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado y un multímetro de alta impedancia.

**Tabla 1:**

Probabilidad de corrosión en función de la resistividad del hormigón según Mc Carter *et al.*, 1983.

Resistividad (kΩ.cm)	Probable velocidad de corrosión
< 5 kΩ.cm	Muy alta
5 a 10 kΩ.cm	Alta
10 a 20 kΩ.cm	Moderada/baja
> 20 kΩ.cm	Baja

**Tabla 2:**

Probabilidad de corrosión en función de la resistividad del hormigón según Andrade, Alonso., 2001.

Resistividad (kΩ.cm)	Probable velocidad de corrosión
> 100 - 200 kΩ.cm	Hormigón muy seco. No permite distinguir entre acero al estado activo o pasivo. Las velocidades de corrosión serán muy bajas independientemente del contenido de cloruros y del nivel de carbonatación
50 - 100 kΩ.cm	Bajas velocidades de corrosión
10 - 50 kΩ.cm	Moderada a alta velocidad de corrosión si el acero está activo en hormigones carbonatados y/o contaminados con cloruro
< 10 kΩ.cm	La resistividad no es un parámetro que controle la velocidad de corrosión

<b>Tabla 3:</b> Probabilidad de corrosión en función del potencial de corrosión de las armaduras ( $E_{corr}$ ) medido contra un electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado ( $Cu/SO_4$ ).	
$E_{corr}$ (V <sub>Cu/CuSO<sub>4</sub></sub> )	Probabilidad de corrosión
< -0,350	> 95 % (estado activo)
-0,200 a -0,350	aprox. 50% (estado indefinido)
> -0,200	< 5 % (estado pasivo)

<b>Tabla 4:</b> Riesgo de daño en función del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y condiciones medioambientales. HR: humedad relativa ambiente.			
Condición	$E_{corr}$ (V <sub>Cu/CuSO<sub>4</sub></sub> )	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	0,270 a -0,200	Sin Cl <sup>-</sup> , pH > 12,5, H <sub>2</sub> O (HR↑)	Despreciable
Corrosión localizada	-0,2 a -0,452	Cl <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HR↑	Alto
Corrosión uniforme	-0,150 a -0,600	Carb., O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HR↑	Moderado – Alto
	0,200 a -0,150	Carb., O <sub>2</sub> , Seco, HR↓	Bajo
	-0,400 a -0,600	Carb. o ↑Cl <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O, HR↑	Alto
Corrosión uniforme	< -0,600	↑Cl <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O, sin O <sub>2</sub>	Despreciable



**Figura 11.** Equipo comercial que permite la medición de la velocidad de corrosión de las armaduras.

pección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado, desarrollado bajo el auspicio del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Troconis de Rincón *et al.*, 2006), que se muestra en la Tabla 5.

e- Extracción de testigos de hormigón. La extracción de testigos se lleva a cabo con una máquina perforadora que emplea una broca de diamante refrigerada con agua, y que permite extraer testigos de 5 o 10 cm de diámetro (Figura 12). Estos testigos son empleados *in-situ* o en el laboratorio para la determinación de la profundidad del frente carbonatado y la concentración de iones cloruro.

f- Medición de la profundidad de carbonatación. La determinación de la profundidad del frente carbonatado se mide sobre los testigos obtenidos de la estructura rociando la superficie de la muestra recién extraída con una solución de fenolftaleína disuelta en etanol. Como fue explicado anteriormente, la fenolft-

<b>Tabla 5:</b> Riesgo de corrosión en función de la velocidad de corrosión	
Velocidad de corrosión (µm/año)	Riesgo de Corrosión
< 1,2	Despreciable
1,2 a 5,8	Baja
5,8 a 11,6	Moderada
> 11,6	Alta



**Figura 12.** Extracción de testigos en una estructura de hormigón armado.

taleína presenta coloración fucsia a pHs mayores que 9,5 y es incolora a pHs menores que dicho valor. La relación entre la profundidad del frente carbonatado ( $x$ ) y el tiempo desde que la obra ha sido ejecutada ( $t$ ) es  $x = k \cdot t^{0,5}$ . De esta manera, calculado el valor de la constante  $k$  para la estructura analizada, es posible predecir el tiempo necesario para que el frente carbonatado recorra todo el espesor de recubrimiento, llegue hasta las armaduras y genere su depasivación (Figura 13).

g- Determinación del perfil de concentración de iones cloruro. Para esta determinación, el testigo obtenido se corta con un disco de corte seco en rodajas de 5 a 10 mm, para luego pulverizarlas y realizar el análisis del contenido de cloruro. Con este perfil de concentraciones, y a través del empleo de ecuaciones que describen el movimiento de iones cloruro hacia el interior de la estructura, es posible predecir qué concentración de cloruro habrá a una profundidad y tiempo dado (Duffó, Farina, 2016). Cuando dicha concentración a la profundidad

correspondiente al espesor de recubrimiento alcance un nivel crítico (el valor generalmente adoptado es 0,4% de cloruro respecto de cemento), es posible la iniciación de corrosión localizada sobre las armaduras.

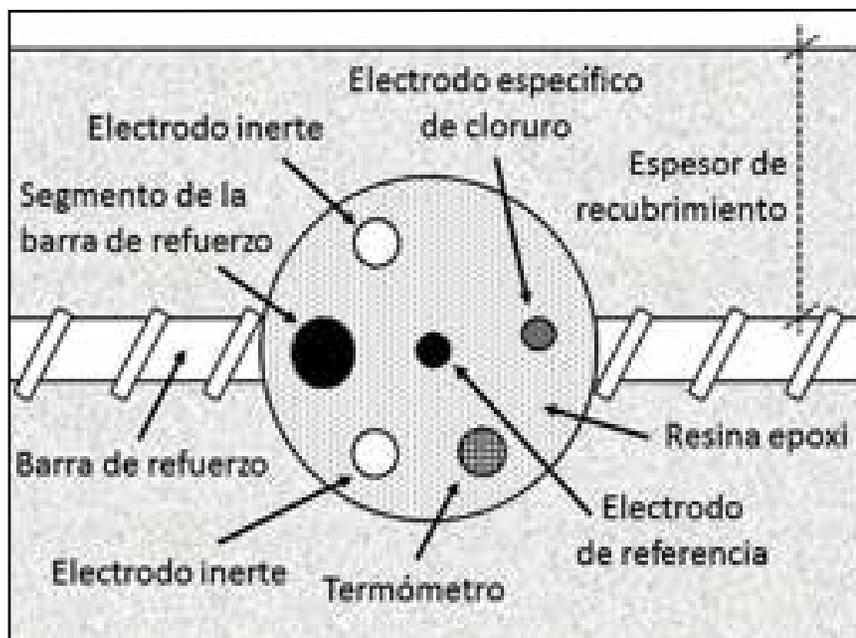
En muchas oportunidades, la complejidad de los diversos procesos de corrosión hace que el monitoreo sea dificultoso. Por ejemplo, la temperatura y la concentración de especies disueltas tales como cloruro, afectan dramáticamente tanto el tipo de corrosión como su velocidad de propagación. Además, los parámetros controlantes pueden modificarse con el tiempo, requiriendo pe-

riódicas mediciones en tiempo real. Un sistema de monitoreo integrado y que permita medir desde “dentro” de la estructura por medio de sensores embebidos, debe ser capaz de medir adecuadamente no sólo los parámetros electroquímicos arriba mencionados, sino también otros parámetros medioambientales tales como temperatura, concentración de iones cloruro y disponibilidad de oxígeno. Una vez medidos dichos parámetros, el especialista puede utilizar esa información para conocer la situación de la estructura y tomar decisiones respecto a la necesidad de aplicar estrategias de remediación, en caso de ser necesarias.

En el mercado internacional están disponibles sensores que, embebidos en la estructura, son capaces de medir algunos o todos los parámetros arriba mencionados. Sin embargo, el precio de estos sensores es prohibitivo para países en vías de desarrollo, debido a su alto grado de sofisticación y al valor agregado tecnológico. Por esta razón es importante hacer desarrollos locales que permitan disponer de sensores económicos. En la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República Argentina se ha desarrollado un sensor que puede ser embebido en estructuras nuevas o ya existentes (Figura 14) y que permite el monitoreo de parámetros asociados con la corrosión de las armaduras: resistividad eléctrica del hormigón,



**Figura 13.** Testigo de hormigón rociado con solución de fenolftaleína, donde se aprecia la profundidad de carbonatación ( $x$ ).



**Figura 14.** Esquema de un sensor embebible para el monitoreo de parámetros asociados con la corrosión de las armaduras: resistividad eléctrica del hormigón, potencial y velocidad de corrosión, flujo de oxígeno, contenido de cloruro y temperatura de la estructura (Duffó, Farina, 2016)

potencial y velocidad de corrosión, flujo de oxígeno, contenido de cloruro y temperatura de la estructura (Duffó, Farina, 2009; Duffó, Farina, 2016). Este desarrollo local, luego de más de una década de uso, ha mostrado ser confiable, eficiente y duradero (Burkart *et al.*, 2104; Vázquez, Duffó, 2018)

Es de destacar que la mayor parte de las grandes obras construidas con hormigón armado tienen una antigüedad en la que los costos de inspección y mantenimiento han crecido tanto, que constituyen la mayor parte de los gastos involucrados en infraestructura. Es por este motivo que el empleo de sistemas integrados de monitoreo de estructuras nuevas o ya existentes, resulta una herramienta valiosa al permitir el desarrollo de programas de inspección y mantenimiento más racionales.

Finalmente, y a fin de evitar problemas futuros, se debe tener en cuenta que lo único de lo que hay que tomar conciencia es de que el

recubrimiento de hormigón sobre las armaduras debe ser suficientemente impermeable y grueso, porque lo que importa, sobre todo, es impedir que las materias nocivas lleguen a las armaduras y las destruyan.

#### ■ PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Existen diversas alternativas para evitar (o mitigar) la degradación de estructuras de hormigón armado cuando ésta es generada por la corrosión de las armaduras. Esta prevención se puede efectuar desde el punto de vista del hormigón mismo o desde el punto de vista de las armaduras.

En el primer caso, durante el proceso de construcción de la estructura, es necesario seleccionar correctamente el tipo de cemento a emplear, utilizar una adecuada dosificación de la mezcla (particularmente la relación agua/cemento), realizar en obra una buena com-

pagación y curado del hormigón y efectuar un adecuado mantenimiento de la estructura (por ejemplo, sellando grietas y fisuras en cuanto son detectadas). Por otro lado, es factible aplicar revestimientos o recubrimientos que retarden el ingreso de agentes agresivos (dióxido de carbono y/o cloruro). Esta metodología es de relativamente fácil aplicación, se puede implementar en cualquier estructura, pero debe ser realizada previo al ingreso de los agentes agresivos. Otra forma de prevención es agregar, durante el amasado del hormigón, agentes inhibidores de la corrosión del acero. Esta técnica también se está aplicando en estructuras ya existentes, induciendo a la difusión hacia el interior de la estructura de agentes inhibidores que se pulverizan desde el exterior. Para que sean efectivos, hay que asegurar que en un corto tiempo, estos agentes alcancen las armaduras (es decir, atraviesen el espesor de recubrimiento) y la protejan adecuadamente.

Desde el punto de vista de las armaduras, es posible efectuarles una protección catódica, ya sea por el empleo de ánodos de sacrificio o por la aplicación de una corriente externa. Esta técnica es posible de ser aplicada en casi cualquier estructura; es la única que detiene la corrosión una vez iniciada pero tiene la desventaja de necesitar personal especializado y tiene altos costos de mantenimiento cuando se trata de corriente impresa.

También es factible emplear barras más resistentes al ataque corrosivo, como ser barras de acero galvanizado, acero recubierto por pinturas o acero inoxidable. En estos casos no hay costos de mantenimiento, sin embargo hay que ser muy cuidadosos en el manipuleo de las barras galvanizadas o pintadas para evitar el deterioro de las

capas protectoras (de galvanizado en el primer caso y de pintura en el segundo). Con respecto al empleo de barras de acero inoxidable hay que destacar que el costo de este material es varias veces superior al del acero al carbono, por lo que su empleo en determinadas estructuras es ventajoso solo si se tiene en cuenta el ciclo económico completo de vida útil de la estructura, en el que se incluye no solo el costo de la construcción, sino además el de su posterior mantenimiento y las posibles reparaciones. Si bien el uso de este tipo de barras más resistentes a la corrosión está muy extendido en los Estados Unidos y en Europa con notable éxito, en nuestro país aún no se comercializan este tipo de armaduras.

### ■ CONSIDERACIONES FINALES

A lo largo del presente trabajo se ha mostrado que las construcciones de hormigón armado son susceptibles a sufrir deterioro de variada índole, siendo una de las más habituales, la corrosión de las armaduras de refuerzo. En la actualidad existen diversas técnicas que permiten establecer el estado de una estructura de hormigón armado desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras. Su aplicación es de fundamental importancia para determinar la necesidad de reparar estructuras afectadas por corrosión o de evitar que se incrementen los daños que pongan en riesgo la capacidad resistente de la estructura, su funcionalidad o su estética.

### ■ AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los Magister Enzo D. Gómez y Juan I. Carricondo por haber cedido algunas de las fotos que ilustran el presente trabajo.

### ■ REFERENCIAS

- Andrade M.C. (Coordinadora) (1988) Manual inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Andrade M.C., Alonso M.C. (2001) On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials* 15, 141-145.
- ASTM C876-04 (2004) Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, West Conshohocken.
- Bentur A., Diamond S., Berke N.S. (1997) *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice*, Taylor & Francis, London.
- Biczók I. (1981) *La corrosión del hormigón y su protección*, Ediciones Urmo, Bilbao.
- Broomfield J.P. (1997) *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*, E&FN SPON, London/New York.
- Burkart A.L., Duffó G.S., Castro P. (2014) Corrosion Monitoring for Integrity Assessment of Post-Tensioned Strands at Piedra del Aguila Spillway. *Hydropower and Dams International Journal* 6, 64 - 70.
- Duffó G.S., Farina S.B. (2009) Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 23, 2746 - 2751.
- Duffó G.S., Farina S.B. (2016) *La corrosión de estructuras de hormigón armado. Principios básicos, monitoreo y prevención*. Editorial Académica Española, Berlín.
- Fontana M. (1986) *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 3rd Edition, New York.
- Galvele J.R., Duffó G.S. (2006) *Degradación de Materiales-Corrosión*. Editorial Baudino, Buenos Aires.
- Gani M (1997) *Cement and concrete*, Chapman and Hall, Londres.
- Grunau E. (1992) *Lesiones en el hormigón*. Biblioteca de Arquitectura y Construcción CEAC, Barcelona.
- Hewlett P.C. (Ed.) (1998) *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4<sup>th</sup> Edition, Arnold Publishers, Londres.
- Irassar E.F. (Ed.) (2001) *Durabilidad del hormigón estructural*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires.
- McCarter W.J.; Forde M.C., Whittington H.W. (1983) *Electrical-resistivity characteristics of air-entrained concrete*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 75, 23 - 127.
- Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (2006) *Concrete. microstructure, properties and materials*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, Nueva York.
- Pedefferri P., Polder B., Bertolini L., Elsener B. (2004) *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*, Wiley-VCH, Weinheim.
- Rostam S. (Ed) (1992) *Durable concrete structure. Design guide*, Comité Euro-International du Beton, Thomas Telford, Lausanne.
- Taylor H.F.W. (1978) *La química de*

los cementos, Tomo 1, Ediciones Urmo, Bilbao.

Troconis de Rincón O., Romero de Carruyo A., Andrade M.C., Helene P., Diaz I. (2006) Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED

- Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Rio de Janeiro.

Tuuti K. (1982) Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stokholm.

Vázquez D.R., Duffó G.S. (2018) Monitoring Reinforcement Corrosion in Concretes for Nuclear Facilities, Material Performance, 57, 64-67.



# EL HOMBRE, LOS MATERIALES Y EL MEDIOAMBIENTE

**Palabras clave:** Materiales, Medioambiente, Producción sustentable, Análisis de Ciclo de Vida.  
**Key words:** Materials, Environment, Sustainable production, Life Cycle Assessment.

La industrialización y sus efectos sobre el medioambiente es uno de los grandes problemas que afecta al futuro de la vida del hombre sobre la tierra. Esto es producto del desarrollo económico y tecnológico y también de una mayor demanda de bienes y servicios por parte de una población global creciente. Esta mayor demanda implica un consumo creciente de recursos, muchos de ellos no renovables, la consecuente contaminación de la atmósfera, del agua y de los suelos del planeta y, entre otros efectos, la contribución al calentamiento global.

Este artículo intenta revisar la relación del hombre con los materiales y el medioambiente, como así también a elementos de la llamada producción sustentable y a un hito fundamental para la misma que es el "Análisis del Ciclo de Vida" (o ACV) de materiales y productos. Para ilustrar estos temas se hace referencia a algunos casos significativos.

Industrialization and its effects on the environment is one of the big problems that affects the future of man's life on earth. This is a product of economic and technological development and also of a greater demand for goods and services by a growing global population. This greater demand implies an increasing consumption of resources, many of them non-renewable, with the consequent pollution of the planet's atmosphere, water and soils and, between other effects, the contribution to global warming. This article attempts to review the relationship of man with materials and the environment, as well as elements of the so-called sustainable production and a fundamental milestone for it, which is the "Life Cycle Assessment" (or LCA) for materials and products. To illustrate these issues, reference to some significant cases is made.

## ■ INTRODUCCIÓN

"El medioambiente constituye un sistema, la sociedad humana también lo es. Ambos coexisten e interactúan. Estas interacciones pueden ser fuertes o débiles. Cuando dos sistemas de por sí complejos interactúan, las consecuencias son difíciles de prever. Una de esas consecuencias ha sido el impacto destructor de la sociedad industrial sobre el medioambiente y el ecosistema en el cual vivimos y del cual dependemos. Ciertos impactos son evidentes después de más de un siglo, suscitando acciones reparadoras que han sido eficaces en muchos casos. Otros impactos han aparecido más recientemente, entre ellos el cambio climático global, que si se lo deja evolucionar podrá ser muy perjudi-

cial". Esta reflexión pertenece a M. Ashby en su libro "Materials and Environment", una de las obras referenciales en el tema [1]. Este problema y otras crisis ecológicas están asociados a la forma en que los humanos utilizamos elementos fundamentales de la sociedad actual: la energía, el agua y los materiales. Continúa Ashby: "Si se decide emprender alguna acción para remediar problemas, lo primero que se debe hacer es intentar comprender el origen, el mecanismo, las consecuencias y el nivel al que, mediante una elección cuidadosa de los materiales, se puede influenciar sobre la situación bajo análisis". Este artículo brinda algunos elementos y reflexiones que pueden contribuir al conocimiento y a la mejora del proceso de elección. Para ello se pasa revista

a la relación del hombre con los materiales, a elementos de la llamada producción sustentable y a un elemento fundamental para la misma que es el llamado "Análisis del Ciclo de Vida" (o ACV) de materiales y productos. Para ilustrar estos temas se hará referencia a algunos casos significativos.

La palabra **material** proviene del término latino *materialis* y hace referencia a lo que tiene que ver con la materia. La materia, por su parte, es definida como todo lo que ocupa un espacio y posee masa, forma, peso y volumen, por lo tanto es observable y medible; también referencia al material, sustancia o producto del que está hecha una cosa. El uso que se le da al término en Ciencia e Ingeniería, define a los materiales

## ■ Alberto A. Pochettino

Instituto de Investigaciones e Ingeniería Ambiental (3iA)  
Universidad Nacional de San Martín  
Gerencia de Química,  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

E-mail: alberto.poch@gmail.com

como “sustancias con cualidades útiles que pueden ser térmicas, mecánicas, electromagnéticas o de otra clase” [2][3].

El hombre siempre ha utilizado materiales a través de los tiempos. La naturaleza, gracias a sus ciclos bien equilibrados (el ciclo del carbono, del nitrógeno o del agua) muestra ejemplos sobre la utilización de los materiales que, al fin de su vida, son reciclados para reaprovisionar las fuentes de donde son extraídos. Esto implica un **circuito cerrado** en el cual el flujo y los desechos asociados se adaptan de una a otra etapa de vida, de forma tal que no existe acumulación de desechos a lo largo del ciclo. El hombre intenta, pero no ha logrado imitar a la naturaleza, ya

que la forma en la cual se utilizan los materiales no llega a constituir un circuito cerrado, o, si pudiese ser cerrado, las unidades del circuito muchas veces no operan a ritmos compatibles entre sí.

El problema actual es la industrialización y sus efectos sobre el ambiente. Esto es producto del desarrollo económico y tecnológico y también de una mayor demanda por parte de una población global creciente. Una mayor demanda de productos implica un consumo creciente de recursos, muchos de ellos no renovables.

■ **BREVE RELATO HISTÓRICO**

Un breve repaso temporal de los

materiales que ha utilizado y utiliza el hombre hasta comienzos de este siglo se puede visualizar en la Fig.1, mientras que la Fig. 2 muestra la evolución de la población humana del planeta [4-5]. En ambos casos, la escala temporal es no lineal. Analizando brevemente la historia de la relación del hombre con los materiales, se puede concluir que antiguamente el crecimiento no representaba un problema. Actualmente, el desarrollo del conocimiento permite tomar conciencia que la evolución actual del planeta está llevando al hombre hacia el límite de muchos de sus recursos y que adaptarse a esa situación no será fácil. La producción y utilización sustentable de materiales es entonces fundamental para la supervivencia de la humani-

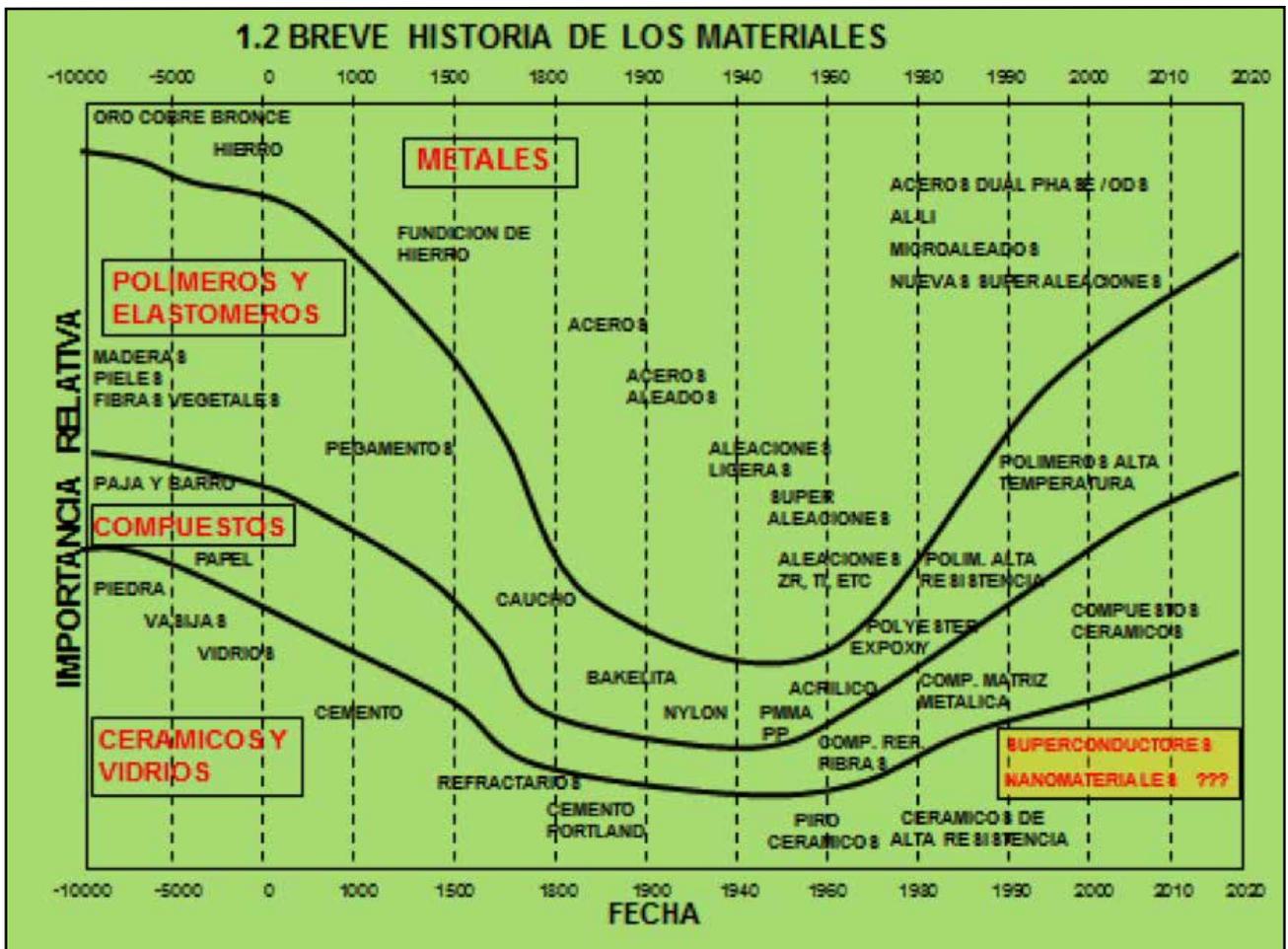


Figura 1. Representación esquemática de la evolución histórica de los materiales y su importancia relativa. Escalas arbitrarias.

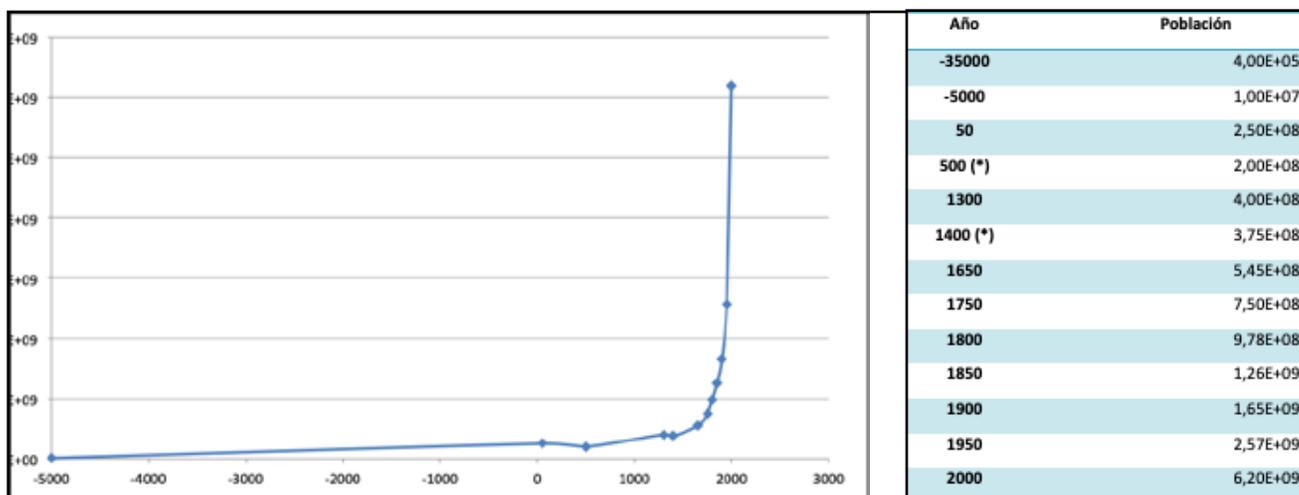


Figura 2. Evolución de la población del planeta. Con (\*) efectos de hambrunas y pestes sobre la población [5].

dad. A continuación se revisan algunos hitos de la evolución del uso de materiales junto a su ubicación cronológica [1] [6]:

- En la prehistoria el hombre utilizó huesos y piedras para construir herramientas para la agricultura y armas. También usó fundamentalmente materiales naturales: piedras, troncos, ramas y barro para construir viviendas y cueros para protegerse del frío. El descubrimiento del fuego ayudó al hombre en la alimentación y también en el manejo de los materiales. La población mundial era aproximadamente  $0,5 \cdot 10^6$  habitantes alrededor de 10 000 AC.

- El oro, la plata y el cobre, los únicos metales que se encontraban en estado original, eran conocidos con anterioridad, pero la conciencia de que eran materiales *dúctiles*, que podían ser trabajados a golpes para tomar formas complejas y, una vez trabajados resultaban ser más duros, data de aproximadamente 5500 AC. [6].

- Un período de desarrollos tecnológicos para la humanidad de entonces comienza con la utilización de hornos para cocinar piezas de cerámica. Esto ocurrió unos 4000 AC y le permitió al hombre obtener

temperaturas y atmósferas para reducir minerales ricos en cobre. Estos fueron desarrollos tecnológicos que permitieron a nuestros antepasados construir herramientas, armas y objetos ornamentales, que se asocian a la llamada "*Edad del Cobre*". La posterior introducción del estaño en Cu, dio lugar a la generación de una aleación con mejores propiedades mecánicas: el bronce, apareciendo entonces la "*Edad del Bronce*".

- Posteriormente, unos 1500 AC el hombre comienza a conocer la forma de reducir los óxidos de hierro, en particular la *hematita* ( $Fe_2O_3$ ), para obtener el Fe a partir del proceso que hoy se conoce como forja. El material obtenido poseía una rigidez, solidez y dureza superior a todos los otros materiales, transformando al bronce en un "material obsoleto" para la defensa. Comienza entonces la "*Edad del Hierro*".

- Existe entonces una brecha de casi dos mil años hasta que, aproximadamente en el 1500 DC se desarrolló el "alto horno" permitiendo la generalización del uso de materiales fundidos. La población mundial en esos momentos era de aproximadamente  $400 \cdot 10^6$  habitantes. La población en los 15 siglos anteriores creció lentamente como consecuencia de epi-

demias y hambrunas.

- El acero producido industrialmente recién aparece en 1856 y esto transforma al Fe en el mineral más utilizado por el hombre desde ese momento a la actualidad. Este es el período de la Revolución Industrial y también de aceleración del crecimiento demográfico.

- La humanidad asistió a una verdadera revolución del uso de los materiales como consecuencia de los desarrollos tecnológicos de los últimos 200 años, producto de las demandas sociales, económicas y también militares. Nos encontramos ante un fuerte desarrollo industrial y demográfico:  $2,57 \cdot 10^9$  habitantes en 1950;  $7,35 \cdot 10^9$  habitantes en 2015. La Tabla I presenta resumidamente los diferentes materiales y sus aplicaciones más frecuentes. Algunos comentarios:

- En el caso de los materiales metálicos, la demanda creada por la industria aeronáutica y espacial llevó al desarrollo de aleaciones ligeras basadas en el aluminio, el magnesio y el titanio (alrededor de 1950). Las necesidades de turbinas que trabajan a altas temperaturas impulsaron el desarrollo de las "*superaleaciones*"

**Tabla I - Principales materiales y sus aplicaciones más habituales [7]**

METALES		PRINCIPALES UTILIZACIONES	
FERROSOS	Fundición Hierro	Autopartes, blocks de motores, componentes estructurales de máquinas herramientas.	
	Aceros c/alto contenido de C	Herramientas de corte, resortes, cojinetes, cigüeñales, ejes, vías de ferrocarril.	
	Aceros contenido medio C	Aplicaciones generales a la ingeniería mecánica (herramientas, ejes, cojinetes, engranajes, etc.)	
	Aceros con bajo contenido C	Estructuras de aceros, puentes, oleoductos, refuerzos de concreto, autopartes, packaging (tambores, latas), etc.	
	Aceros de baja aleación Aceros inoxidables	Resortes, herramientas, autopartes (engranajes), rodamientos, etc. Transporte, industria química y de la alimentación, plantas nucleares, recipientes de presión, implementos quirúrgicos, electrodomésticos, etc.	
NO FERROSOS	Aleaciones de Aluminio: - Fundidas -No tratables térmicamente  -Tratables térmicam.	Autopartes (cilindros), aplicaciones domésticas. Conductores eléctricos, intercambiadores de calor, láminas, tubos, cacerolas, latas para bebidas, Paneles para arquitectura, embarcaciones ligeras, etc. Ingeniería aeroespacial, paneles para autos, estructuras ligeras, barcos, etc.	
	Aleaciones de Cobre	Conductores eléctricos y alambres, intercambiadores de calor, calderas, utensilios de cocina, monedas, esculturas, etc.	
	Aleaciones de Plomo Aleaciones de Magnesio	Techos y revestimientos, protección a Rayos X, electrodos de baterías, etc. Fundiciones para autos, llantas para ruedas, fundiciones ligeras para transporte, contenedores combustibles nucleares, adición principal para la producción de aleaciones de base Al.	
	Aleaciones de Niquel	Turbinas para gas y para motores de avión, monedas, adición para producción de aceros inoxidables austeníticos.	
	Aleaciones de Titanio	Álabes de turbinas, aplicaciones estructurales para aeroespacial, implantes biomédicos.	
	Aleaciones de Zinc	Piezas de fundición (automotores, juguetes, electrodomésticos), recubrimiento en acero galvanizado.	
	Aleaciones de Circonio	Industria nuclear y química.	
	POLÍMEROS		
ELASTÓMEROS	Isopreno (IR) Goma Natural (NR) Neoprene (CR) Poliuretano (Elast.) (PU-el) Siliconas (elastómero)	Neumáticos, tubos inertes, aislación, tuberías, zapatos. Guantes, neumáticos, tubos, aislación eléctrica. Trajes de neoprene, O-rings, selladores, calzados. Packaging, mangueras, adhesivos, revestimientos de telas Aislación eléctrica, encapsulado electrónico, implantes médicos.	
	TERMO-PLÁSTICOS	Polímeros celulósicos (CA) Ionómeros (I) Poliamidas (nylon) (PA) Policarbonato (PC)	Mangos de herramientas y cubiertos, decorativo, plumas. Packaging, pelotas de golf, botellas, blisters. Engranajes, packaging, botellas, textiles, cuerdas, etc. Anteojos de seguridad, cascos, escudos, accesorios luz, componentes médicos.
		Polietileno (PE)	Packaging, bolsos y accesorios, tubos, juguetes, juntas artificiales, etc. Botellas moldeadas por inyección, films, cintas de audio y video, paños, etc.
		Polietileno terephthalato (PET)	Ventanillas de aviones, lentes, reflectores, luces, discos compactos.
		Polimetil metacrilato (PMMA)	Ropas, tubos, aisladores eléctricos, hervidores, etc.
Polipropileno (PP)		Juguetes, packaging, elementos cortantes.	
Poliestireno (PS)		Tubos, marcos de ventanas, canaletas, packaging.	
Polivinilclorado (PVC) Teflon (PTFE)		Recubrimientos que no se pegan, skies, aisladores eléctricos, cintas, cojinetes.	
TERMO-ESTABLES	Epoxies (EP) Fenólicos (PHEN) Poliéster (PEST)	Adhesivos, materiales compuestos de fibras, encapsulado electrónico. Conectores eléctricos, utensilios de cocina, manijas, adhesivos. Muebles, barcos, elementos deportivos	
	ESPUMAS	Espuma Polimérica flexible	Packaging, flotadores, esponjas, colchones, amortiguación.
		Espuma Polimérica rígida	Aislantes térmicos, paneles sandwichs, packaging, flotadores.

COMPUESTOS		PRINCIPALES UTILIZACIONES
METÁLICOS	Aluminio / Carburo de Silicio	Autopartes, elementos deportivos.
POLIMÉRICOS	Refuerzo Fibra de Carbono	Componentes estructurales ligeras (aeroespaciales, bicicletas, elementos deportivos, cascos de botes, autopartes, resortes, etc.)
	Refuerzo Fibra de Vidrio	Cascos de botes, autopartes, plantas químicas.
CERAMICOS		
VIDRIOS	Vidrio Borosilicato	Utensilios para horno, utensilios para laboratorio, faros.
	Vidrio Cerámico	Utensilios de cocina, láseres, espejos de telescopios.
	Vidrio de Silicato	Ventanas de alta performance, aplicaciones para altas temperaturas.
POROSOS	Ladrillo	Construcción de edificios
	Cemento	Uso general en la ingeniería civil de construcción
	Piedra	Edificios, arquitectura, escultura.
TÉCNICOS	Alúmina	Herramientas de corte, sustrato de microcircuitos, válvulas, bujías
	Nitrato de Aluminio	Sustrato de microcircuitos y sumidero de calor
	Carbonato de Boro	Armaduras ligeras, boquillas, partes de herramientas de precisión
	Silicio	Microcircuitos, semiconductores, instrumentos de precisión.
	Carburo de Silicio	Equipos para alta temperatura, pulidor abrasivo, armaduras
	Nitruro de Silicio	Cojinetes, herramientas de corte, partes de máquinas
Carburo de Tungsteno	Herramientas de corte, abrasivos, perforadoras.	
NATURALES		
	Bambú	Construcción, papel, andamios, canastas, cuerdas, mobiliario.
	Corcho	Corchos y tapones, flotadores, packaging, pisos.
	Cuero	Zapatos, ropas, carteras y valijas, correas de transmisión
	Madera	Construcción, pisos, puertas, mobiliario, packaging, elementos deportivos.

producto de aleaciones de Ni y Fe. La industria nuclear llevó al desarrollo de la tecnología de las aleaciones de circonio (resistentes a la radiación neutrónica). La industria química y petrolera impulsaron particularmente el desarrollo y producción de aceros inoxidables.

- Polímeros: La utilización del caucho aparece en Europa alrededor de 1550, aunque su uso intensivo recién ocurre en el siglo XIX como consecuencia del proceso de vulcanización (reticulación de las cadenas por azufre). El importante incremento del uso de los polímeros se da a mediados del siglo XX como consecuencia del desarrollo de la industria petroquímica.
- Materiales compuestos (y para la construcción): como los polímeros "puros" no poseían ni la rigidez ni la resistencia mecánica que muchas veces requerían las

aplicaciones, se los reforzó con partículas o fibras de cerámicos o de vidrio, dando lugar a los materiales compuestos. Estos materiales no son novedosos para el hombre: desde la antigüedad se reforzaban con paja los ladrillos de barro para hacerlos más resistentes. En relación a los materiales para la construcción, los romanos fabricaban "su hormigón" mezclando ceniza volcánica con cal (óxido de calcio) y agua del mar. Esto permitió realizar construcciones de gran resistencia y duración, particularmente puentes [8]. Otro conocido: el "hormigón o cemento armado" que se utiliza desde mediados del siglo XIX en las grandes construcciones. El refuerzo del cemento con estructuras de barras de acero le confiere a este compuesto una resistencia a la tracción que el cemento por sí solo no posee.

- En la segunda parte del siglo XX tiene lugar un desarrollo revo-

lucionario que cambió sustancialmente la vida del hombre: la tecnología del silicio y de los semiconductores. Este descubrimiento abrió las puertas de la electrónica del estado sólido, la mecatrónica, la informática moderna, las comunicaciones globales, el procesamiento de imágenes, los captadores, el manejo de procesos en tiempo real y muchas cosas más, aparte de aquellas a descubrir. Por supuesto, al final del siglo pasado y en el actual han surgido nuevos desarrollos y expectativas a las que se hará referencia más adelante.

## ■ CONSUMO ACTUAL DE MATERIALES

La Tabla II presenta el consumo y consecuentemente la producción anual de materiales, agregándose como referencia en su parte superior dos elementos que son fundamentales para entender la afirmación de lo dramático que puede transformarse

en el futuro el consumo de materiales no renovables:

- a) la producción de hidrocarburos fósiles (petróleo, carbón y gas), es la principal materia prima para la producción y transformación de materiales: 11,4.10<sup>9</sup> tn/año en 2017 [9].
- b) La emisión mundial de CO<sub>2</sub> correspondiente a 2017: 32,5.10<sup>9</sup> tn/año. Esta creció un 1,4% respecto a 2016, después de tres años de crecimiento prácticamente nulo [10].

Algunas consideraciones:

- A escala mundial se utilizan aproximadamente 10<sup>10</sup> tn/año de materiales o aproximadamente 1,5 tn/ (persona-año). El consumo se reparte en forma muy desigual entre los países desarrollados y en vía de desarrollo. La cifra de consumo aumenta año a año para todos los materiales y podría hacerlo fuertemente cuando el consumo en China e India comience a acercarse al de los países desarrollados.

- Metales: el acero es el material metálico más consumido, superando en un orden de magnitud al Aluminio. Su polivalencia, su solidez, su bajo costo y su disponibilidad son *inigualables*. El consumo de los otros materiales metálicos es sensiblemente menor al del Al [11-18].

- El consumo anual total de polímeros de uso corriente, entre los que se incluye el polietileno (PE, 80 Mtn/año), el policloruro de vinilo (PVC, 38 Mtn/año), el polipropileno (PP, 68 Mtn/año) y el polietileno tereftalato (PET, 33 Mtn/año), excede al de todos los metales, excepto al acero [19].

- El consumo de materiales para la construcción supera a metales y

**Tabla II - Datos actualizados sobre la producción de hidrocarburos fósiles, emisión de CO<sub>2</sub> y la utilización de materiales a escala global.**

	Producción mundial (106tn/año)
Petróleo y carbón (2016) [9]	11.800
Emisión mundial de CO <sub>2</sub> (2017) [10]	32.500
Aceros (2018) [11]	1.600
Aleaciones de Al (2018) [12]	65
Aleaciones de Cu (2017) [13]	21
Aleaciones de Zn (2017) [14]	12
Aleaciones de Pb (2017) [15]	11,5
Aleaciones de Ni (2018) [16]	2,2
Aleaciones de Mg (2017) [17]	0,75
Aleaciones de Ti (2017) [17]	0,2
Plata (2017) [18]	0,027
Au (2017) [18]	0,003
Polímeros (2015) [19]	322
Cemento (2018) [20]	4.100
Asfalto (2017) [21]	1.600
Vidrios (2017) [22]	37
Ladrillos (2016) [23]	1.500 (*)
Maderas (2017) [24]	3.797
Papel y cartón (2017) [25]	413
Fibras naturales (2016) [26]	30
Fibras artificiales (2016) [26]	70
Fibras de Carbono (2017) [27]	0,07
(*) Datos en millones de unidades.	

polímeros. El cemento es la estrella; actualmente el uso de cemento armado supera en volumen a todo otro material producido por el hombre. Le siguen, también con muy alto consumo, el asfalto para la construcción de caminos, el vidrio y los ladrillos [20-23].

- Otro caso interesante es la madera, cuyo consumo es superior al del acero. Cerca de la mitad de la producción se quema (¡sin comentarios!), el resto se utiliza en la construcción, mobiliario, producción de papel y cartón, etc [24] [25].

- Para los compuestos se observa un fuerte aumento del nivel de utilización de fibras de carbono como refuerzo estructural. Hace 30 años la utilización de este material era muy

baja. Actualmente comienza a aproximarse al nivel de utilización de las aleaciones de Ti [26-27].

## ■ MIRANDO AL FUTURO

Hay otros descubrimientos y desarrollos importantes que aparecen a fines del siglo XX, que podríamos definir como la "nueva generación de materiales". Ella está asociada a las tendencias futuras de los materiales que se basan en tres amplias necesidades industriales y sociales [28]:

- 1) Sustentabilidad y materiales seguros,
- 2) materiales para energía y

- 3) materiales de alto valor en el mercado.

Se cree que los nuevos materiales se valorizarán, más que por su alto valor intrínseco, por la forma en que ellos se integren en componentes y sistemas, permitiendo nuevos diseños y la mejora de sus desempeños. Por otra parte, es cada vez más difícil separar desarrollo de materiales de innovaciones productivas; uno lleva a la otra en un círculo virtuoso de mejora hacia la performance óptima. Los más importantes desarrollos de futuros materiales comprenderán la integración de “viejos” y “nuevos” materiales con un incremento de precisión y sofisticación, aún en la nano-escala.

La **sustentabilidad y los materiales seguros** incluye temas como: materiales estructurales livianos, materiales con impacto ambiental reducido a través de su ciclo de vida, materiales bioderivados y biodegradables, nuevas tecnologías y procesos que permitan incrementar la recirculación de los materiales.

Entre los **materiales para la energía** se pueden citar como ejemplo nuevas aleaciones para turbinas que puedan trabajar a altas temperaturas, materiales para la industria nuclear que puedan soportar elevado daño por radiación en reactores avanzados sin sufrir cambios radicales en sus propiedades, materiales que permitan mejorar la protección a la corrosión, la oxidación y el desgaste por recubrimientos que pueden llegar a la escala nano. Finalmente, un importante espectro de actividades se abren en temas de materiales para la producción de energías renovables, el almacenamiento de las mismas (por ejemplo las baterías de ión litio) y la electrificación del transporte.

Los **materiales de alto valor de mercado** incluyen nano-estructuras de carbono relacionadas con dispositivos: electrónicos (transistores rápidos, aplicaciones a computación cuántica), ópticos (pantallas, celdas solares), almacenamiento de energía electroquímica (baterías, supercondensadores), entre otros. Finalmente, otro mercado de materiales de alto valor es el de los biomateriales; registrándose en estas dos últimas décadas un fuerte desarrollo de los materiales para implantes. El diseño 3D sin dudas representa un fuerte impulso al desarrollo de implantes a medida de las necesidades de los pacientes.

Una pregunta que muchos especialistas se han realizado a lo largo del tiempo: **¿El hombre “utiliza o depende” de los materiales?** La respuesta es clara: los utiliza y el consumo hace que cada día dependa más de ellos, con un agravante ya señalado: el uso desmedido y la dependencia creciente de los materiales no renovables, lo cual es peligroso para la sustentabilidad del hombre sobre la tierra en tiempos no demasiados lejanos.

#### **CONSIDERACIONES INSOSLAYABLES**

Ya se ha señalado que a pesar de las cifras alucinantes sobre el consumo de materiales, el mismo sigue creciendo año a año y su futura utilización depende de las reservas existentes. Los materiales que utiliza la industria son extraídos en su gran mayoría de la corteza terrestre. Esto permite definir una **reserva mineral** como “aquella parte de un depósito mineral conocido que puede ser extraída bajo condiciones legales y económicas correctas en el momento de determinación”. Las reservas son una noción económica y aumentan o mejoran de acuerdo a las condiciones técnicas, económicas y legales del momento. Una mejora

de las técnicas de extracción puede incrementar el nivel de reservas, mientras que una modificación en la legislación ambiental o cambios en el clima político puede reducirlas. La prospección, impulsada por la demanda, puede tener como consecuencia un aumento de las reservas. No se deben confundir reservas con recursos. Los **recursos** representan la cantidad total real de un material, incluyendo las reservas en curso como también todos los posibles yacimientos que podrían ser relevados como reservas por futuras prospecciones. Si bien los recursos son mucho más importantes que las reservas de un mineral, gran parte de ellos son inaccesibles con la tecnología actual y su evaluación está sujeta a grandes imprecisiones [1].

Otros dos elementos críticos para la extracción, producción, transformación y transporte de los materiales son **la energía y el agua**. A continuación se hace una breve referencia a ellos.

#### **a) Energía**

La energía está fuertemente asociada a la producción, transformación, transporte, utilización y reciclado de materiales. ¿Qué cantidad de energía consumimos? Datos del año 2016 indican que durante dicho año en el planeta se ha consumido aproximadamente 580 EJ ( $1\text{EJ}=10^{18}\text{J}$ ) y el consumo continúa aumentando [29]. El origen de la energía consumida es tal que la generación utilizando combustibles fósiles representa aproximadamente un 85% del total, la producción de energía nuclear representa un 5% y la hidráulica, eólica, fotovoltaica y otras conforman el restante 10%. Las reservas de energía de origen solar son enormes pero se encuentran dispersas. La generación eólica está en pleno desarrollo, siendo su mayor problema el almacenamiento y transporte.

## b) El agua

La industria también recurre a otro recurso natural: el agua. El agua es un recurso renovable al ritmo que lo permite el ecosistema. La demanda es creciente y las previsiones indican que el agua potable puede convertirse en un problema importante para más de la mitad de la población mundial, la cual podría encontrarse en situación de penuria a partir del año 2050. Recordemos que el 97% del agua terrestre corresponde a agua salada; menos del 1% al agua dulce y el resto es agua dulce aprisionada bajo la forma de hielo en glaciares de montañas y en las calotas glaciares polares. La agricultura es el consumidor más importante de agua dulce a escala mundial, utilizando más del 65% del agua disponible [30]. En algunos países industrializados, la industria puede llegar a ser el principal consumidor.

Las necesidades de agua para

los materiales y su transformación generalmente son medidas en forma directa a partir de las entradas y salidas de las fábricas. Un par de consideraciones [1]:

- En los materiales industriales, el orden de magnitud de la utilización de agua se extiende entre 10 l/kg a 1000 l/kg (o en forma equivalente kg/kg dada la densidad del agua). Un ejemplo: en la producción de acero, el agua se utiliza en la extracción de los minerales necesarios (mineral de Fe, calcáreos, combustibles fósiles), para el acondicionamiento de los materiales (supresión de polvos y basuras), el control de la polución (torres de lavado de gases emitidos) y el enfriamiento de instalaciones.

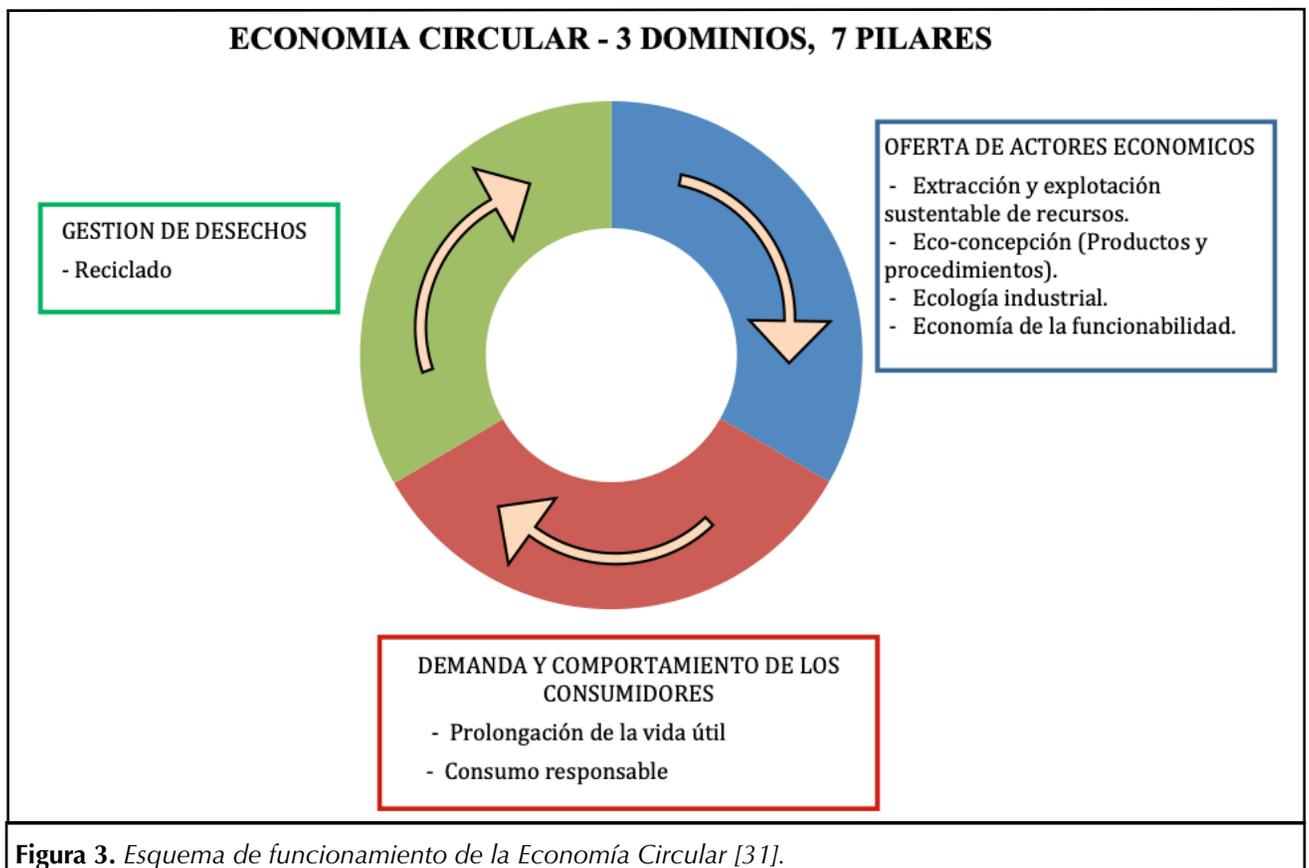
- En la generación de energía el agua se utiliza para el enfriamiento (con pérdidas por evaporación) y para la eliminación de basuras y lavado de gases. La producción de electricidad (generación térmica) que se distribu-

ye por la red requiere un consumo promedio de aproximadamente 24 litros por MJ.

El desarrollo de estos puntos permite concluir que el hombre es el gran demandante de energía y de recursos naturales. Esto puede llevar a serios problemas ambientales a escala planetaria. Por lo tanto, es necesario desarrollar conocimientos y procesos productivos que, además de brindar respuestas a demandas socioeconómicas, cumplan normas de cuidado ambiental (materiales tóxicos, residuos y emisiones contaminantes), las que llevan a la sociedad al terreno de la "producción utilizando tecnologías sustentables".

### ■ PRODUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

El objetivo N° 12 de desarrollo sustentable de las Naciones Unidas corresponde a "**Producción y Consumo Responsable**". En él se expre-



**Figura 3.** Esquema de funcionamiento de la Economía Circular [31].

sa que “El consumo y la producción sustentable consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la energía, la construcción de infraestructuras que no dañen el medio ambiente, la mejora del acceso a los servicios básicos y la creación de empleos ecológicos, justamente remunerados y con buenas condiciones laborales. Esto se traduce en una mejor calidad de vida para todos y, además, ayuda a lograr planes generales de desarrollo, que rebajen costos económicos, ambientales y sociales, que aumenten la competitividad y que reduzcan la pobreza” [31].

El modelo socioeconómico de país en el cual el desarrollo se limita a extraer, producir, consumir y tirar (conocido como modelo lineal) no permite avizorar un futuro razonable para el mismo. Es necesario pasar a un modelo basado en el Objetivo de Naciones Unidas anteriormente citado. En dicho concepto se basa la llamada “**Economía circular**”, la cual se puede definir como “un sistema económico de producción e intercambio que, en todos sus estados del ciclo de vida de productos/ bienes/ servicios tiende a aumentar la eficiencia en la utilización de recursos y a disminuir el impacto sobre el medio ambiente manteniendo siempre el objetivo de bienestar para los ciudadanos” [32].

Como se ilustra en la Figura 3, el modelo de economía circular se basa en tres campos o dominios [33]:

- La producción y la oferta de bienes y de servicios
- El consumo a través de la demanda y del comportamiento del consumidor.
- La gestión de desechos con el reciclado como recurso priori-

tario que permite cerrar el ciclo económico.

La economía circular incluye como pilares (Figura 3):

- La **explotación/extracción sustentable de recursos**, limitando particularmente los desechos de explotación y el impacto ambiental de la producción energética y de minerales o de la explotación agrícola y de bosques tanto para los materiales/energías renovables como para los no renovables.

- La **ecoconcepción o ecodiseño**, que cubre desde la concepción de un proceso, de un bien o de un servicio hasta completar el conjunto de su ciclo de vida, minimizando los impactos medioambientales. Esto es un desafío para la estrategia productiva de las empresas. Por lo tanto, es crucial la inversión empresaria en la ecoconcepción.

- La **ecología industrial y territorial**, la cual tiene como objetivo optimizar la utilización de recursos sobre un territorio, sea en temas energéticos, aguas, materiales, residuos y también en equipamientos y “expertises”. Esto se realiza a través de una aproximación sistémica que se inspira en el funcionamiento de ecosistemas naturales.

- La **economía de la funcionalidad**, que privilegia la utilización a la posesión y tiende a vender los servicios asociados a los productos en lugar de los productos en sí mismos.

- El **consumo responsable**, el cual debe conducir al comprador, sea un actor económico público o privado, a efectuar su elección tomando en cuenta los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, bien o servicio.

- La **prolongación de la duración**

**de vida por parte del consumidor**, que conduce a recursos como la reparación, la venta o la donación de un producto de ocasión, o bien la compra de ocasión en un marco de reutilización.

- El **reciclado**, el cual intenta utilizar las materias primas recuperadas de los desechos.

## ■ CICLO DE VIDA DE MATERIALES Y PRODUCTOS.

El **Análisis del Ciclo de Vida (ACV)** o **Life Cycle Assessment (LCA)** es una metodología de trabajo que toma en cuenta el impacto de todos los aspectos ambientales que ocurren a lo largo de la vida de un producto. Por lo tanto es un elemento básico de la Economía Circular. El ACV permite obtener información estratégica facilitando la toma de decisiones para poder diagramar un verdadero desarrollo sustentable. La realización, aplicación, comunicación y publicación de este tipo de análisis y sus herramientas específicas vinculadas, se encuentran homologados por la familia de normas ISO 14040, bajo el marco metodológico sistémico de Análisis de Ciclo de Vida; Huella de Carbono (ISO 14044; 14067; 14069), Huella Hídrica (ISO 14046), Ecoetiquetas (ISO 14025), entre otras, en continuo proceso de desarrollo y profundización desde el año 1996.

Un comentario importante: Si bien el desarrollo de estos temas tiene ya algunos años y existen cada vez más demandas globales de eco-etiquetado, tanto en Argentina como en muchos otros países no existen en la práctica valores de referencia de impacto ambiental para muchos procesos del sector energético y productivo. Tampoco los hay para productos estratégicos exportables, como es el caso de las “commodities” agropecuarias y de los produc-

tos agroindustriales. Además, entre países desarrollados y en vías de desarrollo pueden existir diferencias en las huellas ambientales que resultan de la existencia de estructuras productivas y tecnológicas disímiles, las que pueden llegar a desequilibrar los términos comerciales entre dichas partes. Existe entonces la imperiosa necesidad a nivel nacional de validar y adecuar en forma consensuada interinstitucionalmente los desarrollos metodológicos a fin de proporcionar información ambiental consistente para nuestros productos, que sirva además como referencia en los inventarios internacionales [34].

La Figura 4 presenta el esquema típico asociado al ACV de un producto:

- El ciclo de vida del producto comienza con el ingreso de las materias primas y la energía y la salida de los recursos naturales del planeta transformados en materiales.

- Ellos son posteriormente transportados y utilizados en la fabricación de productos.

- Los productos son distribuidos, vendidos y utilizados.

- Los productos tienen una vida útil al final de la cual son desechados. Una fracción de estos materiales puede entrar en un circuito de reciclado o de reutilización, el resto estará destinado a la incineración o a su disposición final. Cuanto más grande es la fracción de materiales que entran en el circuito de reciclado o de reutilización, mayor es la

aproximación al concepto de economía circular.

En cada etapa o fase de este ciclo se consume energía y materiales que se obtienen de los recursos naturales. Este consumo va acompañado generalmente de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), junto con otras emisiones bajo la forma de calor a baja temperatura y también con la producción de desechos gaseosos, líquidos y sólidos. A bajas concentraciones, la mayor parte de las emisiones podrían ser inofensivas, pero en la medida que sus cantidades se adicionan, ellas se pueden transformar en peligrosas, particularmente si la suma de todos los subproductos indeseables excede la capacidad de absorción del medioambiente [1].

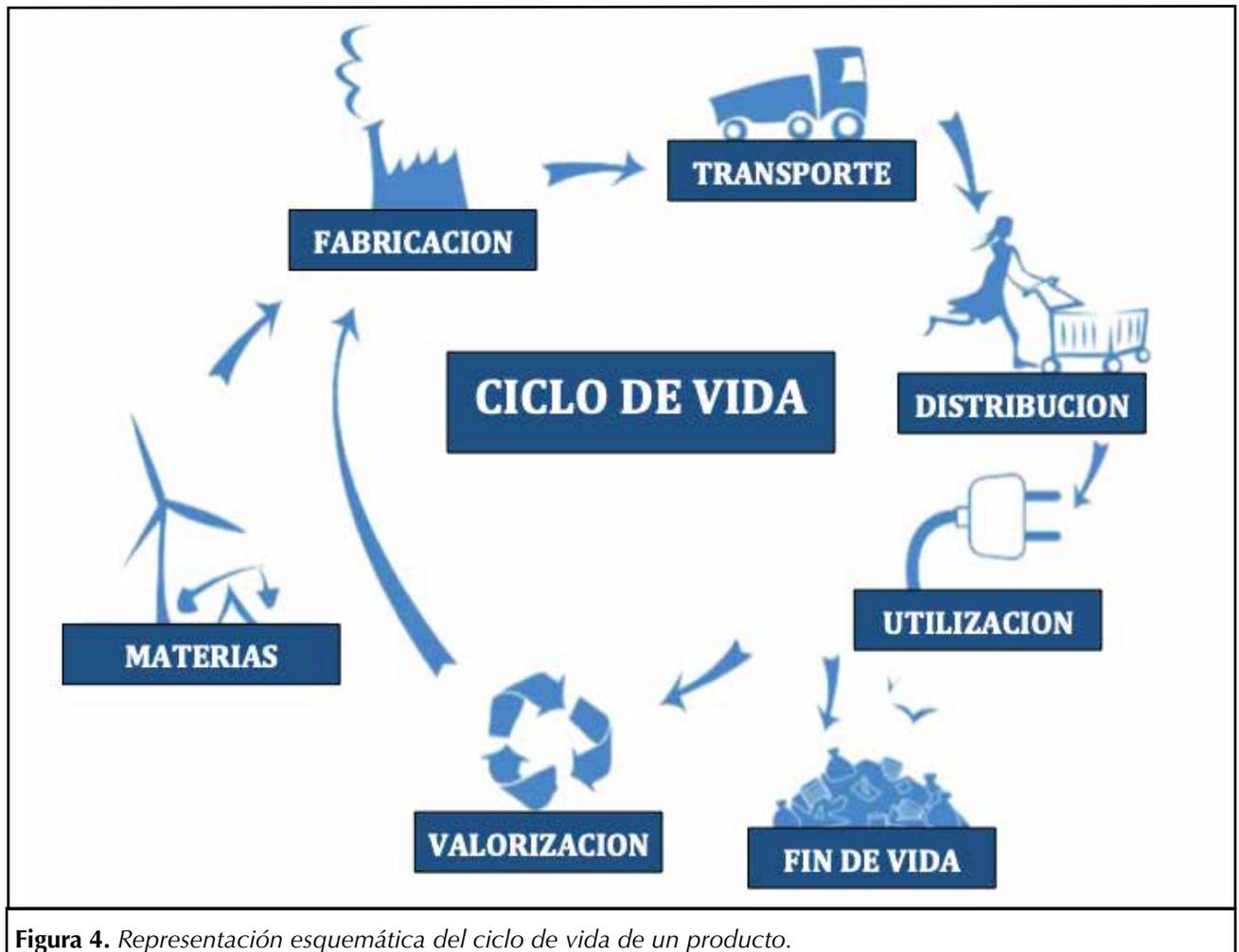


Figura 4. Representación esquemática del ciclo de vida de un producto.

La aplicación de herramientas como el ACV permite producir información sobre:

1. Origen y cuantificación de los recursos materiales y energéticos utilizados en el ACV.
2. Uso del bien o servicio, mejoras en el desempeño en eficiencia energética y evaluación de alternativas de abastecimiento ambientalmente óptimas.
3. Cuantificación y definición de opciones para el tratamiento, recuperación, reciclado y/o disposición final de residuos.
4. Diseño de productos y servicios concebidos para ser desensamblados, maximizar su duración, reutilizar piezas y componentes.
5. Huellas ambientales: los procesos de producción, packaging, transporte, uso o disposición final del producto evaluado impactan en el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida.
6. Aspectos sociales, económicos y legislativos en la cadena de valor de un bien o servicio.
7. Valor de la utilización de materiales sustentables, su conveniencia y desempeño estudiados con base científicas comparables.

Evidentemente, toda esta información habilita a la posterior realización de tareas de ecoconcepción o ecodiseño (o bien a mejoras del mismo) de productos sustentables y competitivos a nivel internacional.

#### ■ REALIZACIÓN DE UN ACV: OBJETIVOS, ALCANCES, DETALLES Y DIFICULTADES.

La realización de un ACV de un

producto se podría resumir en la posibilidad de brindar posibles respuestas a las siguientes preguntas [1]:

- **Objetivo y alcance del ACV:** ¿Cuál es el objetivo del estudio y cuál es la etapa de la vida de un producto a ser estudiada, o sea donde comienza y donde termina?

- **Inventario:** ¿Cuáles son los recursos consumidos y las emisiones producidas?

- **Análisis de impacto:** ¿Cuáles son los efectos sobre el medioambiente (o huellas ambientales) de cada una de las etapas involucradas en ACV? En particular: ¿cuáles son los efectos nefastos?

- **Interpretación:** Qué significan los resultados y qué se puede hacer por la mejora del producto?

#### OBJETIVOS Y ALCANCES

Los alcances de un ACV difieren en función de los objetivos del estudio. Hay casos donde se analiza lo que ocurre en una dada etapa ignorando lo que ocurre en las otras etapas. En otros casos el objetivo es un enfoque más amplio y racional que intenta analizar el consumo de recursos y las emisiones asociadas al producto durante toda su vida útil (o "de la cuna a la tumba"). Sin embargo es esencial no olvidar esta "regla de oro": **no perder la visión global del problema.** Una acción sobre una fase podría tener como consecuencia el aumento del consumo de recursos y/o de las emisiones por parte de las otras fases.

#### INVENTARIO

Esta acción corresponde a la realización de un inventario por unidad producida del flujo de recursos que entran en el sistema y del flujo de

emisiones que salen. El inventario detalla la lista de recursos consumidos y de emisiones por unidad funcional. Igualmente, hay que decidir el nivel de detalle -o de resolución- del análisis. Una importante discusión es el alcance del inventario, o sea, a qué nivel hay que detener la inclusión de componentes para no complicar inútilmente el ACV. Esta toma de decisiones es muy delicada. Como ejemplo, en el caso de materiales electrónicos, la carga ambiental derivada de la producción de componentes electrónicos es alta a pesar de la baja cantidad de material utilizado [35].

Si se toma como ejemplo la identificación de los principales recursos utilizados y de los desechos eliminados en el caso de un lavarropas se encuentra que entre los materiales que lo componen existe en promedio aproximadamente un 50% de acero inoxidable, 17% de plásticos, 4% de aluminio, 3% de vidrio y cobre [36]. Tanto en la elaboración de los materiales como en la fabricación del producto se utiliza energía proveniente de combustibles (fósiles y/u otros), con emisiones asociadas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> y calor a baja temperatura. La fase de utilización consume fundamentalmente agua y energía. Los desechos están constituidos por agua contaminada con detergentes. El final de vida es típico del equipamiento de la llamada "línea blanca", el cual incluye materiales para reciclado y de desecho. En el análisis se debe considerar el transporte de materiales, del lavarropas, de materiales reciclados y desechos.

#### ANÁLISIS DE IMPACTO E INTERPRETACIÓN

El inventario brinda una lista de recursos consumidos y de emisiones, pero éstas no tienen una nocividad semejante, algunas son más

importantes que otras. Las diferentes categorías de impacto comprenden: **el agotamiento de recursos, el potencial de recalentamiento climático, la desaparición del ozono, la acidificación, la eutrofización, la toxicidad para el hombre** y otras. Cada impacto es calculado multiplicando la cantidad de cada uno de los elementos del inventario por un factor de impacto, el cual mide la contribución de un elemento dado a cada una de las categorías de impacto [1]. La metodología de trabajo y la realización del análisis del impacto requieren importante esfuerzo y tiempo. Existe software especializado que ayuda a la realización del estudio.

#### **OTRAS CONSIDERACIONES IMPORTANTES EN UN ACV**

Algunas de las consideraciones más importantes que se deben hacer al realizar un ACV son:

##### **a) Perfil energético del país productor**

La electricidad es la forma de energía más cómoda y la mayor parte de la que se utiliza en el planeta y mayoritariamente se produce quemando combustibles fósiles. La emisión asociada a este proceso y los problemas asociados incitan a los gobiernos a utilizar fuentes energéticas menos contaminantes (renovables, nuclear) para la producción de energía eléctrica. Esto lleva a definir el perfil energético de un país (porcentaje de cada fuente de energía al total producido), que pueden diferir de un país a otro. A modo de ejemplo, Australia utiliza casi un 90% de combustible fósil y Francia posee un 76% de generación nuclear. El perfil energético argentino correspondiente al año 2017 está conformado en un 60% por electricidad de origen termoeléctrico en base a gas natural; 30% hidroeléctrico; 4 % termoeléctrico

en base petróleo; 5% nuclear y un 1% de fuentes renovables [37]. La emisión estimada de CO<sub>2</sub> es de 0,344 kg/kWh, la cual es baja en el orden global [38].

##### **b) Características del transporte**

La materia prima o los productos puede ser transportados por diferentes medios a través de distancias que pueden ser cortas o bien de varios miles de km. El consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub> para desplazar entre dos puntos una dada carga difiere en función del medio de transporte utilizado (camión, tren, avión, barco, etc) y también del modelo del medio utilizado (potencia, peso, consumo, emisiones, etc). Este punto, junto al aspecto comercial (cómo juega el costo del transporte en la competencia en el mercado) puede llegar a ser importante en los resultados de un ACV [39].

##### **c) Energía consumida en la utilización de un producto**

Numerosos productos consumen energía durante sus vidas útiles. En algunos de ellos el mayor consumo se produce en la etapa de utilización (electrodomésticos, automotores, etc). Una parte de esa energía deriva de combustibles fósiles primarios y otra parte (la mayor) proviene de la conversión de este tipo de energía en energía eléctrica. En este caso, el perfil energético de un país también juega un rol importante. Obsérvese que, de acuerdo a lo discutido anteriormente en el punto a), llevar a hervor un litro de agua usando una pava eléctrica no utilizaría la misma energía en equivalente petróleo ni se produciría la misma emisión de CO<sub>2</sub> en Australia, en Francia o en Argentina.

##### **d) Final de vida de un producto**

El final de vida de un producto

está dictado por el hecho de que el mismo ya no posee ningún valor económico. Según Ashby [1], esto puede ser consecuencia de haber llegado al límite de:

- La duración de vida física (la reparación es imposible en condiciones económicas aceptables).
- La vida funcional (ya no es necesaria su utilización).
- La vida técnica (los avances tecnológicos hicieron obsoleto al equipamiento).
- La vida económica (la tecnología ofrece otros productos que realizan la misma función a un costo sensiblemente inferior).
- La vida legal (nuevas normas, directivas, leyes o restricciones que hacen inutilizable al producto).
- El interés por parte de la sociedad de consumo. Un producto puede perder su interés por cambios de gustos, modas, preferencias estéticas, etc.

Las opciones para el fin de vida de los materiales son varias:

- Enviar el material a la descarga de basura.
- Si el material es combustible, incinerarlo produciendo una recuperación de energía en forma de calor (¡no se eliminan las emisiones!).
- Realizar el reciclado de materiales, previa separación y clasificación de los mismos, para reintroducirlos en el ciclo de producción. Este es un tema extenso, con improntas tecnológicas, económicas y sociales de singular importancia cuando se trata del reciclado de materiales metálicos, polímeros, cerámicos (vidrios, ladrillos, asfalto, etc) y materiales

como el cartón, la madera y el papel.

- Reacondicionar los productos (reparación o renovación del mismo, o recambio de ciertas piezas que han sufrido degradación mecánica y/o corrosión entre otros problemas) y reutilizarlos (se lo conoce también como "Extensión de vida útil").

- Reutilizar los productos. Esto significa redistribuirlos en sectores de consumos que aceptan utilizarlos voluntariamente en el estado en que se encuentran (caso típico: un vehículo usado).

Para estas etapas, cuentan las normas establecidas en cada país, la verificación del cumplimiento de las mismas y también la educación ambiental que recibe la población.

Sin duda alguna, reducir el consumo de recursos implica prolongar la vida útil de los productos, hacerlos más durables. El ciclo de vida de la economía circular enfatiza que el fin de vida de un producto no debe ser visto como una fuente de desechos, que los hay, sino como un recurso. El listado anterior de posibilidades de fin de vida de un material pone de manifiesto que, en todos los casos citados, la adecuada selección de los materiales puede llegar a jugar un rol muy singular.

### **SIMPLIFICACIÓN DEL ACV**

A pesar del formalismo riguroso asociado a los métodos de ACV, los resultados pueden poseer una considerable incertidumbre, en particular en la etapa de fabricación. La pregunta es: ¿qué hace con todas las cifras asociadas al ACV quien diseña un producto? Quien lo hace debe manejar múltiples decisiones interdependientes asociadas a la concepción del mismo, encontrándose muchas veces presionado por factores

de diseño, tiempo y economía. Evidentemente se encuentra con una situación difícil para sacar el mejor partido de este tipo de información.

Para una utilización más eficiente de la información, muchas veces se prefiere la opción de concebir un producto basándose en un par de variables medibles como lo son la energía consumida y la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, al cual se lo considera como el contaminante más significativo para seguir los cambios medioambientales [1] [38]. Un par de ejemplos: a nivel nacional, los gobiernos prestan atención a la reducción del consumo de energía y de la emisión de CO<sub>2</sub>; a nivel comercial los automóviles y camiones ofrecen datos sobre consumo y la emisión de CO<sub>2</sub>; en el caso de los electrodomésticos se presentan diferentes niveles de performance energética en función de esta emisión (etiquetado ambiental). Estos datos son una referencia relativa a la etapa de utilización de un ACV.

### **ALGUNOS RESULTADOS DE ACV PARA ELEMENTOS DE LA VIDA COTIDIANA.**

#### **- Electrodomésticos:**

Para los electrodomésticos el mayor costo ambiental está asociado a su utilización. En el caso de una pava eléctrica corriente de 2 kW de potencia y de uso cotidiano durante 4 años, el balance energético muestra que los materiales, la fabricación y el transporte representan poco más del 10% del consumo energético a lo largo de la vida útil de la pava. La energía consumida en su utilización representa el consumo energético más importante. Igualmente ocurre con la emisión de CO<sub>2</sub>, valores que además estarán influenciados por el perfil energético del país donde se la utilice. Al final de vida de la pava, el costo de desecharla es despreciable.

En Argentina, la Resolución 319/99 establece la obligación de certificar el cumplimiento de las normas relativas al rendimiento o eficiencia energética para quienes fabriquen, importen, distribuyan y comercialicen artefactos eléctricos de uso doméstico en la Argentina. Asimismo, también establece que se deberá colocar en los mismos una etiqueta en la que se informe el rendimiento o eficiencia energética.

#### **- Artefactos solares y eólicos:**

Tanto en la producción de energía como en el caso de artefactos que funcionan directamente con energía solar, no existe consumo energético ni emisiones de CO<sub>2</sub> durante la utilización de los mismos. La contribución a la huella ambiental provendrá de los materiales utilizados, su transporte, su producción, embalaje, distribución para la venta y, aunque muchas veces es bajo, sobre el mantenimiento de estos equipos. No hay suficiente información sobre el reciclado de estos materiales.

#### **- Teléfonos celulares y otros dispositivos electrónicos:**

Cada vez existen más teléfonos celulares. Estadísticas muestran que entre los años 2007-2017 se han producido más de 10<sup>9</sup> unidades. A lo largo de su ciclo de vida (extracción de materias primas, fabricación, transporte, utilización y final de vida) un teléfono celular tiene impacto sobre el medioambiente, a los cuales se agregan importantes impactos sociales y también sanitarios. La construcción de un teléfono celular requiere más de 70 materiales diferentes entre plásticos, materiales sintéticos, metales y cerámicos, Figura 5. Los principales efectos ambientales son el agotamiento de recursos naturales y la producción de emisiones tóxicas al medioam-

biente y la emisión de CO<sub>2</sub> [41].

La fabricación de un teléfono celular (de la extracción de minerales al ensamblaje final) es responsable de casi el 75% de los impactos, los que en gran parte son imputables a la pantalla y a la producción de componentes electrónicos complejas. Algunas etapas de la producción como la fabricación de microprocesadores consumen importantes cantidades de energía, agua y productos químicos. Más aún, las componentes electrónicas del celular contienen sustancias que pueden tener un

efecto adverso sobre la salud humana y ambiental si no son cuidadosamente gestionadas al final del ciclo de vida del producto [35].

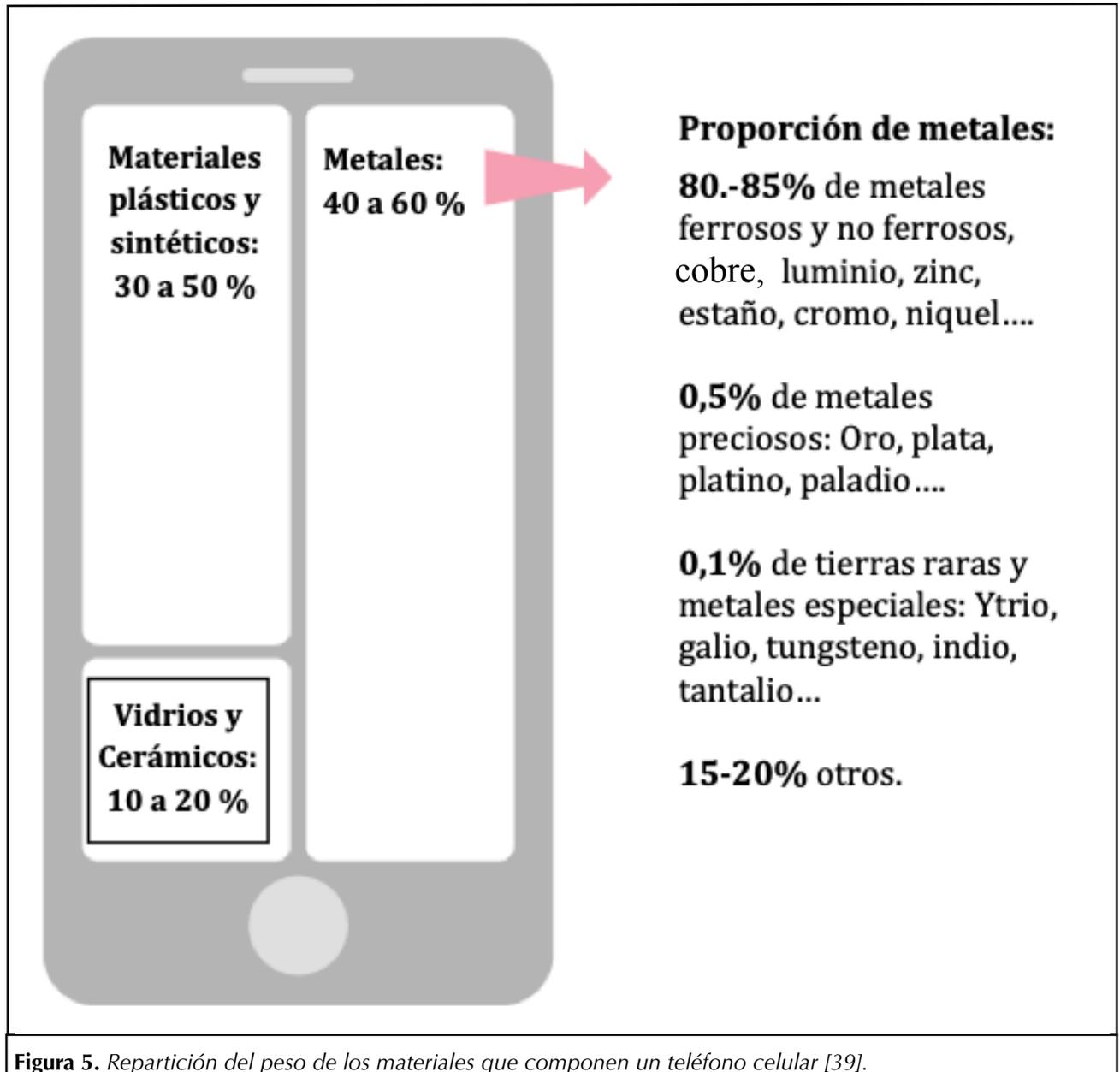
La distribución y la utilización del celular poseen menor impacto ambiental. Estos están asociados a la energía consumida por el transporte y la producción de electricidad. El final de vida tiene un impacto variable en función del reciclado o no del teléfono celular.

Los resultados de este análisis pueden extenderse a otros produc-

tos electrónicos utilizados para las comunicaciones, la informática y el entretenimiento.

#### - Construcciones:

La construcción de obras públicas y privadas tiene su mayor costo ambiental en la obtención de los materiales de construcción y también en el mantenimiento de las mismas. La elección de materiales con un alto contenido de energía incorporada implica un alto consumo inicial de energía en la etapa de construcción del edificio y tam-



**Figura 5.** Repartición del peso de los materiales que componen un teléfono celular [39].

bién determina el futuro consumo de energía para cumplir en la etapa de utilización con las demandas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire. El impacto de los materiales de construcción puede ser reducido significativamente promoviendo el uso de mejoras en las técnicas constructivas existentes y de la eco-innovación a partir de la mayor utilización de nuevos materiales. En viviendas populares, se utilizan algunos materiales compuestos producidos a partir de residuos generados en otros procesos productivos, los que favorecen la aislación térmica e impiden el paso de la humedad [42]. El mantenimiento de las construcciones, que es una tarea a largo plazo puede ser importante, particularmente en relación a la utilización de energía eléctrica en edificios públicos y comerciales.

#### - Automóviles y otros vehículos automotores de utilización regular:

Si bien existe un costo ambiental para la producción del vehículo: materiales, producción, transporte, fin de vida y reciclado, el mayor consumo energético y de emisiones de energía está asociado a su utilización, particularmente al consumo de combustible. En el caso de transporte de cargas, en la Unión Europea existen importantes regulaciones, particularmente sobre emisiones de CO<sub>2</sub>, que son de aplicación paulatina en todo el ámbito de la región [39]. La evolución del vehículo eléctrico y robotizado implicará menor consumo de combustible fósiles y una baja de las emisiones atmosféricas a nivel global.

#### ESTUDIO DE CASO: LA BOTELLA DE AGUA MINERAL

La decisión de estudiar el ciclo de vida de una botella de agua mineral de 2 l, producida en PET con

tapón de PP, las cuales son muy comunes en Argentina, se basa en el impacto ambiental de la misma. Este está asociado a la cada vez más importante cantidad de botellas que se utilizan en el planeta para envasar agua y gaseosas. Algunos datos:

- En todo el mundo se compran más de un millón de botellas de plástico por minuto y el número puede aumentar en un 20% para 2021 [43]. La mayoría de las botellas de plástico utilizadas para agua y refrescos están hechas de PET, que es fácilmente reciclable. Sin embargo, se estima que a nivel mundial solo se recicla alrededor del 9% de los desechos plásticos; se incinera un 12% y el resto se deposita en vertederos o en la naturaleza [44].

- Hay estudios que indican que 12 millones de toneladas de plásticos terminan anualmente en el mar [45]. Solamente un bajo porcentaje de estos plásticos se recupera. Esto es una clara evidencia del efecto acumulativo de los plásticos como desecho.

Siguiendo la metodología propuesta por M. Ashby para el estudio del ACV simplificado [1], los datos necesarios para el estudio son:

a) **Características del producto:** agua mineral (la del osito en la etiqueta, por ejemplo) que se vende en botellas de PET de 2 litros con tapones en polipropileno (PP). Cada botella pesa 36,5 g y el tapón 1,5 g [46] y ambos son producidas utilizando moldeo por inyección. Las botellas se llenan con agua mineral en la región de Mendoza y son transportadas aproximadamente 1.100 km en camión hasta Buenos Aires. Para no tener complicaciones con la logística de distribución en la ciudad se agregan (en promedio) unos 30 km de transporte. Parte de

las botellas se entregan en un supermercado donde se venden al por menor a los consumidores. Para realizar un rápido ACV se considera como unidad de cuenta 100 botellas y que las botellas compradas por los consumidores son generalmente conservadas en promedio un par de días en sus heladeras antes de ser utilizadas. Se supone en forma aproximada que todas las botellas ocupan un volumen total de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de espacio refrigerado en las heladeras familiares. La política de desecho y reciclado por parte de los consumidores se discute posteriormente. El contenido de agua mineral en las botellas debe ser considerado para las etapas de transporte y utilización. Esto hace un peso total de 203,8 kg para las 100 botellas.

b) **Materiales:** se deben presentar los materiales utilizados como materia prima, los contenidos en energía (MJ/kg) y la emisión de CO<sub>2</sub> (kg/kg) por unidad de masa asociados a la obtención de cada material utilizado (PET y PP en este caso). Estos valores corresponden a la media geométrica de los valores extremos que se encuentran en tablas de perfiles tecnológicos, económicos y ambientales de materiales [1]. La suma de los correspondientes a los valores unitarios de la energía y de la emisión de CO<sub>2</sub> multiplicados por la masa de cada elemento utilizado corresponderán al contenido total en energía y a la correspondiente emisión de CO<sub>2</sub> asociada de los materiales para la producción de las botellas.

c) **Fabricación del producto:** generalmente se pone énfasis en los procedimientos primarios

de producción (en este caso inyección). En forma similar al punto anterior se utilizan aquí las energías y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la transformación del material en botellas y tapones.

d) **Transporte:** aquí hay que considerar la energía y las emisiones asociadas al transporte desde Mendoza a Buenos Aires (1.100 km) y la distribución (30 km). En este caso los valores corresponden a un camión diesel con

peso total (tara + carga) de 40 tn: consumo energético de 0,46 MJ/(tn.km) y emisión de 0,083 kgCO<sub>2</sub>/(tn.km) [3] [47] .

e) **Utilización del producto:** se consume energía para refrigerar las botellas de PET durante un período promedio de dos días a 4 °C.

f) **Final de vida:** se acepta que la utilización de un producto reciclado implica un menor consumo de material virgen, lo cual

significa un crédito en energía y en carbono. Para reflejar ese crédito, los valores de la energía de reciclaje y de emisión de CO<sub>2</sub> se consideran como negativos en el balance del ciclo de vida.

g) **Reciclado:** en Argentina se reciclan 225.000 toneladas de plástico por año, lo que equivale al 24% del material disponible, según las cifras de la industria esto significa desconocer el destino del 76% restante. Po-

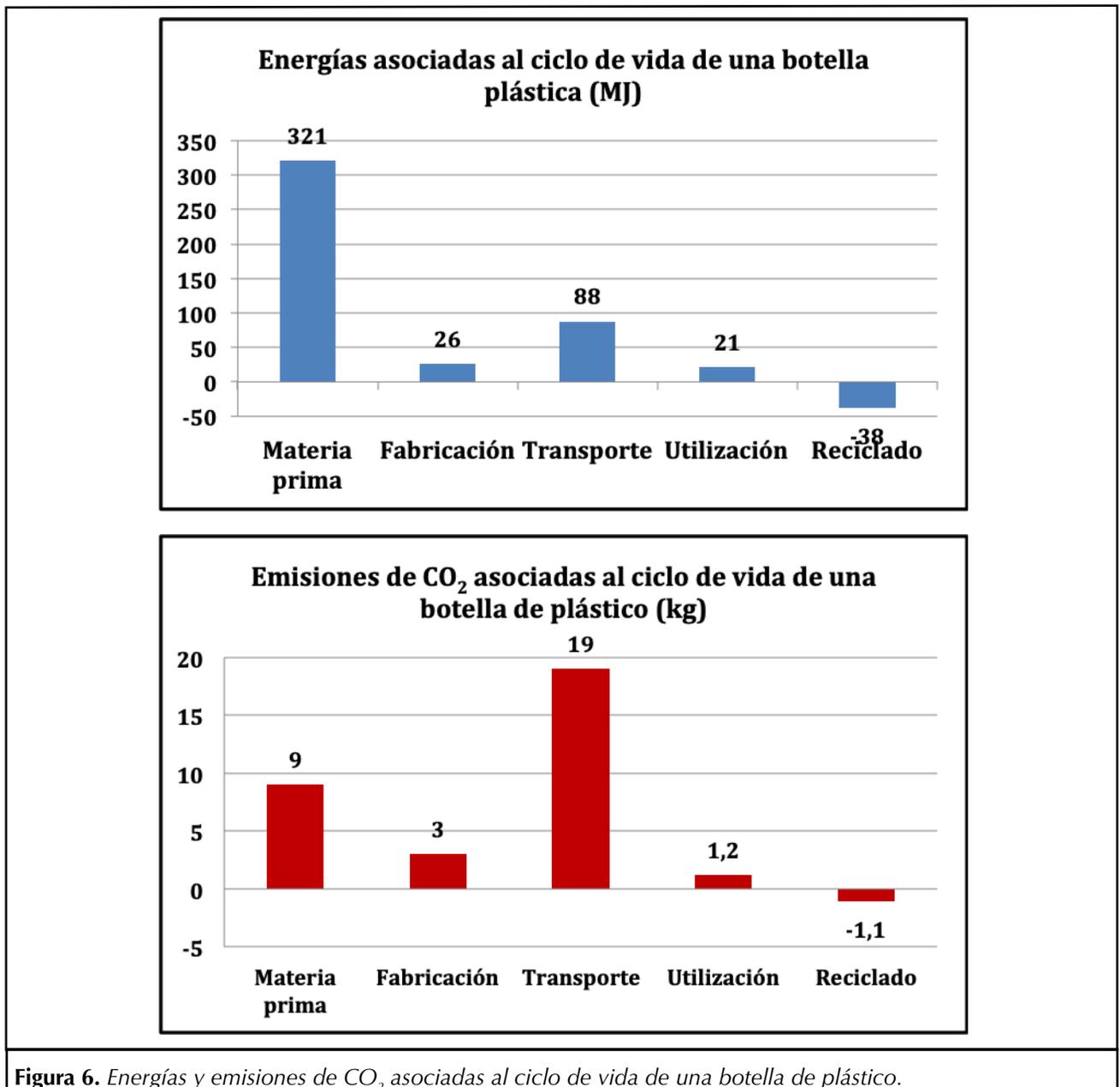


Figura 6. Energías y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al ciclo de vida de una botella de plástico.

siblemente van con la basura domiciliaria hacia los rellenos sanitarios, aunque buena parte termina en el ambiente. La Ciudad de Buenos Aires generó, en 2015, poco más de 143.000 toneladas de residuos plásticos, según un informe elaborado por la Facultad de Ingeniería de la UBA. De esos residuos, el PET representaría aproximadamente un 13%. Es difícil de tener un dato preciso sobre la fracción de volumen de botellas recicladas en la ciudad de Buenos Aires, se toma entonces como valor aproximado un 20% de las botellas de agua [48-49].

La Figura 6 presenta los resultados a lo largo del ciclo de vida. Se observa que:

- La mayor contribución al consumo de energía proviene de la elaboración del polímero utilizado en la fabricación de botellas (70% del total), le sigue el transporte (% del valor total).
- El transporte del agua mineral envasada representa el mayor valor de emisiones de CO<sub>2</sub> (del total) y duplica a las emisiones asociadas a la producción del material (28%). Este dato es preocupante pues es un indicador de producción de emisiones por "transportar agua", pero el mercado demanda el producto por sus propiedades y calidad.
- La producción de la botella y la refrigeración no presentan valores de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> inquietantes frente a los ya señalados.
- Es preocupante el bajo porcentaje de reciclado y también en la cantidad de botellas recicladas, lo cual puede fluctuar anualmente en función de variables

socioeconómicas [46]. En este caso, la baja cantidad de material reciclado no ayuda significativamente a la baja del valor del costo energético (- y de la emisión de CO<sub>2</sub> (-4%).

Otras preguntas que se podrían formular son: ¿existe un polímero menos "goloso" en energía que el PET? ¿Se podría mejorar el porcentaje de reciclado? ¿Qué se podría hacer para facilitar el reciclado de botellas? Por ejemplo: dar un pequeño descuento al consumidor que devuelve los envases de plásticos al comerciante y éste se transforma en un facilitador de reciclado. En el próximo punto se vuelve sobre estos temas. En el caso estudiado queda otra pregunta: ¿no debería existir un servicio ferroviario eficiente para el transporte de cargas que reduzca el costo energético y de emisiones? En este caso la respuesta es política, pues la técnica es obvia.

#### ■ **ECODISEÑO DE PRODUCTOS – SELECCIÓN DE MATERIALES.**

El diseño de un producto amigable con el medioambiente requiere identificar la demanda en energía y las emisiones de las fases de la vida del mismo a través del ACV. Comenzando por las fases dominantes del análisis, se deben proponer posibles elecciones alternativas e innovadoras del diseño de un producto y de los materiales a utilizar, dando origen al llamado **Ecodiseño**. Muchas veces puede ocurrir que una de las fases del ACV sea la dominante y la diferencia es tan neta que las imprecisiones de los datos o las ambigüedades de modelización no afectarán el análisis. En este caso, lo lógico es concentrarse en ella.

La estrategia de selección de materiales es fundamental para el ecodiseño. La misma debe combinar los resultados del ACV con un costo de

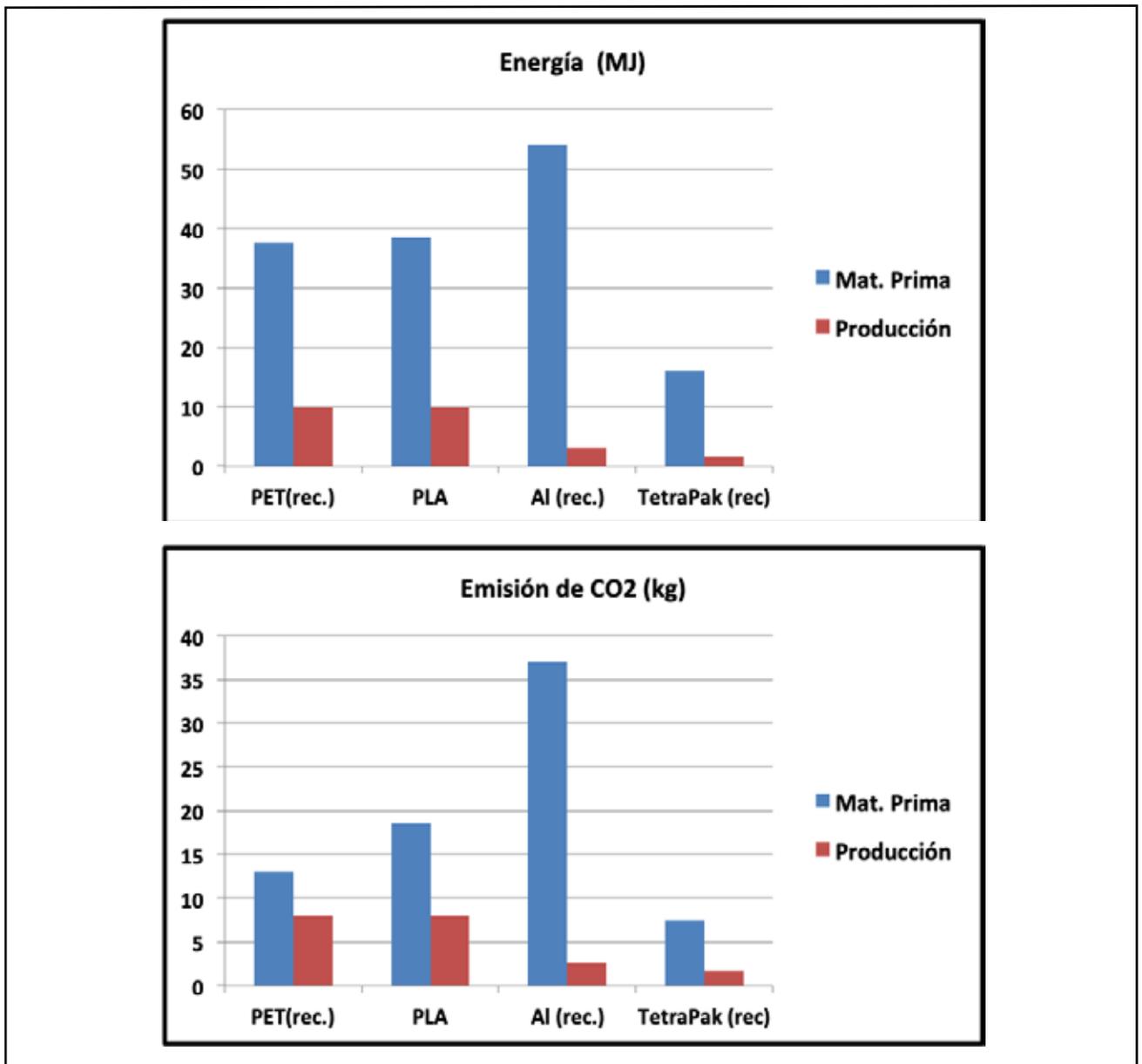
producción aceptable y una precisión suficiente para guiar la toma de decisiones. Recordemos que el tratamiento de estos problemas requiere tanto de los datos de las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas de los materiales, como los datos sobre sus características medioambientales (energía consumida en procesos, toxicidad, reciclabilidad, etc). Ejemplos simples: si la fase de elaboración de un material es la que presenta problemas, la selección del material debería basarse en la minimización del contenido en energía o en las emisiones asociadas; si el problema se presenta en la fase de utilización, la base de la selección podría basarse en la minimización del peso del producto, las propiedades mecánicas, la performance de un aislante térmico o de un conductor eléctrico. Todo esto define los objetivos de optimización que deben verificarse sin olvidar las otras limitaciones que puede imponer el diseño de un producto. Las limitaciones generalmente son múltiples y, a veces, también pueden ser contrapuestas, lo que lleva a la aplicación de criterios de compromiso en la estrategia a desarrollar para la selección de materiales [1].

Además de las estrategias de selección de materiales, existen también algunas "Reglas de Oro" para las tareas de ecodiseño [50] que no deben olvidarse. Si bien ellas están relacionadas con los procesos industriales, los materiales a utilizar y el impacto ambiental de los mismos, las reglas son muy genéricas y deben transformarse y adaptarse para su uso real en la tarea de desarrollo de productos. Algunas de las más generales e importantes son:

- No utilizar sustancias tóxicas y organizar circuitos cerrados para el uso de aquellas sustancias que son necesarias pero tóxicas.

- Minimizar el consumo de energía y de recursos en:
  - la producción y el transporte a través de la gestión interna de la empresa,
  - la fase de utilización, especialmente para aquellos productos que presentan en ella sus aspectos ambientales más significativos.
- Promover una larga vida útil de los productos, especialmente para los que presentan aspectos ambientales más significativos fuera de la fase de uso.
- Utilizar en lo posible pocos materiales y simples.
- Utilizar materiales con características estructurales que permitan minimizar el peso del producto, sin interferir con la flexibilidad necesaria, la resistencia al impacto o en sus prioridades funcionales.
- Utilizar los mejores materiales, los tratamientos de superficie o los arreglos estructurales necesarios para proteger productos que enfrentan situaciones de oxidación, corrosión y/o desgaste.
- Programar anticipadamente la actualización, la reparación y el reciclado del equipamiento.

**Estudio de caso: Selección de materiales para envases para agua y gaseosas.**



**Figura 7.** Energía y emisión de CO2 asociada a la obtención de materia prima y producción de envases.

Se vuelve aquí a un problema emblemático que ya se comenzó a analizar: la selección de nuevos materiales para envases similares a la botella de PET. Este tema es muy importante pues, como se comentó anteriormente, los envases (botellas y otros desechables) representan unos de los grandes problemas medioambientales actuales ya que ellos son duraderos y no forman parte de ningún ciclo natural.

La pregunta del diseñador es cómo elegir materiales de "packaging" amigables con la naturaleza y alternativos al PET. El ACV simplificado presentado para el PET utilizado en envases indicó que se debía poner atención en la selección del material, ya que su producción era el punto predominante en el consumo energético e importante en la emisión de carbono. A continuación se profundiza este tema en base a los resultados de un estudio realizado en la Universidad de Cambridge que compara cuatro materiales para envases de agua mineral [51]. Los materiales considerados en el estudio citado son para envases de 0,5 l:

- PET con tapa de PP,
- un polímero biodegradable PLA con tapa de PP,
- un Tetra Pak,
- una lata de Aluminio (envase de 0,375 l).

El estudio no consideró la botella de vidrio tradicional que puede ser lavada y reutilizada varias veces antes de ser enviada al reciclado del material. Aquí se recuperan algunos resultados que brindan elementos para la selección de materiales, poniendo énfasis en las etapas del ACV de la producción de materiales y de los envases como así también de su reciclado.

En la Figura 7 se puede observar que el Al requiere el mayor uso total de energía y posee la mayor huella de CO<sub>2</sub>. La lata de Al, construida utilizando una fracción reciclada (42,5%) del suministro industrial típico, tiene una huella de CO<sub>2</sub> mayor que la de las otras opciones. El Al puede ofrecer grandes beneficios de su reciclaje, ya que la producción de un 1 kg de Al reciclado requiere 85-90% menos de energía y produce solamente un 5-10% de emisión de CO<sub>2</sub> que la producción de Al virgen [52]. Si se pudiesen reciclar valores más cercanos al 100% del Al utilizado, la huella de CO<sub>2</sub> se reduciría a valores por debajo de la huella actual del PET y sería comparable a la del Tetra Pak, Figura 7. La industria europea de envases de aluminio informa que, en ciertos casos, se está obteniendo una tasa de reciclado del orden del 70% para las latas de bebidas [53].

La opción Tetra Pak es óptima por estar hecha de material reciclado y renovable y además por su menor uso de energía y huella de CO<sub>2</sub>. Este tipo de envase representa un desafío para la industria del reciclaje ya que posee una delgada capa de Al plastificada que no se recicla con facilidad. Las cajas Tetra Pak están hechas normalmente de 6 capas de material y hasta el 78% (en peso) del envase puede ser de papel (incluso se utiliza papel reciclado). El papel de Al en algunos envases pesa entre 5 y 7%; el resto está hecho de polietileno (PE) [54]. Como resultado de la naturaleza híbrida del embalaje, los Tetra Paks no se pueden reciclar junto al papel normal y deben recogerse y clasificarse por separado. En general, faltan en el mundo plantas especializadas en el reciclado de Tetra Paks. Esto hace que generalmente el PE y el Al se dejen juntos como una forma de material híbrido, para utilizarlos luego en materiales de construcción.

Otra solución son los plásticos biodegradables como el PLA (cadenas poliméricas de ácido poliláctico, origen almidón de maíz), aunque la cantidad de PLA reciclado es muy baja pues generalmente estos materiales se compostan en lugar de reciclarse. Una preocupación: el compostaje del PLA puede dejar residuos sin degradar que actúan como contaminantes. Actualmente es más probable que el PLA vaya a un vertedero que al reciclado [55]. Aunque el PLA puede considerarse "compostable", solo se biodegradará en condiciones específicas. Este proceso demora 30-40 días en una experiencia de laboratorio, hasta 90 días para descomponerse en una instalación de compostaje industrial, 12 meses para degradarse en un compostador doméstico y entre 100 y 1000 años si se deja en el medio ambiente [56].

Todo este análisis indica que la elección de un material para packaging no es un problema de simple resolución, pone al diseñador frente a un dilema: la elección del material, además de todas estas consideraciones ligadas al ambiente y a la producción deberá considerar las características del producto a contener, un precio de venta competitivo para el producto, el cumplimiento de regulaciones, el respeto del gusto de los consumidores, etc.

## ■ CONCLUSIONES

De la lectura de este artículo surge un primer grupo de conclusiones que deben llamarnos a la reflexión:

- A través de la historia, el consumo de materiales, energía y agua en los procesos productivos que desarrolla el hombre ha aumentado. Particularmente, esto ha ocurrido en forma explosiva en los últimos 150 años, junto al fuerte crecimiento po-

blacional.

- Actualmente el hombre utiliza muchísimos (y cada vez más) materiales no renovables. El consumo creciente de estos materiales puede, a un futuro no tan lejano, poner en peligro la sustentabilidad del planeta. Por lo tanto se requiere un uso racional de los materiales y de su reciclado. Es imperativo evolucionar en ese sentido copiando los ciclos cerrados de la naturaleza.
- Los elementos que hacen al conocimiento de los materiales y su utilización en procesos productivos, al cumplimiento de normas de cuidado ambiental, a brindar respuestas adecuadas a las demandas económicas y de calidad que la sociedad plantea, llevan al terreno de la producción y uso de tecnologías sustentables.
- Es evidente que la elección y utilización inteligente de materiales aparece asociada en forma directa o indirecta en prácticamente todo el análisis de un proyecto o proceso productivo: diseño, manufactura, costo ambiental, fin de vida y posible reciclado, inversiones, regulaciones, etc. Una herramienta que es de gran ayuda para evaluar la sustentabilidad de un proyecto es el análisis del "Ciclo de vida" (completo o simplificado) de los materiales y productos. Otro elemento fundamental para brindar mayor sustentabilidad del producto a desarrollar es el "Ecodiseño".
- El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA) toma en cuenta el impacto de todos los aspectos ambientales que ocurren a lo largo de

la vida de un producto. Este estudio permite obtener información estratégica que facilita la toma de decisiones para poder diagramar un verdadero desarrollo sustentable. A lo largo del artículo se puso en evidencia la complejidad de la tarea de desarrollo de un ACV y la ventaja de usarlo en forma simplificada (al menos en una primera etapa).

- El Ecodiseño permite proponer y pasar revista a elecciones alternativas e innovadoras en el diseño de un producto y de los materiales a utilizar. La estrategia de selección de materiales es fundamental para el ecodiseño. La misma debe combinar un buen análisis del ACV con un costo de producción aceptable y una precisión suficiente para guiar la toma de decisiones.

Es evidente que estas conclusiones deberían incluir muchas otras asociadas al Ciclo de vida, al Ecodiseño, a las herramientas a utilizar en las evaluaciones tecnológicas y ambientales, etc.

Todo esto conduciría a un estudio mucho más profundo del tema, lo cual queda fuera del alcance de este artículo cuyo objetivo es simplemente poner de manifiesto esta nueva tendencia en la Ciencia y Tecnología de los Materiales.

## ■ BIBLIOGRAFIA

### REFERENCIAS

- [1] Ashby M.F. (2009) *Materials and the Environment*. ISBN 9781856176088, Elsevier Inc, Oxford / (2011) *Matériaux et environnement*. ISBN 978-2-10-054697, Dunod,

Paris (Traducción).

- [2] Diccionario de la Real Academia Española (2018). 23° Edición, Edición del Tricentenario.
- [3] <https://www.significados.com/materia/>
- [4] <https://es.statista.com/estadisticas/635122/evolucion-de-la-poblacion-mundial-hasta-2030>.
- [5] Camarero Bullón C. (2002) Evolución de la población, características, modelos y factores de equilibrio. Encuentros multidisciplinares, 4, N°10, 8-17. ISSN-E 1139-9325.
- [6] Mohen J.P. (1990) *Métallurgie Préhistorique*. Masson, Paris.
- [7] Ashby M. (2010) *Data for Eng. Materials*. Univ. of Cambridge, Granta Design Ltd.
- [8] Jackson M.D., Mulcahy S.R., Chen H., Li Y., Li Q., Cappelletti P., Wenk H.R. (2017) Phillip-site and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist* 102(7), 1435-1450.
- [9] <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=OilProd&mode=chart&dataTable=OIL>
- [10] <https://www.iea.org/topics/climatechange/>
- [11] <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2018/World-crude-steel-output-increases-by-5.3--in-2017.html>

- [12] <http://www.mining.com/web/global-aluminium-production-growth-brakes-sharply-2018/>
- [13] <https://www.statista.com/topics/1409/copper/2017>
- [14] <https://www.statista.com/statistics/264872/world-production-of-lead-metal/>
- [15] [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/insg\\_press\\_release\\_oct2018.pdf](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/insg_press_release_oct2018.pdf)
- [16] <http://www.societechimique-defrance.fr/nouvel-article-355.html?lang=fr>
- [17] [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches\\_criticite/fichecriticite\\_titanite171017.pdf](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticite_titanite171017.pdf)
- [18] <https://www.statista.com/topics/1395/precious-metals/>
- [19] <https://www.weforum.org/agenda/2018/08/the-world-of-plastics-in-numbers>.
- [20] <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>
- [21] [www.asphaltpavement.org/images/stories/GL\\_101\\_Edition\\_3.pdf](http://www.asphaltpavement.org/images/stories/GL_101_Edition_3.pdf)
- [22] [www.wko.at/branchen/industrie/glasindustrie/statistical-data-global-glass-sector](http://www.wko.at/branchen/industrie/glasindustrie/statistical-data-global-glass-sector)(2018).
- [23] The Brick Market–HZZK (2018), [www.hablakiins.com/the-brick-industry/the-brick-market/](http://www.hablakiins.com/the-brick-industry/the-brick-market/)
- [24] [www.fao.org/forestry/statistics/80938/](http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/)
- [25] Pulp and paper capacities – Survey 2016-2021, FAO-UN, Rome (2017), ISSN 0255-7665.
- [26] [http://dnfi.org/abaca/natural-fibres-production-reaches-30-million-tons\\_3655/](http://dnfi.org/abaca/natural-fibres-production-reaches-30-million-tons_3655/)(2016).
- [27] <https://es.statista.com/estadisticas/636870/demanda-de-fibra-de-carbono-a-nivel-mundial/> (2018)
- [28] Grant P.(2013) Future of Manufacturing Project: Evidence Paper 10 Foresight. Government Office for Science.
- [29] [www.iea.org/statistics/](http://www.iea.org/statistics/) (IEA World Energy Balances 2018)
- [30] Blesa M.A.(2018) Apuntes para pensar los grandes problemas del agua en el siglo XXI, en Aguas + Humedales, 18-33, M.E. Abraham, R.D. Quintana y G. Mataloni Eds, Libro digital UNSAM Edita
- [31] [www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/](http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/)
- [32] Geldron A.(2014) Economie circulaire: notions. Fiche Technique ADEMA, France
- [33] <https://institut-economie-circulaire.fr/economie-circulaire/piliers-economie-circulaire/>
- [34] Hilbert J., Schein L. (2018) Las huellas ambientales de la generación de valor. 4-9, Ed. INTA.
- [35] Manhart A., Blepp M, Fischer C., Graulich K., Prakash S., Priess R, Schleicher T., Tür M.(2016) Resource Efficiency in the ICT Sector. Oeko-Institute, Germany.
- [36] La facecachée des objets: vers une consommation responsable. Dossier - Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, France, 9/2018.
- [37] Datos Abiertos de Energía, Argentina (2019). Secretaría de Energía de la Nación, disponible en <http://www.minem.gov.ar/dataset/balances-energéticos>.
- [38] Sensini P., Fiora J., Gil L. y S.(2018) Energías Renovables y Medio Ambiente 42, 1-13. ISSN 0328-932X.
- [39] Information CO<sub>2</sub> des prestations de transports. Guide méthodologique, ADEME (France) (2012).
- [40] Informe, Int. Panel on Climatic Change, IPCC (2007), <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- [41] Guide pratique: impacts de smartphones. (2019).Ed. ADEMA, France
- [42] Zabalza Bribián I., Valero Capiella A., Aranda Usón A. (2011) Building and Environment. 46, 1133-1140.
- [43] Euromonitor International's global packaging trends report. [www.euromonitor.com](http://www.euromonitor.com).
- [44] <https://www.telegraph.co.uk/news/2018/01/10/stark-truth-long-plastic-footprint-will-last-planet/>
- [45] <http://www.eunomia.co.uk/reports-tools/plastics-in-the-marine-environment/>
- [46] Villaverde M.S. (2019). comunicación personal, 31a, UNSAM
- [47] Analyse comparative de la consommation d'énergie et

- des emissions de CO<sub>2</sub> entre le transport routiere et le transport combiné rail/route" IFEU / SGKV, Internation Road TransportUnion (IRU), 2002.
- [48] Estudio de calidad de los Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad Autonoma de Buenos Aires. Informe Final, Fac. de Ingeniería UBA, CEAMSE, 2015.
- [49] Rocha Laura Residuos: El 13% de la basura que se genera en la Ciudad son plásticos y apenas se recicla una cuarta parte. BAE, 17/6/2018.
- [50] Luttropp C.10 Golden Rules in Eco Design. KTH Machine Design, SE-100 44, Stockholm, Sweden.
- [51] Fredriksson C.(2018) Envases de agua y desechos plásticos. Advance Industrial Case Study. Granta Design, Cambridge (UK).
- [52] Green, J. (ed) (2007) Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability. Ohio: ASM International
- [53] <https://www.packaging-gateway.com/news/european-aluminium-reports-73-recycling-beverage-cans/>
- [54] <https://www.tetrapak.com/packaging/materials>.
- [55] PLA info: <https://3dprintingindustry.com/news/is-recycling-pla-really-better-than-composting-49679/>
- [56] Candal R. (2019) Comunicación privada, 3iA-UNSAM. Argentina..

# INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

## Revista CIENCIA E INVESTIGACION

Ciencia e Investigación, órgano de difusión de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC), es una revista de divulgación científica y tecnológica destinada a educadores, estudiantes universitarios, profesionales y público en general. La temática abarcada por sus artículos es amplia y va desde temas básicos hasta bibliográficos: actividades desarrolladas por científicos y tecnólogos, entrevistas, historia de las ciencias, crónicas de actualidad, biografías, obituarios y comentarios bibliográficos. Desde el año 2009 la revista tiene difusión en versión on line ([www.aargentinapciencias.org](http://www.aargentinapciencias.org))

## PRESENTACIÓN DEL MANUSCRITO

El artículo podrá presentarse vía correo electrónico, como documento adjunto, escrito con procesador de texto word (extensión «doc») en castellano, en hoja tamaño A4, a doble espacio, con márgenes de por lo menos 2,5 cm en cada lado, letra Time New Roman tamaño 12. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida, incluyendo el texto, glosario, bibliografía y las leyendas de las figuras. Colocar las ilustraciones (figuras y tablas) al final en página sin numerar. Por tratarse de artículos de divulgación científica aconsejamos acompañar el trabajo con un glosario de los términos que puedan resultar desconocidos para los lectores no especialistas en el tema.

La primera página deberá contener: Título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen y lugar de trabajo, correo electrónico de uno solo de los autores (con asterisco en el nombre del autor a quién pertenece), al menos 3 palabras claves en castellano y su correspondiente traducción en inglés. La segunda página incluirá un resumen o referencia sobre el trabajo, en castellano y en inglés, con un máximo de 250 palabras para cada idioma. El texto del trabajo comenzará en la tercera página y finalizará con el posible glosario, la bibliografía y las leyendas de las figuras. La extensión de los artículos que traten temas básicos no excederá las 10.000 palabras, (incluyendo título, autores, resumen, glosario, bibliografía y leyendas). Otros artículos relacionados con actividades científicas, bibliografías, historia de la ciencia, crónicas o notas de actualidad, etc. no deberán excederse de 6.000 palabras.

El material gráfico se presentará como: a) figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) y se numerarán correlativamente (Ej. Figura 1) y b) tablas numeradas en forma correlativa independiente de las figuras (Ej. Tabla 1). En el caso de las ilustraciones que no sean originales, éstas deberán citarse en la leyenda correspondiente (cita bibliográfica o de página web). En el texto del trabajo se indicará el lugar donde el autor ubica cada figura y cada tabla (poniendo en la parte media de un renglón Figura... o Tabla..., en negrita y tamaño de letra 14). Es importante que las figuras y cualquier tipo de ilustración sean de buena calidad. La lista de trabajos citados en el texto o lecturas recomendadas, deberá ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor, seguido por las iniciales de los nombres, año de publicación entre paréntesis, título completo de la misma, título completo de la revista o libro donde fue publicado, volumen y página. Ej. Benin L.W., Hurste J.A., Eigenel P. (2008) The non Lineal Hypercycle. Nature 277, 108 – 115.

Se deberá acompañar con una carta dirigida al Director del Comité Editorial de la revista Ciencia e Investigación solicitando su posible publicación (conteniendo correo electrónico y teléfono) y remitirse a cualquiera de los siguientes miembros del Colegiado Directivo de la AAPC: [abaladi@dna.uba.ar](mailto:abaladi@dna.uba.ar) - [nidiabasso@yahoo.com](mailto:nidiabasso@yahoo.com) - [miguelblesa@yahoo.es](mailto:miguelblesa@yahoo.es) – [xammar@argentina.com](mailto:xammar@argentina.com) - [sarce@cnea.gov.ar](mailto:sarce@cnea.gov.ar) y con copia a [secretaria@aargentinapciencias.org](mailto:secretaria@aargentinapciencias.org)

Quienes recepcionen el trabajo acusarán recibo del mismo y lo elevarán al Comité Editorial. Todos los artículos serán arbitrados. Una vez aprobados para su publicación, la versión corregida (con las críticas y sugerencias de los árbitros) deberá ser nuevamente enviada por los autores.