

CIENCIA DE MATERIALES: CONTRIBUCIÓN A LA I Y D EN EL CAMPO DE LOS PROCESOS DE SOLIDIFICACIÓN DE METALES Y ALEACIONES

■ Heraldo Biloni.

Investigador Superior Emérito, Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires.
Asesor Científico del Grupo de Solidificación del IFIMAT, U.N.C.P.B.A., Tandil.

■ 1- INTRODUCCIÓN:

El Dr. J. R. Galvele (*) da un panorama objetivo de la creación y el desarrollo de las actividades en Metales en la CNEA en el período 1955-1993, a partir de su origen y hasta en el que se formaliza la creación del Instituto Prof. Jorge A. Sabato, UNSAM - CNEA. En su análisis se limita, casi exclusivamente, a la Metalurgia Nuclear, formación de Recursos Humanos y desarrollo de Reactores Nucleares de Investigaciones y de Potencia. Ello fue el objetivo inicial de la Institución. Sin embargo sería el acto inicial y el núcleo de todo un desarrollo paralelo en el país y el área latinoamericana de lo que hoy se intitula "Ciencia de los Materiales". Esta estrategia cuyos objetivos probablemente carezcan de antecedentes en el mundo se plasmó a través de 25 Presidentes de nuestra República. (En el univer-

so de Sabato el tiempo se divide en períodos de ejercicio del P.E. de diversos personajes que fluctuaron en la política vernácula. Se llegó a decir en su entorno "solo faltan un *boy scout* y un bombero")

El objetivo del presente trabajo, fruto de una generosa invitación, consiste en el relato personal de mi actuación a partir de la Resolución N°5 del 19 de Abril de 1955 de la Presidencia de la CNEA primer nombramiento oficial del equipo de I y D en el Área Metalurgia, dirigido por J. A. Sabato y su "ayudante de campo", el Dr. L. A. Boschi. Fue el comienzo de mi carrera científico-tecnológica en diferentes instituciones del país y el extranjero, basada en la estrategia de Sabato en el área de la "Ciencia de los Materiales". El lapso correspondiente a mi graduación de Ingeniero Aeronáutico en 1952 (UNLP) y el ingreso a la CNEA

correspondió a actividades privadas, desde arquero profesional de fútbol, profesional de Ducilo S.A. y a partir de 1954 al usufructo de una beca en Crisoldinie (acería del grupo DINIE) por un año. Fuertemente asociada a prácticas de Metalografía en aceros sometidos a tratamientos térmicos, área fundada por el Ing. Sturla en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNLP y valiosas interacciones con el Profesor E. Abril, cuya beca por un año en el Massachusetts Institute of Technology (MIT, en EE.UU.) entreabría, a mi juicio, una puerta en la Universidad Nacional en el tratamiento de la Metalúrgica Física en el ámbito académico. Este esfuerzo, me enteré posteriormente, fue paralelo al que Sabato y sus colaboradores llevaban a cabo en la Empresa Decker S.A. en el campo de las aleaciones de cobre y en mi caso resultó muy significativo. Los métodos de preparación de las

superficies a través del pulido mecánico seguidos de ataques químicos utilizados en la UNLP y, los más modernos, relacionados con el pulido electrolítico por Sabato y sus colaboradores determinaron mi futuro profesional. La correlación entre las microestructuras y las propiedades físicas, químicas y mecánicas sería el campo principal en mis tareas de I y D. El microscopio óptico primeramente y los equipos electrónicos que lo siguieron tanto del punto de vista analítico cuando cuantitativo serían las herramientas a utilizar.

■ 2- TRAYECTORIA CIENTÍFICA – TECNOLÓGICA

Sabato formó su masa crítica en la I y D de la Metalurgia básica, aplicada y tecnológica considerada por él y sus colaboradores como una unidad regida por la aplicación del método científico. En su esquema no existían fracturas sino circunstanciales diferencias de metodología dependiente de la vocación del investigador pero que están regidas en su conjunto por la calidad en la aplicación de aquel método. Si la calidad es elevada su complementación e integración será mucho más fácil de lo que los “opinólogos de la básica y la aplicada” discuten desde hace décadas. En ese contexto me incorporé al sistema permanente de CNEA en la caracterización estructural del uranio, a través del uso del pulido electrolítico con la aplicación de luz polarizada de nuestro primer microscopio Panphot y Zeiss prestado por el Instituto Rivadavia. Éste finalmente pasó a nuestra propiedad a través de un intríngulis burocrático de décadas que merecería todo un capítulo en el libro que soñé pero nunca llegué a escribir y que hubiera intitulado “*La ciencia en camiseta*”. Hoy aquel y viejo y querido Carl Zeiss recibe a los visitantes de la gerencia de tecnología como un ícono de una obra global escépticamente

observada por vetustos académicos de aquella época. Siempre vuelve a mi memoria el día en que junto a Sabato detectamos una estructura que llamamos “rayas”. Luego de la “académica” expresión: “¿qué corno es esto?” nos sumergimos en la Biblioteca de la CNEA donde la realidad apareció. La estructura eran maclas cristalinas de un metal anisotrópico como lo es el uranio. Me autoconsoilé pensando que probablemente la muestra de Uranio haya sido la primera pulida electrolíticamente en el hemisferio sur. Hoy creo que desde ese momento me convencí que una metalografía cualitativa y cuantitativa sofisticada sería el soporte de mis trabajos de I y D en procesos metalúrgicos que posteriormente resultaron ser los asociados a la solidificación de metales y aleaciones.

En 1956: Durante todo ese año realicé trabajos de investigación de posgrado en el *Max Planck Institute für Metallforschung* en Stuttgart, Alemania, enviado por la CNEA, bajo la dirección de los Profesores W. Koster y E. Gebhard en el área de aleaciones ternarias de aluminio, con especial énfasis en la interpretación de diagramas ternarios por diferentes métodos de investigación.

Los métodos de Sabato en la formación de Recursos Humanos fueron heterodoxos. Hubo, a partir de 1955, una sucesión de Cursos y Seminarios con profesores nacionales pero introdujo variantes audaces y exitosas en su afán de desarrollar una Institución de nivel internacional enunciada en una dialéctica profutbolística. A) Primero: “jugar en la primera”; B) Luego alcanzar nivel internacional; y C) ir por la copa del mundo, en ese orden. Significó un éxito su estrategia de contratación de profesores de alto nivel por períodos del orden de 3 meses cada uno. 1955: Robert Cahn de Inglaterra, 1956 Erick Gebhard de Alemania y

1957 Paul Lacombe de Francia. Paralelamente envió a miembros de su laboratorio en formación a los Institutos por ellos dirigidos, mi caso ya fue especificado, donde con la valiosa colaboración del Ing. Gunther Josephr de Chile y Jorge Kittl, residente en Frankfurt en los laboratorios de Degussa pudimos establecer la versión de las clases de Gebhard en Alemán e Inglés para el Profesor y versión en Castellano para los alumnos en Buenos Aires.

Cuando le preguntaron a Sabato por la ausencia de Profesores de EE.UU. contestó algo así: “Prefiero que entrenen sus células grises, comunes en cantidad y calidad a todos los humanos, en Institutos de excelencia con recursos limitados por la guerra pero donde la relación entre células grises entrenadas e ideas creativas sea semejante aunque el esfuerzo operativo sea mayor y no que me reclamen, por ejemplo, que haya cañerías de argón con canillas *ad hoc* para facilitar sus tareas en Buenos Aires”.

Dentro de esa filosofía, a partir de 1957, comencé en Buenos Aires trabajos de I y D en solidificación controlada de aleaciones diluidas de Al-Cu, metales de alta pureza de obtención posible en la CNEA.

El año 1957 es un año fundamental en mis trabajos científicos en solidificación donde coayudaron una serie de factores favorables. Es de resaltar que sobre la base de mi asociación con el Profesor Paul Lacombe, uno de los más grandes metalurgistas franceses de todos los tiempos, aplico los conocimientos adquiridos en las técnicas modernas desarrolladas por él y su escuela (capas epitaxiales, esto es metalografía en colores de alta sensibilidad, figuras de corrosión, etc.) al estudio controlado de la solidificación sobre la base de los estudios de Chalmers

y su escuela en Toronto, primero y Harvard posteriormente, y me convierto así en el único investigador en el mundo que comienza a desarrollar el estudio científico de los fenómenos de solidificación en forma independiente de Chalmers y su escuela. Quienes lo habían iniciado en 1950, controlando adecuadamente el gradiente térmico en el líquido G_L a partir de la interfaz sólido-líquido (S-L), la composición de aleaciones diluidas Sn-Pb y Pb-Sn y la velocidad de avance de la interfaz S-L (V). El modelo simplificado no contemplaba el gradiente térmico G_s en el sólido y la convección existente en el líquido. Afortunadamente publicaban en el *Canadian Journal of Physics*, revista científica que recibía la CNEA en su biblioteca, de manera que se podía consultar desde la cota cero la marcha del estudio de la solidificación que en ese momento se centraba en la formación de las subestructuras cristalinas a través de la distribución de las llamadas dislocaciones cristalinas e inestabilidades morfológicas de la interfaz S-L que se traducirían en la microsegregación de soluto en la fase sólida.

Asimismo, en 1953 se crea la revista *Acta Metalúrgica* (hoy *Acta Materiales*) bajo la dirección de Bruce Chalmers, la que desde su inicio poseyó la Biblioteca de la CNEA. Allí se publicó el trabajo "sobre enfriamiento constitucional", pieza de relevancia histórica (Atiller W., Jackson K.A., Rutter J. N. Chalmers B.: *Acta Met* 1 453). Allí se formaliza el modelo simplificado de Chalmers y su escuela, descrito por la ecuación:

$$(G_L/VC_0) \leq m_L [(1-k_0)/D_L k_0]$$

En esta ecuación, G_L es el gradiente térmico en el líquido frente a la interfaz S-L; V es la velocidad de avance S-L; C_0 es la composición de la aleación diluida bajo estudio;

m_L es la pendiente de la curva de equilibrio considerada recta; k_0 es el coeficiente térmico de equilibrio de la aleación; D_L es el coeficiente de difusión en el líquido.

La variación del término G_L/VC_0 se traduce en diversas topologías en la interfaz S-L decantada y observada por metalografía óptica sin tratamientos posteriores. Las aleaciones utilizadas fueron Sn-Pb y Pb-Sn diluidas.

Apliqué al conocimiento acumulado en dichas aleaciones al caso de aleaciones diluidas de alta pureza Al-Cu pero agregué el pulido electrolítico de la interfaz S-L obteniendo capas epitaxiales coloreadas en función de la microsegregación por oxidación anódica y luz polarizada. Asimismo implicó el usar técnicas de detección de dislocaciones (a través de las llamadas figuras de corrosión). El trabajo H. Biloni *Can J Phys* (1961) 39, 1501, resume los resultados obtenidos y significó un progreso en el conocimiento de la solidificación controlada.

En 1962 habían ocurrido 2 hechos importantes en el desarrollo del laboratorio de metalurgia de la CNEA: a) la creación del primer curso panamericano de Metalurgia (CPM) que con amplio apoyo institucional, nacional e internacional inicia su larga trayectoria de formación de RRHH en el país y el subcontinente latinoamericano, tendiente a establecer una estructura académica en el área de metales primeramente y materiales en general posteriormente, que abarcaría todo el espectro de la educación terciaria desde la licenciatura hasta los doctorados y pos doctorados. El Dr. Galvele da detalles adecuados de los 10 primeros CPM llevados a cabo en la CNEA. En mi caso particular, dicho 1er CPM constituyó un hito importante porque inició una

colaboración científica con G. F. Boling, profesor del 1er CPM en el área de Solidificación y miembro de la escuela de Chalmers y, a la sazón, en los laboratorios de I y D de la *Westing House* con el Dr. W. Atiller miembro también de dicha escuela. Mi colaboración con Bolling se extendió por muchos años.

Las relaciones con el Centro Atómico Bariloche fueron fluidas desde el comienzo del Laboratorio de Metalurgia de la CNEA. La fundación del hoy Instituto Balseiro fue prácticamente paralela. Tal es así que en el área Metalúrgica, los miembros de la CNEA daban cursos por períodos de dos meses a su regreso de los Centros Europeos. En mi caso particular, conjuntamente con el Dr. Carrea, tuve una estadía de dos meses a principio de 1958. Durante ese período dimos un curso de diagramas ternarios, tema en el cual había trabajado en el *Max Planck Institute* en Stuttgart. En este contexto Sabato organizó en 1962 con Sede en el Instituto de Bariloche, una reunión internacional intitulada "El Impacto de la Metalurgia física sobre la tecnología" a la que concurrieron los mejores científicos tecnológicos de USA, Gran Bretaña, Alemania, Unión Soviética, Brasil y Argentina que incluyó la casi totalidad de los miembros del laboratorio de la CNEA que tenían la misión de asistir, según su disciplina, a los expertos de los países invitados. Mi asociación fue con el Prof. Chalmers. Recuerdo que cuando le pregunté a Sabato de qué podría hablar, con mi inglés elemental del Nacional de Quilmes, me contestó según su estilo: "Háblale de 'él', es lo que más le gusta a los gringos". Durante la conferencia le entregué una separata de mi publicación con el *Can of Phys*. A la mañana siguiente me felicitó por su contenido y las técnicas utilizadas, la mencionó tangencialmente en su disertación en

la conferencia que dictó como un avance importante en la detección de estructuras y subestructuras de solidificación. Luego me ofreció una posición de *Faculty Member* en la Universidad de Harvard en el *Gordon Mc Kay Laboratory of Applied Physics*, con el rango de *Postdoctoral Research Fellow*, a partir de Junio de 1963, poniendo bajo mi dirección tres alumnos de grado. El contrato por dos años y medio se hizo en el marco de un contrato entre Harvard y la *United Steel Corporation*, para el estudio del origen y desarrollo de la estructura equiaxial de los lingotes de fundición. Este contrato es el primero que realizó la *United Steel Corporation* para el estudio de las estructuras de fundición sobre la base del conocimiento científico desarrollado por Chalmers y su escuela. La aplicación de las técnicas metalográficas de alta sensibilidad, impuesta por mi, en el estudio de la microsegregación fue la estrategia utilizada y aceptada por Chalmers. Se inauguró así lo que sería la estrategia de investigación en *"Solidification Processing"* impuesta por Biloni y su escuela latinoamericana: "La detección rigurosa del mapa de microsegregación permite conocer la historia térmica del proceso bajo estudio".

El período de Harvard coincide con una actividad inusitada en el área de solidificación y sus procesos conexos en todo el mundo. Harvard, con Chalmers y Turnbull, el M.I.T. con Flemings y su grupo, Canadá con Weinberg y sus asociados, Stanford con Tiller y sus asociados, Cambridge en Inglaterra con Chadwick, Oxford con Hellawell, Suecia con Hillert y sus asociados, General Electric con John Cahn, Rutter, Walker y asociados, los laboratorios de I y D de Ford con Bolling y asociados, etc.

En este período introduje con Chalmers el concepto de "Solidificación predendrítica" fruto de la aplicación de su metodología experimental que determina las primeras etapas del crecimiento cristalino a partir de la nucleación (Biloni H., Chalmers B. (1965) "Predentric Solidification". Trans. TMS-AIME, 233, 373), que se transforma en el trabajo clásico de la literatura y serviría como basamento para el estudio y comprensión posterior del origen y desarrollo de la estructura superficial ("chill" o acoquillada) de los lingotes y piezas de fundición y modernas tecnologías como las relacionadas con la solidificación ultrarrápida.

Los trabajos en Harvard con Chalmers dieron lugar a otro trabajo importante titulado *"Origin of the Equiaxed zone in Small Ingots"* (1968) *Journal of Materials Science* 3, 319, donde se analizan los mecanismos de formación de esta estructura de vastas implicancias tecnológicas y que servirá de base a nuevos trabajos ya en escala de planta piloto e industrial.

Durante el período y en forma paralela a los trabajos citados, continúa mi asociación con G. F. Bolling estudiando, con las técnicas elaboradas de metalografía, la microsegregación en aleaciones crecidas unidireccionalmente. Se introduce el concepto de "nodos", esto es depresiones en la interfaz sólido-líquido como primera manifestación de inestabilidad de la interfaz y, por ende, la de "microsegregación nodal". Determinando la responsabilidad del mecanismo de nodos, en la evolución de la interfaz sólido-líquido desde plana a celular dendrítica, común en los procesos tecnológicos. Surgen así trabajos publicados en Revistas especializadas de alto nivel de USA y Canadá. Mis técnicas de "vudu" como se les

designaba por mis colegas en USA funcionaban exitosamente. Durante mi estadía en Harvard, se publica el libro de B. Chalmers *"Principles of Solidification"* 1964, John Wiley and Sons, demostrando lo que hoy es considerado la primera expresión del estado del arte en la materia. El libro contiene 10 contribuciones relevantes de Biloni y Chalmers y una de H. Biloni y Bolling (Biloni H., Bolling G. F. (1963) Trans Met Soc AIME, 227, 374). A fines de 1965, decido regresar a Buenos Aires según lo pactado con Sabato. Pese a poseer condiciones administrativas de residencia en EE.UU. conjuntamente con mi esposa rechazo el suculento contrato de trabajo de Julius Horward, *manager* del *Ford Research Lab* como *"Senior Scientist"*. Por lo menos en esos tiempos renunciar a un contrato de ese tipo en USA era considerado "imposible". Solamente una explicación sobre la existencia de mi "abuelita enferma" pudo convencerlos. De todos maneras nuestra colaboración con el Dr. Bolling continuó por varios años en los que se plasmaron resultados relevantes con los doctores G. F. Bolling y G.S. Cole colaborador de Bolling en el *Ford Research Lab*, ambos eran canadienses aunque en su momento el sistema político de USA los convirtiera en ciudadanos norteamericanos.

1966-1968: De regreso a Argentina, se crea la División Solidificación y Fundición de la CNEA, organizando un grupo de I y D en Procesos Metalúrgicos relacionados con esa disciplina dirigido por H. Biloni.

Dicho grupo estaba formado por físicos, ingenieros y químicos de Argentina, habiendo interactuado en el período dentro de la División Solidificación y Fundición tres investigadores franceses y uno español, a lo largo de 10 meses cada uno. Es de destacar asimismo que recibí por

tres años un importante apoyo económico en ese período, procedente de Agencias de Estados Unidos: "*Relationship between segregation substructures and castin structures*", sobre la base de mis importantes contribuciones a la tecnología de fundición, realizadas en Harvard. Durante el mismo período y mediante la aplicación del concepto de "Solidificación predendrítica" introducido con Chalmers en la literatura, se publica el trabajo titulado: "*On the origin of the chill zone in ingots solidification*", Biloni H. Morando R. (1968) Trans. TMS-AIME, 242. En el cual, sobre la base de ingeniosos métodos experimentales, se perfeccionan los trabajos realizados por Flemings y sus colaboradores en el M.I.T., dilucidando con éxito los mecanismos que determinan la formación de la estructura *chill* o aboquillada de los lingotes y piezas fundidas. Dicho trabajo, uno de los clásicos de la literatura especializada, fue elegido por la *Hopkins University* como uno de los 3000 trabajos científico-tecnológicos de todas las ramas de conocimiento en el período 1968-1969. Son considerados trabajos claves o "*key-papers*", los que fueron estudiados a lo largo de un lapso en lo referente al impacto realizado sobre las diferentes disciplinas y tecnologías afines. Durante este período fui invitado a la primera Conferencia Mundial de Solidificación en Brighton, Inglaterra, que se realiza cada 10 años, donde presenté un resumen de mis trabajos en desarrollo. Se publica en ISI P 110, pág. 74, en Inglaterra, *Proceedings* de lo que es considerado un hito en las Conferencias de la especialidad. Es en 1968 cuando fui contratado por el *Centre d'Etudes Nuclaires* de Grenoble, Francia, junto con la Universidad de Metales, conjuntamente con el Dr. G.S. Cole de Canadá. De dicha acción se produce una colaboración con excelentes investigadores franceses, quienes estuvieron

activos durante muchos años en el campo de los procesos de solidificación. Por otra parte, los trabajos de C. Calvo de España fructificaron en importantes contribuciones en el campo de la microsegregación de aleaciones Al-Cu. Asimismo, en este período en el que se incorporan investigadores argentinos y del resto de Latinoamérica, los que comienzan una acción continental que pasará a explicar a continuación.

1969-1980: La creación del Proyecto Multinacional de Metalurgia, en el año 1969, dentro del Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico de la OEA (PRDCyT), con sede en la CNEA, me confiere la tarea de ser uno de sus más activos protagonistas, dirijo el área de Solidificación, Fundición y Soldadura desde sus comienzos. En 1971, paso a ser Sub-Director del Proyecto y Director del mismo en Argentina a partir de 1972. Además de proseguir mi interacción con el grupo de I y D de la Ford Research Lab., de Detroit, a través del Dr. Bolling y sus colaboradores; se incorporan investigadores de Brasil, Chile, México, Guatemala, Colombia, Perú y Argentina que realizan trabajos de I y D en temas científicos-tecnológicos tales como:

- 1) Materiales compuestos de tipo eutécticos;
- 2) Segregación;
- 3) Refinamiento de grano;
- 4) Segregación por gravedad;
- 5) Fluidez de metales y aleaciones;
- 6) Transferencia calórica en el sistema metal-molde;
- 7) "*Scale up*" de estructuras de lingotes desde escala de laboratorio a la de planta piloto e industrial;
- 8) Colada continua y semicontinua de aleaciones de aluminio;
- 9) Soldadura de materiales ferrosos y no ferrosos;
- 10) Tratamientos de homogenización de estructuras de solidificación;
- 11) Fundición bajo presión;
- 12) Corrosión de piezas fundidas.

Todos estos temas darán lugar a trabajos de tesis doctorales, de desarrollo y de

directa transferencia tecnológica en procesos metalúrgicos en los que la Solidificación es protagónica. Paralelamente, actué activamente en el marco del PRCDyT de la OEA en los que realicé numerosas contribuciones originales para el desarrollo tecnológico del continente.

■ 2.1. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN EL PERÍODO 1969-1999.

Consideraré aquí las líneas principales de I y D iniciadas en la CNEA, que se concretaron en el período 1969-1980 y continuaron a partir del año 1980 en el LEMIT-CIC y otras instituciones en las que actué.

Como consecuencia de un acuerdo entre el Presidente de la CNEA y el Dr. A. C. Taquini (hijo), Presidente de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), seguiría el siguiente esquema: i) docencia por un año para transformar el LEMIT de La Plata en un centro de I y D en materiales y la formación de Recursos Humanos de nivel adecuado.

Por razones administrativas nacionales y con el acuerdo de ambos Presidentes, pasé a actuar con el rango de Investigador Superior Invitado de la CIC de manera de procurar el desarrollo exitoso de las materias iniciadas en el primer año de docencia y el compromiso de las actividades, no solamente en los procesos de solidificación sino también de los materiales no metálicos utilizados en el uso vial, tales como asfalto y tecnología del hormigón. Éstas se reactivaron durante el primer año del convenio bajo la dirección de ingenieros civiles que ingresaron a la CIC por mi sugerencia en carácter de investigadores independientes y configuraron hasta el presente áreas de investigación, desarrollo y ensa-

yos mecánicos de excelencia en el país.

Continuaré ahora con detalles del área bajo mi dirección directa en procesos de solidificación.

1) Homogeneización de estructuras de solidificación. Corresponde a la tesis de la Dra. D. Fainstein, de Argentina, rendida en el ámbito del Instituto Balseiro, en 1970. Su desarrollo fue compartido con el Dr. Bolling de *Ford Research Lab*.

2) Materiales compuestos eutécticos. Corresponde a la tesis del Dr. H. R. Bertorello, de Argentina, rendida en el ámbito de la Universidad de Córdoba, en 1971, y se refiere al crecimiento unidireccional del eutéctico Al-Al₂Cu y relaciona su estructura de solidificación con sus propiedades mecánicas. Da lugar a dos contribuciones de importancia: a) Bertorello H. R., Biloni H. (1969) *On the origin of the cell substructure in eutectic Al-Cu*. Trans. TMS-AIME, 245, 1373, que revela los mecanismos de formación de colonias de eutécticos y b) Bertorello H.R. Biloni H. (1972). *Structure and heat treatments influence on the tensile properties of Al-Al₂Cu eutectic composites*. Met Trans 3, 1501.

3) Microsegregación en aleaciones crecidas bajo condiciones controlables. Dentro de las líneas de determinación de la microsegregación en aleaciones crecidas bajo condiciones controladas, la tesis del Dr. M. A. Audero, rendida en el ámbito del Instituto Balseiro, en Bariloche, en 1972, constituye un trabajo completo que da una descripción integral de la microsegregación en aleaciones base Zn crecidas bajo diferentes condiciones de solidificación controlable. Da lugar a dos trabajos clásicos en la literatura respecto a la evolución de la interfaz sólido-líquido en función del sobreenfriamiento

constitucional para aleaciones de estructura hexagonal y por ende, al tipo de microsegregación que ocurre. Fueron publicados en *Crystal Growth*. Paralelamente se desarrolló la Tesis del Dr. F. J. Kiss, rendida en 1974 en el ámbito del Instituto Balseiro, en la que la estrategia de investigación desarrollada por H. Biloni se enfoca plenamente en la dilucidación de los mecanismos de nucleación y crecimiento de las diferentes estructuras presentes en lingotes y piezas fundidas. De esta tesis salen importantes contribuciones a la morfología desarrollada por el crecimiento cristalino en las estructuras equiaxiales de lingotes y piezas fundidas. Citadas por H. Biloni y su trabajo en la Conferencia de Brighton, 1968 (ya referida) y en los mecanismos de refinamiento de grano por adiciones de titanio en Aluminio, problema tecnológico muy importante.

4) Scale-up de estructuras de lingotes desde escala de laboratorio a las plantas piloto e industriales. En colaboración con la *Ford Research Laboratory* en Detroit, USA, y dentro de subsidios de Norteamérica, un ambicioso plan de desarrollo correlacionando estructuras y subestructuras resultantes en lingotes de tamaños que fueron desde la escala de laboratorio a las de planta piloto con extrapolaciones a escala industrial. El uso de campos magnéticos programados así como efectos "Coriolis" por rotación de los moldes permitió dilucidar a través de la estrategia de investigación ya mencionada la detección de la subestructura de segregación, los mecanismos principales de generación de las estructuras de los lingotes en escala de planta piloto y extrapolarlas a escala industrial. Ello dio lugar al importante trabajo, ampliamente citado en la literatura tecnológica de fundición: Morando R., Biloni H., Cole G. S., Bolling G. F. (1970) *The develop-*

ment of macrostructure in ingots of increasing size. Met Trans 1, 1407.

5) Transferencia calórica en el Sistema Metal-Molde. El trabajo de Biloni y Morando: "*On the origin of the chill zone in ingots*", ya aludido con anterioridad, abrió una línea muy activa de investigación y desarrollo conectada con la transferencia calórica en el sistema metal-molde que tuvo una trascendencia tecnológica muy importante pues define la estructura y, por ende, las propiedades mecánicas y aún las físicas y químicas de los lingotes y piezas de fundición.

La Tesis del Dr. M. Prates de Campos Filho, del Brasil, realizada en la CNEA y en el ámbito de la Universidad Nacional del Sur de Argentina, en el período 1969-1972, abre este importante campo a través de la determinación del coeficiente de transferencia calórica metal-molde (hi) por método de fluidez lineal y su influencia sobre los procesos de solidificación, las estructuras resultantes y, por ende, las propiedades tecnológicas asociadas a las mismas. De esta importante Tesis y su posterior influencia surgen una serie de trabajos de trascendencia publicados en Met. Trans.

Se abre así un amplio campo de investigación y desarrollo tecnológico en el área de transferencia calórica que continua activamente tanto en Argentina cuanto en Brasil, en la Universidad de Campinas, en el cual el Dr. Prates ejerció desde su regreso de la CNEA altas posiciones en la estructura académica de la Universidad, con importantes interacciones tecnológicas con la industria brasilera.

Los trabajos sobre transferencia calórica abiertos en la CNEA por Biloni y sus colaboradores dieron lugar a importantes líneas de I y D de

directa aplicación tecnológica, las que se detallan a continuación.

6) Fundición bajo Presión: La aplicación de presión durante la solidificación aumenta el valor del coeficiente de transferencia calórica metal-molde que se traduce no solamente en el cambio de la cinética del proceso sino en la estructura de las piezas resultantes. Por otra parte, esta línea de trabajo dio lugar a la Tesis de Doctorado de Arno Müller, investigador brasileño, en el ámbito de la Universidad de Rosario, Argentina, 1975, y se basó en las estructuras resultantes en dos rangos de presión: 1-150 atm.; hasta 2000 atm. de presión. Sus resultados fueron presentados en diversos Congresos y publicados en la Revista de la Asociación Brasileña de Metalurgia (ABM). El Dr. Müller fue Jefe del Departamento de Metalurgia de la Universidad Federal de Río Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil y fundador del LAFUN de la misma Universidad, inspirado en sus actividades en Buenos Aires.

Cabe consignar que mis contribuciones y la de los coautores en estos campos permitieron dilucidar el origen y desarrollo de las estructuras y subestructuras de la zona acoquillada de los lingotes y piezas de fundición. Ello sirvió de base para la explicación de la formación del llamado "gap de aire" que se forma entre la pieza fundida y el molde a Pehlke y sus colaboradores para definir este fenómeno, hoy aceptado en la literatura internacional, hecho que ha sido consignado acabadamente por el libro clásico de Campbell, "Casting", 1990.

7) Fluidez de Metales y Aleaciones. La capacidad de flujo de un metal líquido y su capacidad de llenado de moldes es un antiguo problema tecnológico cuyas soluciones son meramente empíricas a través de los

llamados "test de fluidez" que miden la distancia recorrida en un canal estrecho. La comprensión científica de esta propiedad fue iniciada, en la década del 50, por Flemings y sus colaboradores, en el MIT. Sin embargo, sobre la base de los trabajos en el área de Transferencia Calórica, ya referidos, la mía y la de mis colaboradores son las mayores contribuciones que se han hecho en el ámbito internacional relacionando: i) variables operativas de colada (presión metalostática y sobrecalentamiento); ii) largo de fluidez (L) en función de la existencia o no de pinturas de recubrimiento en moldes y canales de alimentación; iii) microgeometría de superficies de moldes y canales de alimentación; iv) tipos de aleaciones utilizadas (binarias y/o ternarias, así como eutécticas). Ello ha dado lugar a una serie muy importante de trabajos que relacionan estas variables con la fluidez y las estructuras resultantes, las que pueden ser extrapolables a la estructura de piezas fundidas a través de todo el conocimiento acumulado por mi escuela. Esta filosofía se ha traducido en la tesis del Dr. Álvaro Morales, de Colombia, en el ámbito de la Universidad Nacional del Sur, Argentina, 1980, y a trabajos de R. A. Aguilar Rivas de Guatemala. Ambos regresaron a sus respectivos países para dirigir trabajos de investigación en el área de Procesos tecnológicos relacionados con la Solidificación. especialmente, el Dr. Álvaro Morales quien, en la Universidad del Valle, dirigió en el área de Soldadura en estrecha colaboración con el *International Development Research Centre* (IDRC) de Canadá, con contrapartida con el Prof. Hugh Kerr de *Waterloo University*, quien pasara parte de un sábado en la División Solidificación y Fundición de CNEA, que yo dirigía.

8) Con mis colaboradores, O. Garbellini y H. Palacio del IFIMAT

presentamos el trabajo "*Fluidity property versus microstructures in binary and ternary alloys of the Al rich corner of the Al-Cu-Si system*" en la *Solidification Processing Conference*, Sheffield, Setiembre de 1987 (3ra. Conferencia Mundial de Solidificación). Este trabajo es el primero en el nivel internacional que encara en aleaciones ternarias fluidez vs. Estructuras de solidificación. Estos trabajos se iniciaron en el Grupo de Solidificación del IFIMAT en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCP-BA), que a su vez yo había fundado, una activa línea de I y D tanto en lo referente al concepto de fluidez cuanto a su aplicación en materiales compuestos de base metálica por infiltración de metal líquido en masas de materiales refractarios sucediéndose trabajos utilizando por primera vez, en el nivel internacional, resultados de fluidez en ternarios y su correlación con los procesos de infiltración para obtener materiales compuestos.

9) Segregación por gravedad en lingotes de Al-U para elementos combustibles de reactores nucleares. Las aleaciones Al-U son utilizadas extensamente en reactores de investigación y aún de poder nuclear. La diferencia en densidad de ambos elementos produce segregación por gravedad que se traducen, en las laminaciones posteriores, en serios inconvenientes para la producción. Los conocimientos en transferencia calórica desarrollados con mis asociados en la División Solidificación y Fundición de la CNEA permitieron resolver estos problemas de real importancia tecnológica. La tecnología desarrollada sigue usándose en los reactores de investigación construidos en Argentina y transferidos al Perú, primero y luego a otros países.

10) Colada Continua y Semicontinua de aleaciones de aluminio. A

partir de 1978, dirigí el Proyecto Especial de Tecnologías Metalúrgicas de la OEA, focalizado en Argentina en Tecnología de Aluminio y Cobre. En este contexto, llevé a cabo una estrecha colaboración con la Gerencia de I y D de ALUAR SAICI, productor de aluminio primario en Argentina, con sede en Puerto Madryn, Chubut. Dicha firma contrató a la Ingeniera Teresa Pérez, quien se incorporó a mi grupo de I y D para el estudio de defectos en fundición semicontinua de tochos de aleación 6063.

Se obtuvieron resultados importantes, se realizaron trabajos en la planta y se comenzó el diseño de una mesa de trabajo en planta piloto que fuera luego concretada. Los trabajos resultantes se publicaron en los *Proceedings* de la Conferencia: "El Aluminio en Latinoamérica", México, 8-11 de Marzo de 1983.

11) Corrosión de Estructuras de Colada en Aleaciones de Al. Las estructuras predendríticas y dendríticas obtenibles en la superficie de lingotes y piezas de aluminio fueron investigadas en colaboración con el grupo de corrosión de la CNEA. Esta línea de trabajo dio lugar a importantes desarrollos tecnológicos en el área de "Ánodos de Sacrificio" de aleaciones de Aluminio obtenidas por fundición que permitieron suplantar ánodos importados. El desarrollo de aleaciones especiales base aluminio se concretó en una patente y aplicaciones concretas en barcos de la Armada Argentina y tubería de Gas del Estado. Esta línea abierta por H. Biloni y E. De Micheli continuó en desarrollo en la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, con relevantes aplicaciones tecnológicas. Asimismo los trabajos en aluminio de alta pureza determinó micro-segregaciones que se plasmaron en aplicación a procesos de colaboración con Damian, Bolling y Cole en "Pitting Corrosion"

12) Fundición de "Wire-bars" de Cobre "Tough-Pitch". Dentro de los Proyectos Multinacionales de Metalurgia y Especial de Tecnologías Metalúrgicas de la OEA, en estrecha colaboración con la Universidad Católica de Valparaíso, Chile y ENAMI, industria de este país, se realizaron estudios científico-tecnológicos sobre las estructuras de fundición de *wire bars* de cobre "tough-pitch". La firma chilena proveyó el material (media tonelada) y el trabajo fue la base de la tesis doctoral del Dr. Bernardo Müllers Fredeborn, de Chile, en el ámbito de la Universidad Nacional del Sur, Argentina. Los resultados tecnológicos obtenidos fueron oportunamente transferidos al sector industrial en Chile. Parte del trabajo mereció ser invitado al Primer Número de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 1981.

13) Soldadura de Materiales Ferrosos y No Ferrosos. A principios de la década del 70, decidí aplicar los conocimientos de solidificación propios y de mis asociados al proceso de soldadura que se estaba produciendo en Estados Unidos con Savage y colaboradores en el *Rensselaer Polytechnic Institute* en Troy, N.Y., eligiendo como primera etapa el Proceso de Soldadura por Electroescoria de moderna tecnología; posteriormente, fueron incorporando otros procesos tanto en la CNEA cuanto en el LEMIT y en la Universidad de Mar del Plata. Se realizaron importantes contribuciones sobre el tema.

En el marco de esta activa línea de I y D se escribe la Tesis de Doctor del Ing. M. Solari realizada en el marco de la Universidad Nacional del Sur y rendida en 1986. Es de destacar que a los efectos de adecuar los procesos de solidificación existentes en el proceso de soldadura se desarrolló un modelo de microsegregación que perfecciona el anterior existente debido a Flemings

y coautores (M. Solari and H. Biloni. *Microsegregation in cellular and cellular dendritic growth*. Journal of Crystal Growth, 49, 451, 1980).

Las previsiones del modelo, que se puede aplicar a velocidades existentes en soldadura y aún superiores, fueron comprobadas experimentalmente por la Tesis del Dr. H. Palacio de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y rendida en el marco de la Universidad Nacional de La Plata en 1987. Dio lugar al único trabajo cuantitativo de microsegregación existente en la literatura internacional hasta ese momento (Palacio H.A., Solari M., Biloni H.. (1985) *Microsegregation in cellular dendritic growth in binary Al-Cu alloys*. Journal of Crystal Growth 73, 139)..

El trabajo clásico de Solari y Biloni (1980) introduce una novedad importante en el modelo de Flemings sobre la microsegregación. Por primera vez en la literatura se considera el efecto de la curvatura de la punta de la dendrita que crece a expensas del líquido y afecta sensiblemente, sobre todo a velocidades intermedias y altas de solidificación, el mapa de la microsegregación resultante y, por ende, las propiedades mecánicas y físicas. Este modelo ha servido de base para nuevos refinamientos teóricos en un tema de elevada importancia teórica y práctica.

Esta línea que bajo la inspiración de H. Biloni coordinó las acciones que se realizaban en la CNEA, LEMIT-CIC, Instituto de Tecnología de Materiales de Mar del Plata (INTEMA), CONARCO S.A., productora nacional de aportes de soldadura con interacciones con Institutos de Chile y Brasil, es un claro ejemplo de cómo la investigación y desarrollo en todo el espectro, desde el básico hasta el tecnológico se integra para la obtención de realizaciones de alta tecnología. Forma parte de la

frase por mi acuñada: "Un país puede tener investigación básica sin tecnología moderna pero es imposible poseer tecnología moderna sin investigación básica". Ello lo extendí a otras áreas de I y D desarrolladas con base en el LEMIT-CIC pero con estrechas relaciones con el INTEMA, la CNEA y el IFIMAT, en Tandil.

14) Superaleaciones base Ni y Cobalto. La investigación básica Ni y Co aplicada y desarrollos tecnológicos de superaleaciones base Ni y Co ha sido desarrollada según dos vertientes: a) la relacionada con aplicaciones dentales, fundamentalmente, en la CNEA con la Dra. en Odontología M. Barreiro, cuya tesis doctoral yo dirigí y que dio lugar, entre otros, a un trabajo fundamental que figura en los Proceedings de las Jornadas Metalúrgicas realizadas en La Plata en el año 1988; b) Tal como se ampliará más adelante, con mis colaboradores del Grupo de Solidificación del IFIMAT hicimos un desarrollo tecnológico de significación en Latinoamérica en lo referentes a la producción de álabes estatóricos de Superaleaciones P.E.10 para turbinas de gas. Como resultado del mismo, el trabajo presentado a las Jornadas Metalúrgicas de la SAM, La Plata 1988, y publicado en sus Proceedings: Palacio H. A., Garbellini O., Ges A., Scarpa R., Biloni H. "*Solidificación equiaxiada de Superaleaciones P.E.10 y desarrollo tecnológico de álabes estatóricos de turbinas de gas*" recibió el *Premio de la Unión Industrial al Mejor Trabajo de Desarrollo tecnológico*.

Cabe consignar que esta línea de I y D y especialmente con aplicación en la producción de álabes de turbinas estatóricos fue fundamental en la transferencia de Tecnología a FUNDALUM S.A., firma de Tandil encargada exitosamente de producir álabes estatóricos pertenecientes a YPF. Se solucionaron de esta mane-

ra los problemas de importación de partes fundamentales de equipos de bombas procedentes de Gran Bretaña hasta el conflicto del Atlántico Sur y vedados por Inglaterra para su venta a nuestro país. Se hace notar que los producidos por Fundalum tuvieron una performance superior a las importadas.

■ 2.2 FUNDICIONES DE HIERRO.

En las últimas décadas, con mis asociados en el LEMIT, con estrechas relaciones con el INTEMA de la UNMdP, se realizaron importantes trabajos en la relación estructuras-propiedades de aleaciones Fe-C-Si, conocido como "Fundiciones de Hierro", tanto desde el punto de vista fundamental cuanto de desarrollos tecnológicos.

a) Trabajos de carácter fundamental:

Los trabajos estuvieron centralizados en la relación existente entre la morfología del grafito y las propiedades de las fundiciones tanto desde el punto de vista "as cast" cuanto de tratamientos térmicos. En el seno de esta estrategia, es fundamental la tesis de Alicia Roviglione, bajo mi dirección, centralizada en la solidificación unidireccional de aleaciones Fe-C-Si y la modificación "in-situ" frente a la interfaz S-L de las estructuras de aleaciones Fe-Grafito. Dicha tesis dio lugar a trabajos originales que replantean los modelos del origen y desarrollo de las aleaciones Fe-G, fundamentalmente en lo referente a la morfología de los eutécticos [Roviglione A., Biloni H. (1994) *Int.Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron Proceedings* publicados por *Key Eng. Materials*]

En el caso del estudio de la solidificación convencional de lingotes, mi estrecha relación con el INTEMA

ha plasmado resultados de nivel internacional. La utilización de capas epitaxiales y la metalografía en colores, permitió determinar en forma indubitable la verdadera naturaleza de la nucleación y el crecimiento de las células eutécticas que modificó los modelos en boga, fundamentalmente en el caso de la fundición nodular.

En esta área el trabajo de Sikora J. A., Rivera G. L., Biloni H. *Metallographic Study of the Eutectic Solidification of Curay castrom* 1990, proceedings of the "F. Wemberg International Symposium on solidification" 280-288, es considerado un trabajo de investigación "clásico" en esta área.

En el caso de los tratamientos térmicos, comencé con el Ing. R. Gregorutti estudios sistemáticos en AVI (Tratamiento isotérmico de fundiciones vermiculares) lo que se plasmó en la tesis doctoral del Ing. R. Gregorutti, en la Universidad Nacional de La Plata, bajo la dirección del Ing. Sikora del INTEMA.

b) Trabajos de Desarrollo Tecnológico.

En el área de la fundición de hierro con mis colaboradores del LEMIT los trabajos se centraron fundamentalmente en la fundición vermicular, cuyas propiedades físicas y mecánicas dependen de la morfología del grafito, intermedia entre la gris o laminar y la nodular o esferoidal. Ello se produjo en el marco del LEMIT con el apoyo institucional de la CIC pero también con aportes significativos de subsidios del CONICET, la OEA y el IDRC del Canadá. Los desarrollos tecnológicos fueron pioneros en el área de la fundición vermicular.

Con mis colaboradores del LEMIT, sobre la base de los conoci-

mientos fundamentales de solidificación se publicaron la puesta a punto de todas las técnicas industriales de producción de fundición vermicular incluyendo los modernos métodos de dosificación del porcentaje de S existente en el líquido para la obtención de vermes. Ello fue convenientemente respaldado por los trabajos de carácter fundamental explicitados en el ítem a) del presente apartado.

Desde el punto de vista tecnológico, las aplicaciones estuvieron centradas en: i) discos de freno de automóviles de competición; ii) campanas de freno de ómnibus y camiones; iii) matrices para vidriera. En todos los casos, se hizo hincapié en las excelentes respuestas de la fundición vermicular al ciclado térmico, su alta resistencia al desgaste, así como una resistencia mecánica cercana a la de las fundiciones nodulares.

Un gran número de trabajos y presentaciones a Congresos Nacionales e Internacionales fueron el resultado de esta línea de I y D, entre los cuales puede citarse: 1) Biloni, H.. *"Tecnología de la fundición vermicular, su aplicación en la industria automovilística y otras industrias"*. Mención Especial Premio *"Juan Manuel Fangio"* a la innovación tecnológica en la Industria Automovilística y Autopartista. Premio instituido por el Banco de la Provincia de Buenos Aires, 1991. 2) Gregorutti R., Gotelli R., Sarutti J. L., Biloni H. *"Tecnología de la fundición vermicular, su utilización en la producción de matrices de vidriera"*. Premio *"Jorge A. Sabato"* al Mejor Trabajo de Desarrollo Tecnológico. Proceedings de las Jornadas Metalúrgicas de la SAM, Rosario, Argentina 1992.

Asimismo, la tecnología fue transferida a la industria para su aplicación industrial, especialmente

en el caso de las campanas de frenos y matrices de vidriera. Además, y en el marco de la Red Latinoamericana de Metalurgia, patrocinada por el IDRC, Canadá, en la que me desempeñé como Coordinador Latinoamericano, el *"know-how"* fue transferido a Chile, a través de la Universidad de Santiago.

FUNDICIÓN DE PRECISIÓN:

Una de las áreas prioritarias por mi establecidas desde mi llegada a la Dirección del LEMIT, en el año 1980 fue la fundición de precisión, moderna tecnología que tiene como objetivo minimizar las operaciones de maquinado posterior de las piezas y llegar a las mismas, en su producción, a una perfección de acabado superficial similar al del maquinado. Dos tecnologías fueron encaradas por mi y mis colaboradores del LEMIT: a) Método de *"Investment Casting"* o *"cera perdida"*, b) Método Shaw y su variante *"Unicast"*.

a) Investment Casting.

Bajo mi dirección se llevó a cabo la transferencia tecnológica de este método a la Empresa FUNDALUM S.A. de Tandil a comienzos de la década de 80, seguido luego de una serie de contribuciones en el nivel nacional y regional en *Proceedings* de Conferencias y Reuniones de materiales. Con mis colaboradores instalamos una planta piloto en el LEMIT desarrollando, conjuntamente con la industria Nacional y el apoyo de los Proyectos OEA-LEMIT y el IDRC (Canadá), la construcción e instalación de autoclaves de desceado, prescindiendo de costosas importaciones de equipamiento en ese rubro. Cabe consignar que la experiencia adquirida fue decisiva en los desarrollos de superaleaciones base Ni y la construcción de álabes de turbinas por FUNDALUM S.A., tal

cual se lo explicitó anteriormente. La experiencia adquirida fue decisiva en la interpretación de las subestructuras de microsegregación resultantes de esta tecnología. Esto tuvo un correlato relevante en el área del análisis de piezas arqueológicas. Con mis colaboradores de la CNEA se pudo determinar utilizando métodos de metalografía no destructiva el origen de la fabricación de la placa de LAFOND QUEVEDO, emblema del Museo de Historia Natural de La Plata, cedido a sus efectos por el arqueólogo Dr. Rex Gonzáles. Se pudo determinar que el método usado fue el de cera perdida, hecho de trascendencia en la arqueología mundial. Posteriormente, y en coincidencia con el 110° Aniversario de la Fundación del Museo de La Plata, la CIC hizo una publicación especial.

b) Método Shaw y su variante UNICAST.

Con mis colaboradores del LEMIT realizamos una extensa actividad en estas tecnologías capaces de obtener piezas de alta precisión. Una serie de trabajos muy importantes fueron presentados a Congresos Nacionales y Regionales, los que fueron publicados en sus *Proceedings*. Entre los más relevantes, figuran: 1) Rodríguez J., Gotelli R., Allende S., Biloni H.. (1988) *"Fabricación de matrices de aluminio y fundición nodular para la producción de neumáticos utilizando el método Shaw de fundición"*. *Proceedings* del I Congreso de ALAMET, Río de Janeiro, Brasil. Este fue un desarrollo pionero en Latinoamérica. La transferencia tecnológica se hizo a la firma TAHERSA S.A. de Tandil, quien entregó una maqueta recordatoria de una de las matrices a la Dirección de LEMIT. Esta transferencia tecnológica (con los auspicios de la Gerencia de Desarrollo Jorge. A. Sabato del Banco Provincia) permitió que TAHERSA

pasara a partir de ese año a exportar matrices para neumáticos con un método competitivo superior al de maquinado. 2) Gotelli R., Barra F., Allende S. Biloni H. (1990) "Desarrollo de matrices en fundición de precisión por el método Shaw". *Proceedings* de las Jornadas Metalúrgicas de la SAM, Buenos Aires.

Cabe consignar que en el marco de la Red Latinoamericana de Fundición auspiciada por el IDRC del Canadá, se hizo una publicación especial para toda Latinoamérica detallando el "know-how" de utilización de estos métodos con la aplicación de materiales de uso regional.

En la actualidad, los métodos de fundición desarrollados en el LEMIT también son utilizados para la producción de obras de arte metálicas en aleaciones de cobre, aluminio y acero inoxidable a pedido de los escultores. Esta línea de trabajo continúa con singular éxito en el LEMIT y una estrecha colaboración con instituciones culturales privadas y gubernamentales de la Provincia de Buenos Aires.

En la década 2000-2010, mis actividades se centraron fundamentalmente en el IFIMAT de Tandil, consolidando, como Asesor Científico, el Grupo de Solidificación que creara a fines de la década de 1970.

Las principales áreas desarrolladas fueron, entre otras:

1) Fluidez en Aleaciones Ternarias. Cabe informar que no se conocen en la literatura internacional contribuciones en esta línea de singular importancia teórico-práctica.

2) Materiales compuestos por método de infiltración en matrices cerámicas de aleaciones ternarias (donde la fluidez es una propiedad determinante). Esta línea determinó la

concreción de la Tesis de la Doctora C. Morando, "Microsegregación en aleaciones diluidas de aleaciones con diferentes cristalografías". Ello determinó la obtención de la Tesis del Dr. Fornaro, cuyas publicaciones internacionales, determinaron experimentalmente la validez de la teoría de la inestabilidad morfológica desarrollada por la Escuela teórica dirigida en la actualidad por el Prof. Sekerka de la Universidad de Pittsburgh, USA, en la cual el sobreenfriamiento constitucional es un modelo simplificado.

En el marco de numerosas publicaciones se destacan las publicaciones internacionales 1) O. Garbellini, G. Morando, H. Biloni and H. Palacios: "Infiltration of saffil-alumina fiber with Al-Cu". 2) O. Fornaro, H. Palacio and H. Biloni "Characteristic Substructures in directionally dilute Al-Cu alloys solidification processes and minostructures 2004. THS. 219-224. 3) O. Gerbellini, C. Morando, H. Palacio and H. Biloni "Comparison of infiltration length and maximum fluidity length of an unforced mahix alloys" 2004. *Ing. Journal of Cast Metals Research* 17, 12, 16.

■ 3- COLOFÓN

José Ingeniero afirmó "La Revolución de Mayo tiene nombre y apellido: Mariano Moreno". Creo que en el caso de la "Ciencia de materiales" en nuestra región Jorge Sabato cumplió con similar protagonismo. Desde un paupérrimo nivel universitario en esa materia y en el seno de una institución señera, la CNEA, a los 30 años de edad reunió un grupo de jóvenes profesionales de la Ingeniería, la Química y la Ingeniería Química a los que se sumaron físicos que vislumbraron que la ciencia de los materiales, Metalurgia física en esos días debía ser interdisciplinaria. El conjunto comprendió que "El mejor instituto" a escala mundial no existe

pero que el esfuerzo intenso y desinteresado puede crear instituciones de nivel internacional que compitan con las de los países centrales no solo en un país y una región, en este caso, latinoamericana, aunque sean llamados "emergentes" en el mayor de los casos, en disciplinas críticas que coadyuvan al progreso socio-económico. ¿La metodología? Una interacción continua basada en el método científico aplicado en las llamadas Investigaciones Básicas "aplicadas" o "tecnológicas". El juicio de Sabato fue lapidario existe una sola diferencia en I y D, la "buena" y la "mala" en el análisis de la naturaleza cualquiera sea el proceso que se analice. Yo tuve la fortuna de estar allí desde el comienzo y una serie de circunstancias felices posibilitaron mi inserción en una rama casi tan vieja como la Humanidad. Los procesos de solidificación de metales y aleaciones que en la década del 50 del siglo pasado abandonó el empirismo para ser estudiados sistemáticamente desde el laboratorio con sus variantes experimentales relacionándolos con una formalización matemática en cada caso de manera de poder comprender procesos cada vez más sofisticados y aplicaciones concretas industriales emergentes de ese avance "básico" y tecnológico. En nuestros días el modelado matemático trata de sintetizarlos muchas veces exitosamente aplicando lo que B. Chalmers denominó "empirismo iluminado" que no ha eliminado la investigación experimental rigurosa que es la que da los datos ciertos para cada modelo matemático. A lo largo de mis quehaceres de casi seis décadas he compartido mis tareas con un numeroso grupo de colegas del más alto nivel, colaboradores científicos y técnicos de apoyo, junto a secretarías de infinita paciencia con mi caligrafía y mis obsesiones escorpianas. No he de establecer ningún tipo de escalafón entre ellos así

como entre mis alumnos doctorantes pues en la mayoría de los casos tuvimos coincidencias esenciales y porque creo que no hay peor pecado en nuestra disciplina que la omisión de algún nombre aunque fuera en el rubro "agradecimientos". Un número sustancial de ellos siguieron activos tanto en el ambiente académico como en el Institucional o como consultores. Ello ocurrió en el país y la Región Latinoamericana y considero que brindan un adecuado soporte científico-tecnológico a sus respectivas sociedades. Asimismo valoro significativamente los proyectos de OEA-IDRC y sus núcleos nacionales y de agencias internacionales que lograron alimentar mis sueños de un "mercado común" de ciencia y tecnología en Latinoamérica.

Quiero terminar este resumen con un homenaje a los ojos zarcos de Iris que iluminaron este largo camino y a su sapienza de Doctora en Leyes de la UNLP que encuadró convenientemente mis conflictos con burócratas que en varias ocasiones quisieron domesticar mi coherencia ética. Sin embargo logramos mantener hasta la pitada final, la valla intacta: un sueño de todos los arqueros.

Heraldo Biloni.

Don Bosco, Primavera de 2012.

(*)

José Rodolfo Galvele, "Jorge Sabato creador de la metalurgia en CNEA o ¿Cómo se hace para crear un laboratorio de excelencia?" - 1a. Ed.- San Martín: Inst. de Tecnología Profesor Jorge A. Sabato, 2009.

ISBN 978-987-96501-6-5

■ CURRÍCULUM VITAE RESUMIDO

Apellido y Nombre: BILONI, Heraldo

Fecha de Nacimiento: 04 de Noviembre de 1927

D.N.I.: 5.115.681

Estado Civil: Casado con Iris Beatriz Cederlöf

Lugar de Nacimiento: Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Domicilio: Chiclana 929, Don Bosco, 1876

T.E.: 4252-7902

1- Formación y actividades en centros de I y D internacionales

1.- Ingeniero Aeronáutico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 14 de Mayo de 1952.

2.- Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 11 de Septiembre de 1991.

El Acta de Tesis aprobada con SOBRESALIENTE, lleva el N°1 de los Doctorados conferidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

3.- Beca de Posgrado de la CNEA en el *Max Plank Institut fur Metallforschung*, Stuttgart, Alemania 1955-1956.

4.- *Faculty Member* de la Universidad de Harvard: *Research Fellow* del Profesor Bruce Chalmers en el Gordon Mc Kay Lab., División

Engineering and Applied Physics, Julio de 1963 a Diciembre de 1965.

5.- Investigador Asociado contratado por el *Centre des Etudes Nucleaires*, Grenoble, Francia. Asesor para la creación de un Laboratorio de I y D en Solidificación de Metales y Aleaciones, Mayo a Agosto de 1968.

2- Actividad profesional como investigador

1.- Marzo de 1955: Ingreso a la CNEA como Miembro del Grupo Fundador del Departamento de Materiales, bajo la dirección del Prof. J. A. Sabato.

2.- 1955-1981: Creación del Área Metalografía y Dirección del Área de Procesos de Solidificación con proyección en América Latina.

3.- 1969-1998: Director de Proyectos de I y D en Procesos de Solidificación en el país y América Latina, así como Director de Programas Multinacionales de Materiales en el marco OEA-CNEA y, posteriormente, OEA-LEMIT y IDRC-LEMIT

4.- Febrero de 1978: Nombrado Investigador Superior Invitado – Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. 06 de Junio de 1980 al 11 de Junio de 1999: Director del LEMIT-CIC.

5.- 1984-1992: Director de Proyectos de I y D en Procesos de Solidificación IDRC, Canadá – LEMIT y Coordinador Latinoamericano de la Red de I y D en Fundación IDRC-LEMIT-QUEENS UNIVERSITY, compuesta por 10 países latinoamericanos involu-

crados con Universidades y pequeñas y medianas industrias de la Fundación.

6.- 1994: Nombrado Investigador Superior Emérito CIC.

7.- 1978 a la fecha: Creador y actual Asesor Científico del Grupo de Solidificación del IFIMAT, U.N.C.P.B.A., Tandil.

8.- 1977-2000: Único miembro extra europeo invitado a las Reuniones Anuales del Grupo de Solidificación de los Centros más relevantes de I y D de Europa (Francia, Gran Bretaña, Suecia, Suiza, Dinamarca, Alemania, Noruega y Finlandia).

3- Principales premios y distinciones

1.- Premio "Pedro A. Pistocchi" al mejor trabajo de Investigación, IV Jornadas S.A.M., Córdoba, 1970.

2.- Propuesto por la CNEA para el Premio "Bernardo Housay" de la OEA, 1975.

3.- Nombrado Profesor Extraordinario por la Universidad Católica de Valparaíso, Chile, 1979.

4.- Premio "Programa Multinacional de la OEA", 1984.

5.- Propuesto por la CIC, la U.N.C.P.B.A. y la Universidad Católica de Valparaíso, Chile, al Premio "Bernardo Houssay".

6.- Premio al "Mejor Trabajo de Desarrollo Tecnológico" otorgado por la Unión Industrial Argentina, a su equipo de I y D del IFIMAT, 1988.

7.- Premio "Jorge A. Sabato", instituido por el INTI al "Mejor Tra-

bajo de Desarrollo Tecnológico", Jornadas SAM, Buenos Aires, 1990.

8.- Mención Especial Premio "Juan Manuel Fangio" a la Innovación Tecnológica en la Industria Automovilística, Banco Provincia de Buenos Aires, 1991.

9.- Premio "Jorge A. Sabato" al "Mejor Trabajo de Desarrollo Tecnológico", Universidad de Rosario, Jornadas SAM, 1992.

10.- Diploma de Reconocimiento de los Coordinadores de los Proyectos de Materiales de la OEA por sus contribuciones en el período 1963-1994, XX Reunión de Coordinación, Atacama, Chile, 1994.

11.- Premio "Jorge Kittl" al Mejor Trabajo de Investigación Científica, Jornadas SAM e IBEROMET, Rosario, 1998.

12.- Diploma de Reconocimiento a su trayectoria científica-tecnológica, Jornadas SAM, Congreso CONAMET – SIMPOSIO MATERIA 2003, Instituto Balseiro, Bariloche 2003.

4- Principales actividades específicas en I y D.

1.- Principal Área de Interés: I y D en Procesos de Solidificación. Interacción con decenas de Profesionales, Técnicos, Estudiantes y Personal de Apoyo del país y Latinoamérica.

2.- Dirección de Tesis Doctorales: 16 Tesis bajo su dirección, aprobadas en el período 1970-2008. Marco Académico: Universidades Argentinas. Doctorandos de Argentina, Brasil, Chile y Colombia.

3.- Conferencias Invitadas: Más de 50 en el país, Latinoamérica, Estados Unidos y Europa.

4.- Cursos y Seminarios en la Especialidad: Más de 70 en el país, Latinoamérica, Estados Unidos y Europa.

5.- Trabajos en Congresos y Seminarios Nacionales e Internacionales: Más de 300.

6.- Publicaciones con referato estricto: Más de 100 en revistas internacionales y *Proceedings* de Congresos Internacionales.

7.- Contribuciones temáticas de gran relevancia internacional: invitado a publicar en la obra de consulta internacional más reconocida: *Physical Metallurgy*, Editores: Robert Cahn y Meter Haasen, el Capítulo *SOLIDIFICATION* (North Holland):

I.- 3rd. Edition, 1983, 2 tomos, 1957 páginas, 30 capítulos. H. Biloni: 9th Chapter: "Solidification", Tomo I, pp. 478-579.

II.- 4th. Edition, 1996, 3 Tomos, 2900 páginas, 32 capítulos. H. Biloni y W.J. Boettinger (NIST-USA): 8th Chapter: "Solidification", Tomo I, pp. 670-842.

En ambas ediciones, único autor de Capítulo perteneciente a un país emergente. Subsidios recibidos: Proyecto OEA-IDRC (Canadá), CIC, CONICET, Agencias de USA.

III.- Coeditor de los siguientes libros de ASM (USA):

a) *Aluminum Transformation Technology and Applications*. 1980, 624 páginas.

b) *Aluminum Transformation Technology and Applications*.

1981 – 1982, 667 páginas.

8.- Proyectos Internacionales en el Área Latinoamericana en el período 1963 / 1994

1.- Proyecto Multinacional de Metalurgia OEA-CNEA-LEMIT (1969-1980), Centro Sedes.

i) Jefe de área prioritaria: solidificación y fundición.

ii) A partir de 1972, Director del Proyecto en Argentina.

2.- Proyecto Especial Tecnológicas Metalúrgicas (PETH). Director del Proyecto en Argentina OEA – LEMIT – Centro Sedes.

3.- Proyecto Especial "I y D" en Procesos Metalúrgicos OEA-LEMIT (Centro Sede en Argentina), director en ambos proyectos especiales. La OEA requirió una interacción entre Centro Sedes y Asociados en I y D y la Industria.

4.- Proyectos Especiales IDRC – LEMIT y Centros Asociados: activa interacción con Industrias impuesto por el IDRC (Canadá).

De los 5 proyectos realizados (1984/94) dirección de 3 de ellos y coordinación latinoamericana como de la Red L.A de I y D Latinoamericana. Todas estas actividades están fundamentadas en voluminosos informes finales sobre la acción en la Región. Se proyecta en la actualidad con el Instituto J. A. Sabato una obra completa de lo actuado a lo que se sumará material complementario de las acciones OEA – CNEA en el período 1980/1994 bajo la dirección del Dr. E. Savino.