

COMO EL SOL Y LOS PLANETAS, PERO MUY CHIQUITITO¹

Los metales, esos objetos que nos parecen tan familiares y tan simples, esconden mil secretos y mil oportunidades de uso en tecnologías sofisticadas. Claro, hay que desentrañar esos secretos y eso es lo que hace la autora en este escrito. Y, de paso, nos habla del prestigioso Instituto Sabato.

■ Ana María Monti

Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional de San Martín

montianamaria@gmail.com

¹ Editor asignado: Miguel A. Blesa

■ LOS INICIOS

Como el sol y los planetas, pero muy chiquitito. Esta fue la imagen que me cautivó en mis 7 años cuando tropecé con una simple descripción del átomo en una enciclopedia para niños. Y aunque mi curiosidad en diferentes ramas del saber se fue saciando parcialmente durante la primaria, la secundaria y las abundantes lecturas, a la hora de elegir estudios universitarios primó esa semilla plantada quizás por casualidad en mi niñez chaqueña.

Viviendo en la ciudad de Buenos Aires, no dudé en inscribirme en la Licenciatura en Física ofrecida por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Eso ocurrió hace tanto tiempo...

A los años en la UBA siguieron 46 años trabajados y disfrutados en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) hasta mi retiro a fines de 2019, junto a los 28 años de actividad en la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), hasta fines de 2022. Desde entonces me

recreo leyendo, relacionando saberes, prestando las colaboraciones que me son posibles, y desde luego, respondiendo a las agudas inquietudes de mis pequeños nietos.

En ese largo camino, y siendo estudiante avanzada de la UBA, me enfrenté con la proximidad de mi tesina de licenciatura. Buscando posibilidades visité el Centro Atómico Constituyentes (CAC). Un tema propuesto por David Banchik, investigador recientemente doctorado del Departamento Materiales creado por Jorge Sabato, captó todo mi entusiasmo. Se trataba de estudiar el efecto de la velocidad de enfriamiento en la formación de fases metaestables de la aleación Al-Al₂Cu de composición eutéctica.¹ Ello requería el acceso a varios laboratorios y el uso de equipamiento de última generación. Necesitaba preparar probetas (pequeñas piezas de metal para hacer pruebas) y saber sobre tratamientos térmicos, pulidos, difracción de Rayos X, microscopía electrónica. Estábamos a fines de 1972. El verano siguiente lo dediqué a estudiar y con gran entusiasmo, arrancamos.

Empezamos calculando y construyendo un horno. Habiendo comprobado el perfil de temperatura, armado y calibrado las termocuplas, cortado y encapsulado las muestras (gracias al sector de vidriería del CAC), comenzamos los tratamientos térmicos. Habíamos definido temperaturas y tiempos de recocido, así como los medios en los cuales se haría el enfriamiento. La fase que podía observar era la llamada θ' . Para ello contaba con acceso a los laboratorios de Metalografía a fin de preparar la superficie de las muestras mediante un minucioso pulido mecánico seguido de un adecuado pulido electrolítico. Estas tareas, realmente artesanales en ese entonces, requerían gran paciencia. Como el resto de los usuarios del sector Metalografía, contaba con los consejos y vasta experiencia de las muy apreciadas metalógrafas expertas Ligia Recalde y Susana Bermúdez. El Ingeniero Daniel Vassallo, Jefe de Metalografía, solía visitarnos interesándose en nuestras tareas. Una vez lograda la superficie adecuada hacíamos uso de la sala de microscopios, donde el técnico Silvio Zalcmann era un guía recurren-

te ante alguna dificultad. Y una vez lograda la imagen esperada, tomaba fotografías que luego se revelaban en el cuartito oscuro con ayuda del fotógrafo a cargo.

Recuerdo con singular afecto a todas las personas que deambulaban por ese pasillo de Metalografía. Buena voluntad para conmigo, novata total que se internaba en el mundo de los materiales con la física estudiada. El hervidero de actividad que jóvenes investigadores argentinos y extranjeros desarrollaban en ese sector, el único de CNEA que conocía, resultaba sumamente estimulante. Luego supe que estaban cursando los muy afamados Cursos Panamericanos de Metalurgia creados por Jorge Sabato. Era extraño, en cierto modo, ese 1973 en el que yo veía una facultad donde mermaba la actividad y una CNEA pujante.

Corría octubre, ya había examinado muestras masivas y polvos mediante difracción de Rayos X y había obtenido valiosas micrografías con el microscopio electrónico de transmisión del Departamento Materiales, lo cual requería contar con réplicas de la superficie. Para finalizar el trabajo experimental restaba solamente tomar unas pocas micrografías con el microscopio electrónico de barrido de la Fundación Campomar (actualmente Fundación Leloir), cuando dicho equipo sufrió una rotura severa. Se necesitarían no menos de seis meses para que el repuesto, pedido a Japón, llegase al país. Luego de hacerse el reemplazo del componente y poner el equipo a punto, tendría que obtener un turno entre todos los trabajos igualmente atrasados.

Mi situación se complicaba. Quizás podría recibirme promediando 1974 y sabía que de marzo a diciembre de ese año se dictaría por última vez en Argentina el Cur-

so Panamericano de Metalurgia, al cual podían acceder solamente graduados en ciencias o ingeniería. Ser alumna del curso captaba todo mi interés, pero veía que mis posibilidades eran muy bajas. Pese a ello envié una solicitud para que se me permitiese hacer el curso al menos como oyente. A los pocos días me comunicaron que había sido aceptada como alumna becada por CNEA para realizar del X Curso Panamericano de Metalurgia. Gratísima sorpresa.

Entre los 18 alumnos procedentes de diferentes países del continente sólo había dos mujeres, la Ingeniera Teresa Pérez, mi querida compañera, y yo. Financiado parcialmente por OEA, el curso estaba dirigido por el Ingeniero Herald Biloni,² un grande de la Metalurgia, cuyas clases sobre Solidificación fueron magistrales.

Luego de presentarnos al Presidente de CNEA, Almirante Pedro E. Iraolagoitia, nos dedicamos a estudiar intensamente. A las clases de 9 a 17 h seguían largas horas individuales o grupales para resolver problemas, elaborar informes y preparar numerosos exámenes. Ritmo intensísimo que valió la pena. Muchos alumnos de años anteriores habían quedado en el CAC haciendo sus tesis doctorales y conformando una comunidad muy activa y entusiasta. Para los ex-alumnos extranjeros, la experiencia en CNEA implicaba regresar a sus países y ocupar cargos de relevancia.

Llegó septiembre de ese agitado 1974 cuando el microscopio electrónico de la Fundación Campomar volvió a estar operativo. En paralelo con la cursada, obtuve las micrografías que restaban y concluí la redacción de mi trabajo. Un viernes de diciembre fue la última evaluación del curso y el lunes siguiente defendí mi

tesina. A los pocos días, a tres becarios argentinos nos ofrecieron un contrato para quedarnos en CNEA. Me asignaron al Departamento Materiales, el cual ya era mi segunda casa.

El trabajo de mi tesina fue presentado en las VI Jornadas Metalúrgicas y I Jornadas Latinoamericanas de la Sociedad Argentina de Metales (SAM) (Buenos Aires 1974) que con el tiempo evolucionaría a Asociación Argentina de Materiales. También fue seleccionado para su presentación en el *XXX Congreso Annual da ABM* (Rio de Janeiro 1975), primera oportunidad de mostrar mi trabajo fuera del país. Pero se avecinaba un cambio importante. No podría continuar trabajando con David ya que en breve partiría para Canadá por un par de años, motivo por el cual demoramos una publicación completa (Monti y col. 1980).

Eduardo José Savino, joven investigador que luego de doctorarse había partido para los laboratorios del *Atomic Energy Research Establishment* de Harwell, Reino Unido, estaba regresando al CAC con la misión de crear un nuevo grupo de investigación. Éste se constituyó con los Dres. Antonio Pedraza y Dora Feinstein de Pedraza, ambos investigadores del Departamento Materiales, el Ing. Santiago Harriague que ingresó a CNEA en esa oportunidad, y yo. Así nació el Grupo Teórico, cuyo nombre más tarde evolucionó a TE-DEMECO (por TEoría de DEfectos y MEcánica del COntinuo). Nos dedicaríamos a estudiar propiedades y procesos en materiales, especialmente utilizados en instalaciones nucleares, mediante técnicas computacionales. ¿Cómo?

Abordé entonces los nuevos temas y herramientas para complementar el programa de cálculo Devil, que Eduardo había traído

de Harwell, al que le agregaríamos nuevas subrutinas y mayores prestaciones. El Devil, basado en Estática Molecular y escrito en Fortran IV, permitía simular cualquier estructura cristalina y las interacciones atómicas a través de un potencial adecuado (ver nota N° 1 al final).

En 1975 el Centro de Cómputos del CAC aún no existía, ni disponíamos de computadoras adecuadas. Sólo contábamos con una perforadora de tarjetas de cartón. Cada línea del programa requería una tarjeta y el Devil, con las subrutinas que agregamos, tenía unas 2500 líneas. Utilizando para las interacciones un potencial standard que no representaba en absoluto al material que deseábamos estudiar, sometimos el programa a las primeras pruebas. ¿Era la sintaxis correcta? ¿Estaban bien dimensionadas las muchas variables en juego? ¿Las coordenadas atómicas y las fuerzas actuantes podían seguirse adecuadamente durante la relajación de la red? ¿Y cómo comprobar todo esto si no teníamos ninguna computadora?

Todas las tarjetas, dispuestas en la secuencia correcta para su lectura, se guardaban en largas cajas de madera. En esos tiempos nosotros, único grupo del Departamento Materiales que osaba internarse en las simulaciones computacionales, y grupos del Departamento Reactores que necesitaban hacer cálculos complejos, contábamos con un servicio de traslado de nuestras cajas hasta un centro de cómputos externo. Corrían nuestros programas cuando podían, y luego nos devolvían las cajas con un detalle de errores impreso. No estaban exentos los errores motivados en la manipulación de las tarjetas. Lento y complejo mecanismo.

Mirando hacia atrás, creo que era tan grande el entusiasmo por el desafío emprendido que atempe-

raba naturalmente nuestra desazón cuando detectábamos una y otra vez errores de diferentes tipos. En el largo tiempo de espera me aboqué a estudiar la implicancia de los defectos microestructurales en las propiedades de los materiales, y a desarrollar potenciales interatómicos adecuados para representar una estructura cristalina hexagonal compacta (hcp). Los dos parámetros de red de éstas introducen dificultades adicionales para dicho objetivo, y los antecedentes disponibles se restringían a estructuras cristalinas cúbicas.

Para darle mayor impulso a nuestros trabajos, Eduardo alquiló horas de una computadora perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la UBA. Estando computadora y nosotros en la misma sala, corregíamos con mayor eficiencia. Además, aprovechábamos que Argentina jugaba al PRODE (PROnóstico DEportivo) y los resultados futbolísticos se procesaban en las tardes domingueras en la computadora del Ministerio de Bienestar Social, cerca de Plaza de Mayo. Allí se reunía el Grupo Teórico. Esperando los resultados de los partidos, con buena voluntad los operadores corrían nuestros programas.

Todo cambió vertiginosamente cuando en 1977 contamos con una IBM 370 en el CAC. Nunca más las tarjetas perforadas. Una vez leído, el programa quedaba grabado en cintas accesorias. Vía monitor y teclado, disponibles en la Sala de Usuarios, corregíamos y corríamos los programas cuantas veces necesitábamos. Esa IBM fue mágica para nosotros.

El objetivo de mi trabajo, a muy largo plazo, era estudiar los defectos microestructurales en circonio hcp (Zr- α) dada su relevancia en componentes de interés nuclear. En este material, la relación de los paráme-

tros de red se aparta de la ideal. Y esta cuestión, dado lo que sabíamos en 1975, dificultaba algo más la generación de un potencial interatómico confiable. Ya que el magnesio (Mg) cuenta con una relación muy próxima a la ideal orienté mi trabajo, en una primera fase, a este material (ver nota N° 2 al final).

Los resultados obtenidos se mostraron en la Reunión sobre "Defectos y Transformaciones de Fases en Sólidos Cristalinos", realizada en el actual auditorio Dan Beninson de CNEA, Buenos Aires, hacia fines de un difícil 1976 para el país. El trabajo "Autodefectos en materiales de estructura hexagonal compacta (I)" fue la primera muestra concreta de nuestra joven línea de investigación. Era coautor Carlos Norberto Tomé, físico rosarino que se basaba en la función de Green para estudiar a los defectos. Nuestros enfoques se complementaban.

Conforme ganábamos experiencia en el tema se afianzaba el propósito de un doctorado. Lamentablemente, en esos tiempos la postura en algunos sectores de CNEA no era favorable a este objetivo. Acordamos entonces continuar con el trabajo y esperar cambios. Y esto ocurrió, parcialmente, en 1980. Fue entonces cuando fui admitida en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Para las cursadas reglamentarias, alguna de duración anual, los docentes nos ayudaron organizándolas el mismo día. Ese día en La Plata debía compensarlo trabajando en el CAC durante el fin de semana. Afortunadamente en 1981 se suavizaron las exigencias y CNEA comenzó a ver con beneplácito la realización de la tesis.

Como parte de mis tareas codirigí con Eduardo la tesina de Alejandro Fendrik. Mi primera dirección. El trabajo titulado "Defectos Intersticiales en Materiales de Estructura

Hexagonal Compacta" fue la primera contribución en un tema que varias veces abordaría posteriormente. La tesina fue exitosamente defendida en la UBA en septiembre de 1981. Nuestro interés radicaba en poder identificar los pequeños sitios brindados por la geometría de la estructura cristalina, con espacio suficiente para alojar átomos de la misma matriz, y evaluar la energía interna requerida.

En 1982 obtuve el título de Doctor en Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP con la tesis "Estática y Dinámica de Defectos en Metales de Estructura Hexagonal Compacta", dirigida por Eduardo José Savino. Para los familiarizados en el tema mencionaré que en ella presenté potenciales interatómicos de pares para Mg con los cuales estudié: el entorno de la vacancia y el cambio de volumen producido en el cristal a través del cálculo del tensor dipolar, diferentes configuraciones de autointersticiales (completando el trabajo de Alejandro), la estabilidad de pares de Frenkel (par intersticial-vacancia), las energías asociadas a los caminos migratorios de la vacancia en la red (identificando las configuraciones de ensilladura correspondientes mediante la aproximación cuasiestática) y entropías vibracionales (ver nota N° 3 al final).

Los valores de energías y entropías obtenidos para la formación y la migración de la vacancia me permitieron evaluar las energías de activación para la autodifusión, tanto en direcciones contenidas en planos basales (0001) como en direcciones con componentes axiales. Los resultados mostraron un excelente acuerdo con los valores experimentales (Monti y col. 1981).

Sentimos entonces que el objetivo de Eduardo, que fue crear un grupo de trabajo que pudiese enten-

der las causas del comportamiento de algunos materiales a través del conocimiento de los procesos microestructurales, utilizando como herramienta la simulación computacional y el firme apoyo de mediciones disponibles, empezaba a lograrse. El nuestro fue, realmente, un trabajo pionero en el estudio de los defectos en materiales de estructura hcp.

Como 1974, también fue vertiginoso para mí el período 1980-1982, porque cursé y aprobé las materias exigidas por la UNLP, publiqué tres artículos en revistas internacionales, codirigí una tesina de grado, defendí mi tesis en abril de 1982, conocí en CNEA a quien es mi esposo al día de hoy, Guillermo Marcora, y nos casamos en octubre de dicho año. En lo personal 1982 fue un año extraordinario, para el país fue un año terrible por la triste historia de nuestros compatriotas en Malvinas.

■ ENSEÑANDO Y ALGO MÁS

La docencia, incluyendo temas de nuestras investigaciones, siempre fue un compromiso en el Departamento Materiales de CNEA. Es así como, poco después de sumarme al Grupo de Eduardo Savino, integré el equipo docente encargado de enseñar "Defectos" en los diferentes cursos de posgrado dictados en el CAC. Principié como ayudante y algún tiempo después me ocupé de las clases teóricas.

Un tema realmente crítico que debíamos cubrir era "dislocaciones", defecto lineal responsable de la plasticidad del material. En aquellos tiempos no contábamos con ilustraciones apropiadas para facilitar el concepto. No resultaba sencillo distinguir una dislocación de borde de una de hélice, ni comprender la deformación producida por un lazo de dislocaciones, ni

visualizar la disociación de una dislocación perfecta en dislocaciones parciales limitando una falla de apilamiento. Además de la física involucrada. A los alumnos les resultaba un tema difícil como me resultó a mí siendo alumna, cuando creí entender. Pero cuando me correspondió enseñarlo, comprendí que habían quedado huecos. Dándole vueltas al asunto encontré finalmente la solución mientras hacía tareas domésticas. Una esponja (paralelepípedo), de las utilizadas para la limpieza de enseres, podía ser cortada parcialmente de modo de poder separar el bloqucito superior del inferior pero sólo hasta la línea límite del corte. Imaginando tensiones tangenciales aplicadas sobre diferentes caras de la esponja (perpendicularmente o paralelamente a la línea límite de corte) dando lugar a que los bloqucitos experimentaran un deslizamiento relativo, resolvíamos el problema. Allí teníamos definido al plano de deslizamiento, la línea de dislocación, el tipo de desarreglo estructural en las cercanías de la línea, el vector de Burgers. En realidad, jugando con la esponja, podíamos visualizar ese complejo tema y facilitar la comprensión de todos los conceptos que descansan sobre el entendimiento de lo que es una dislocación. Fue así como diferentes esponjitas acompañaron mis clases durante muchos años, para alivio de mis alumnos y especialmente el mío.

En 1993 se creó el Instituto de Tecnología, llamado Instituto de Tecnología Profesor Jorge A. Sabato a partir de 1996, por convenio entre la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) y la CNEA. En el Instituto, que desarrolla sus actividades en el CAC, las materias a mi cargo fueron Defectos en Cristales (dentro del programa de estudios de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales y del Doctorado en Ciencia y Tecnolo-

gía, mención Materiales), y Física de Materiales (dentro del programa de estudios de la carrera Ingeniería en Materiales y compartida con el Dr. Gerardo Rubiolo), siendo designada Profesora Titular Ordinaria por concurso público. El vínculo con el Instituto Sabato crecía y se afianzaba cada vez más. Así es como me encontré asesorando a alumnos y a ex-alumnos que necesitaban profundizar en los temas de mi competencia, y dirigiendo trabajos de tesis de las carreras de posgrado en Ciencia y Tecnología de Materiales. En los períodos 2002-2007 y 2020-presente (2026) integré e integro, respectivamente, el Consejo Académico del Instituto.

A fines de 2007 fui designada Directora del Instituto Sabato, cargo que ocupé hasta mi retiro a fines de 2019. Lo anterior implicó el Decanato del Instituto en la UNSAM, y en CNEA la Gerencia del Instituto Sabato creada en 2013.

Cuando llegué a la Dirección del Instituto había ya una gigantesca y exitosa tarea llevada a cabo por mis predecesores, el Dr. José R. Galvele (director del Instituto desde su creación), y la Dra. Alicia L. Sarce³ (cuyo trabajo previo contribuyó de modo decisivo a tener el Instituto que tenemos quien, además, ejerció la dirección de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales desde su creación en 1994 hasta 2008). Ellos, junto a una larga y valiosa lista de colaboradores, habían logrado que el Instituto contase con un innegable prestigio. Prueba de éste ha sido la excelente recepción y el destacado desempeño, tanto de graduados como de alumnos avanzados, en reconocidos centros de investigación del exterior.

A las carreras de Ingeniería, Maestría y Doctorado mencionadas, se habían sumado el Doctora-

do en Ciencia y Tecnología, mención Física y la Especialización en Ensayos no Destructivos (www.isabato.edu.ar).

En el período en que me correspondió la dirección del Instituto incorporamos el Doctorado en Astrofísica y la Diplomatura en Materiales



En la dirección del Instituto con un conocido retrato del Profesor Jorge A. Sabato (2012).



Entregando un reconocimiento a la Dra. Sarce por su labor en el Consejo Académico del Instituto en el Acto Académico 2019.

para la Industria Nuclear. Dicho Doctorado, producto de la actividad del Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (CNEA-CONICET-UNSAM) es de doble titulación, ya que se desarrolla en cotutela con el *Karlsruhe Institut of Technology* de Alemania (KIT), por lo que el título académico es otorgado por UNSAM y por KIT.

La Diplomatura en Materiales para la Industria Nuclear está destinada a los agentes de la actividad nuclear que requieren una adecuada formación en el campo de los materiales para llevar adelante sus tareas técnicas. Contó desde su creación con gran aceptación por parte de los interesados en cursarla así como de los responsables de sus actividades.

El rigor con el que ha trabajado la comunidad "sabatiana" ha permitido que todas las carreras de posgrado estén acreditadas por CONEAU con el nivel A, y la Ingeniería en Materiales por el período máximo de 6 años. Además, la CNEA con sus institutos de formación (Balseiro, Sabato, Beninson), es Centro Colaborativo de América Latina designado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) desde 2018.

En dicho año implementamos las Experiencias de Verano del Instituto Sabato acompañados por entusiastas investigadores del CAC, las que se mantienen hasta el presente. Dirigidas a alumnos universitarios avanzados y graduados recientes en ciencia y tecnología, las mismas consisten en guiar a dichos jóvenes en la realización de una actividad específica que forme parte de una línea de trabajo en desarrollo, contando con asistencia permanente de investigadores responsables. De este modo, las Experiencias de Verano brindan a los jóvenes la oportunidad de conocer campos de trabajo para considerar una futura inserción laboral.

También quisimos contribuir con la formación de los docentes de nivel medio, para lo cual contamos con el apoyo del Instituto Nacional de Educación Técnica (INET) y, muy especialmente, con el tiempo y la dedicación de docentes del Instituto Sabato y de personal del CAC. Ello nos permitió organizar entrenamientos intensivos de pocos días para grupos de docentes provenientes de diferentes provincias. Y también con el apoyo del INET y para alumnos avanzados del nivel medio organizamos el concurso Los Materiales y la Humanidad, de convocatoria anual, en el cual las escuelas de todo el país son invitadas a presentar un trabajo que involucre algún aspecto de los materiales en su relación con la vida cotidiana. Como dicho concurso implica que los equipos participantes se trasladen al CAC para hacer la presentación pública de sus trabajos, tienen también la oportunidad de visitar las instalaciones y tener una idea de los proyectos que se desarrollan en el mismo. Nos hemos sorprendido, año tras año, con la excelente calidad de algunos de los trabajos que se presentan, permitiendo valorar la cuidadosa formación que reciben muchos de los que están llamados a continuarnos. Lamentablemente, dicho concurso se ha llevado a cabo de modo intermitente. La causa de las interrupciones es presupuestaria, ya que el INET (que generalmente provee los fondos para los traslados de los alumnos y sus docentes) no ha podido hacerlo en algunas ocasiones, siendo esto una verdadera pena. De dicho concurso he sido responsable, cuando estuve al frente del Instituto Sabato, y evaluadora de los trabajos cuando dejé de estarlo.

En 2004, siendo director el Dr. José R. Galvele, se organizó el concurso bianual "Premios Instituto Sabato" para galardonar trabajos de tesis en las categorías de Trabajo Fi-

nal de Grado, Maestría y Doctorado realizados en el país en el campo de la Ciencia y la Tecnología de Materiales. Para la siguiente convocatoria, en 2006, se le pidió a la SAM la organización del concurso. En ese entonces, el infatigable y entusiasta Dr. José "Pepe" Ovejero era Presidente de la Comisión Directiva de la SAM. Tuve el honor de acompañarlo en dos períodos, primero como Secretaria y luego como Vicepresidente. Desde entonces, y contando con los cuidadosos criterios aprendidos de Pepe para llevar adelante esta delicada tarea, estuve involucrada en la organización de dicho concurso; en un comienzo desde la SAM, luego como Directora del Instituto Sabato, y desde mi retiro y hasta el presente como integrante del Consejo Asesor de dicho concurso, junto a mis queridos colegas Alicia Sarce, Miguel Ipohorsky, Liliana Roberti y Ricardo Carranza. Ello me permite apreciar el crecimiento del número de carreras de grado y posgrado dedicados a la Ciencia y la Tecnología de Materiales en diferentes universidades del país, así como la ampliación de la temática. Esta última se ve imparable, desarrollando nuevos materiales y aportando nuevas funcionalidades.

Recordando nuestros orígenes, en 2012 celebramos el aniversario número ¡50! del primer Curso Panamericano de Metalurgia Nuclear. En el evento, que se desarrolló a lo largo del día, pudimos reunir a varias generaciones. Contamos con el relato de quienes formaron parte del grupo inicial forjado por Jorge Sabato para construir el Departamento de Metalurgia, luego evolucionado a Departamento de Materiales. Las anécdotas de primera mano, relatadas por el Ingeniero Heraldo Biloni, destacaron el empuje de ese particular grupo conocido como los "apóstoles de Sabato". El Ingeniero Héctor Espejo nos recordó cómo surgió y se

desarrolló el Sector de Ensayos No Destructivos del CAC, de trascendencia para la industria nacional, de implicancia regional y de clara conexión con los Materiales. El Dr. José Ovejero destacó la trayectoria del Departamento Materiales, sus proyectos más relevantes, y su íntima vinculación con la SAM. La Dra. Alicia Sarce nos contó sobre las intensas gestiones llevadas a cabo para lograr la creación del Instituto Sabato. Ese día ya no contábamos con el Dr. José Galvele, a quien habíamos perdido el año anterior. Pero, para que estuviese presente en el conocimiento de las futuras generaciones y como humilde reconocimiento de nuestra comunidad, se impuso su nombre al aula del Instituto destinada a la defensa de todos los trabajos de tesis presentados en el mismo. En 2018, al cumplirse el aniversario número 25 del Instituto Sabato, tuvi-

mos otra celebración durante la cual se inauguró una vitrina ubicada en el aula Dr. José R. Galvele que contiene los premios recibidos por José a lo largo de su trayectoria (generosamente donados por su familia). Siempre estuvimos convencidos de la importancia de recordar nuestros antecedentes, logrados con el trabajo mancomunado de diversas generaciones, para el esclarecimiento de nuestros estudiantes.

■ DESPUÉS DE LA TESIS, EN EL GRUPO TEÓRICO

Las subrutinas y programas que desarrollé durante mi tesis se incorporaron al patrimonio del Grupo Teórico, y fueron ampliamente utilizados por diferentes tesis e investigadores para estudiar propiedades estáticas, dinámicas y vibracionales de defectos microestructurales en va-

rias estructuras cristalinas, realizándose las adaptaciones requeridas en cada caso.

En los años siguientes generé potenciales de pares para circonio (Zr- α) y titanio (Ti- α), ambos de estructura hcp a bajas temperaturas, los que mantenían las distancias de equilibrio bajo presiones externas. En estos materiales se estudió todo lo abordado en mi tesis. Extendí el estudio a las diferentes configuraciones de divacancias y en 1984, siendo única autora y gozando de licencia por maternidad, revisé las pruebas de galera de la publicación a que dio lugar con mi primera beba en brazos. Además, conocido el proceso de aglomeración de vacancias que se produce debido al templado o al daño por irradiación, abordamos con la Sra. Patricia H. Bisio el estudio de la formación de peque-



Equipo Sabatiano: de izquierda a derecha, fila superior: Alfredo Hey, Miguel Ipohorsky, Patricio Escobar, Ana María Kurcin, Liliana Roberti, Valeria Hey, Ana María Monti, Antonio Tamburro, Silvia González; fila del medio: Sebastián Torcisi, Beatriz Pingitore, Alba Obrutsky, José Ovejero, Norma Boero (Prsidente de CNEA), Cristina Pingitore, Alicia Sarce; fila inferior: Fernando Necol, Ricardo Carranza, Rodrigo Garraza, Diego Milione, Luis Quesada (2013)

ños aglomerados, siendo éste su trabajo de licenciatura aprobado por la UBA en 1984.

Buscábamos describir la evolución de la microestructura bajo irradiación motivada en la interacción de diferentes defectos, lo que requería el aporte de varios de nosotros. Un hito fue entonces el estudio integral de propiedades estáticas y dinámicas de defectos puntuales en Mg y Zr- α y la interacción de éstos con bordes de grano y dislocaciones en planos basales y prismáticos, cuyas potencias de atrape fueron calculadas. Este trabajo, en el cual vimos la importancia del comportamiento anisotrópico de las difusividades de intersticiales y vacancias, fue complementado más tarde (cuando conocimos los EAM).

Desde 1984 aproximadamente, los potenciales interatómicos de pares en metales fueron superados por un nuevo concepto de potenciales basados en el método de Átomo Embebido (Embedded Atom Method -EAM) (ver Nota N° 4 al final).

Debimos entonces adaptar el Devil para incluirlos. De esta tarea resultó la tesis doctoral del Lic. Julián R. Fernández en el tema: "Defectos Microestructurales en Redes Cristalinas; caracterización de Propiedades mediante Simulación por Computadora", aprobado por la Universidad Nacional de Córdoba en 1994. Julián fue uno de mis primeros tesisistas y luego compañero de muy lindos trabajos por muchos años.

Utilizando un EAM confiable pudimos modelar la interacción entre defectos puntuales y sumideros, buscando comprender las causas del crecimiento bajo irradiación que experimentan los tubos de presión de un reactor en servicio. Estudiamos entonces las deformaciones de

los tubos a partir de la evolución microestructural de un cristal de Zr- α , encontrando tasas de deformaciones en acuerdo con la tendencia experimental (Fernández y col. 1994). Esto significó un logro muy satisfactorio para nuestro grupo, luego de varios años de esfuerzos compartidos.

En los trabajos anteriores prescindió de los efectos térmicos. A fin de incluirlos desarrollamos un método de cálculo autoconsistente para estudiar la estructura y las propiedades termodinámicas de los defectos a temperaturas finitas (ver nota N° 5 al final).

Sobre un amplio rango de temperaturas, 0K-1200K, calculé la energía libre de formación de vacancias, divacancias, trivacancias y autointersticiales en Cu, observando una notable disminución de la energía libre con el incremento de la temperatura y la estabilidad de la configuración intersticial dumb-bell <100> en todo el rango de temperaturas (Monti, 1994).

Con el tiempo ganamos confianza en el desarrollo de potenciales del tipo EAM y, contando con un fluido manejo de éstos en los programas de simulación, registramos una intensa actividad en la que participaron investigadores, tesisistas y estudiantes, consolidando con su producción a nuestro grupo cuya dirección llevé adelante desde 1987 a 2009.

Estudiamos, por ejemplo, el volumen de recombinación (espontánea, sin activación térmica) de pares de Frenkel en Zr- α y en Fe (de estructura cúbica de cuerpo centrado), en vinculación con el crecimiento por irradiación de tubos de presión y la fragilización de los recipientes de presión de centrales nucleares de potencia, respectivamente. Obtuvimos un volumen de recombinación anisotrópico extendido a lo largo de

las direcciones compactas, detallado en la tesis de Maestría del Lic. Luis. A. Barrios (codirigida con el Dr. Roberto C. Pasianot) y aprobada en 1998 en el Instituto Sabato siendo parte, además, del entrenamiento de la Srta. Silvana Belelli.

También encaramos la descripción atomística de defectos bidimensionales en cristales de estructura hcp. Abordamos las microestructuras de bordes de grano simétricos (maclas) y no simétricos en colaboración con el Prof. Vaclav Vitek, así como la migración de vacancias en dichos bordes a fin de aportar a la complejidad del proceso de transporte desde, hacia y a lo largo de diferentes tipos de bordes de grano (Fernández y col. 2000).

En paralelo estudiamos superficies libres con diferentes orientaciones, la formación de escalones en las mismas y de muescas en los escalones de acuerdo al conocido esquema microestructural TLK (Terrace-Ledge-Kink). Agregamos el estudio de la formación de vacancias y adátomos, así como sus modos de migración sobre las superficies y a lo largo de escalones y, específicamente para las vacancias, hacia y desde las superficies (tesis de Maestría y Doctorado de la Lic. María Inés Pascuet, codirigidas con el Dr. Roberto C. Pasianot) (Pascuet y col. 2003).

Con este cuerpo de resultados se pudo analizar el proceso difusivo por diferentes mecanismos de defectos en el volumen, en bordes de grano simétricos y no simétricos, en superficies libres con diferentes orientaciones y a lo largo de distintos tipos de escalones superficiales. Todos los trabajos utilizaron el mismo formalismo de simulación (con las correspondientes adaptaciones de los programas) y las mismas descripciones de interacciones atómicas para cada uno de los materiales

simulados, a fin de permitir la comparación de las constantes de difusión en los diferentes medios y para cada material. Una síntesis de estos resultados, presentada en el Congreso de la SAM de 1998, mereció el premio Jorge Kittl al mejor trabajo de Investigación Científica.

En sintonía con el avance de los conocimientos, en 2005 manejábamos códigos basados en primeros principios que, al proveer valores de energías para diferentes entornos atómicos, nos permitieron obtener informaciones sumamente útiles para construir potenciales interatómicos superadores. Mejoramos entonces nuestros EAM para Zr, Ti y Hf, desarrollamos potenciales para Nb y U, y nos enfocamos en los sistemas binarios Zr-Nb, Fe-Cu y Al-Mo, incluyendo explícitamente información termodinámica (basada en el formalismo de variación de cúmulos) para el ajuste de potenciales.

El EAM para U logró estabilizar la fase ortorrómbica de bajas temperaturas frente a otras de mayor simetría, como pudo comprobarse a través de simulaciones a temperaturas finitas. La evolución del volumen atómico con el incremento de la temperatura mostró discontinuidades, en correspondencia con la transformación de la fase ortorrómbica a la fase bcc de alta temperatura y luego con la posible fusión del material. En cuanto a la autodifusión de la vacancia en la fase ortorrómbica, estudiada mediante los saltos a primeros vecinos en la aproximación cuasiestática, observamos una marcada anisotropía que confirmamos mediante el método de Monte Carlo cinético.

Nuestras motivaciones para el estudio de los sistemas binarios arriba mencionados fueron las siguientes. Las aleaciones de Zr con bajo contenido de Nb se utilizan en

componentes estructurales de reactores nucleares. Durante el servicio, esos componentes sufren cambios dimensionales y de sus propiedades mecánicas por efecto de la irradiación neutrónica, que incrementa la concentración de defectos puntuales. El binario Fe-Cu es considerado una aleación prototipo para comprender la fragilización bajo irradiación sufrida por ciertos aceros de vasija de las usinas nucleares. Si bien el binario es prácticamente inmiscible a todas las temperaturas de interés, la irradiación produce pequeños precipitados ricos en Cu (responsables del endurecimiento) a partir de concentraciones globales aún inferiores al 1%. El sistema modelo Al-Mo consistió en una primera aproximación para llevar a cabo un estudio atomístico de la estructura de la interfase Al/U-Mo. La aleación U-Mo, con un contenido aproximado de 10%wt.Mo, considerada candidata para la fabricación de combustibles nucleares de alta densidad, ayuda a estabilizar la fase bcc de alta temperatura del U. Ya sea como material disperso o monolítico, dicha aleación se colamina con Al formando placas que, al ser sometidas a temperatura forman una zona de interacción en la superficie de contacto, principalmente por la difusión del Al en U-Mo. Dicha zona, rica en aluminuros de uranio que se fracturan por efecto de las tensiones acumuladas, deterioran el contacto térmico y la eficiencia con la que la matriz de Al extrae calor del material fisiónable. Por ello nuestro interés en la interfase Al/U-Mo, representada por el sistema Al(fcc)-Mo(bcc), ya que allí ocurren los procesos atómicos responsables de la disminución del rendimiento del combustible. Pudimos observar que las diferencias de parámetros de red entre las dos fases en contacto generan dislocaciones de desajuste íntegramente contenidas en la fase fcc del Al, y

obtuvimos energías de interfaces en acuerdo con datos experimentales. También estudiamos la energética de vacancias y antisitios en intermetálicos del sistema modelo, y las correspondientes concentraciones de equilibrio en función de la temperatura y la desviación de la estequiometría.

El interés por combinar simulaciones y laboratorio (volviendo un poquito a mis orígenes en materiales) me llevó a una lindísima tarea encarada conjuntamente con el Dr. Luis M. Gribaudo. El Zircaloy, aleación de Zr utilizada en la industria nuclear, cuenta con Sn como principal aleante. El Hf, con adiciones de Zr, se emplea en las barras de control de algunos reactores nucleares como Atucha I y II. Esto motivó el estudio del sistema ternario Zr-Hf-Sn en la zona rica en metales de transición. Luego de los tratamientos térmicos en muestras seleccionadas en la región hasta 37.5% Sn, caracterizamos fases mediante observaciones metalográficas, diagramas de difracción de Rayos X y análisis con microsonda electrónica. También calculamos los parámetros de red de las fases en equilibrio. Parte de este trabajo constituyó la tesis de Maestría del Ingeniero Diego H. Ruiz, codirigida con Luis y aprobada en el Instituto Sabato en 2004. En el artículo (Ruiz y col. 2006) contamos con la invaluable contribución de la Dra. María Ortiz Albuixech.

Además, en los sistemas binarios Zr_5Sn_3 , Ti_5Sn_3 , y Hf_5Sn_3 se había verificado experimentalmente la posibilidad de intercambiabilidad sustitucional de los elementos de transición en todo el rango de composición de cada sistema. Sobre esta base abordamos el estudio de dicha intercambiabilidad en los sistemas ordenados $(Zr_xHf_{(1-x)})_5Sn_3$ y $(Ti_xZr_{(1-x)})_5Sn_3$ mediante la aplicación de

técnicas *ab-initio* y el apoyo del Dr. Rubén Weht, logrando muy buenos resultados.

■ PESE A LA DISTANCIA...

Corría 1988 cuando se inició una fructífera y afectuosa colaboración con la Universidad Nacional del Comahue (UNCOMA), institución donde la Lic. Susana B. Ramos de Debiaggi se desempeñaba. Con el objetivo de una tesis doctoral unimos conocimientos con el Dr. Alfredo Caro⁴ para codirigirla, y en 1993 en el Instituto Balseiro Susana defendió exitosamente su trabajo titulado "Simulaciones por computadora de propiedades estructurales y dinámicas en materia condensada usando aproximaciones cuánticas y clásicas".

Había mucho por investigar, de modo que continuamos trabajando en Ni, Al, y la aleación ordenada Ni₃Al, materiales abordados en la tesis. Utilizando potenciales de muchos cuerpos basados en el modelo EAM y la aproximación cuasiestática estudiamos la difusión por mecanismo de vacancias, calculando energías y entropías de formación y de migración del defecto. Si bien la expansión térmica de la red no pudo incluirse explícitamente en esa etapa, obtuvimos resultados en buen acuerdo con los medidos en la zona de bajas temperaturas.

Por otro lado, la aleación Ni₃Al había despertado gran interés alrededor de 1985 (especialmente en la industria aeronáutica) debido a sus excelentes propiedades a altas temperaturas, pero el comportamiento difusivo era prácticamente desconocido. En dicho intermetálico ordenado, compuesto por cuatro redes cúbicas simples interpenetradas, tres de ellas ocupadas por Ni y una por Al, el orden complica el mecanismo de difusión. Junto a Susana y a

la Lic. Paula Decorte, de UNCOMA, encontramos que los saltos simples de un átomo de Ni a un sitio vacante, conservando o no el orden, son energéticamente más favorables que saltos cíclicos correlacionados que sí lo conservan.

A la concentración de equilibrio termodinámico de defectos y a la autodifusión en los metales puros mencionados volveríamos tiempo después, cuando la experiencia y los avances registrados nos permitieron abordar un detalle del gráfico de Arrhenius en la zona de altas temperaturas. Éste consiste en una marcada curvatura hacia arriba, especialmente detectada en Al y bastante discutida en la década de 1970, siendo entonces atribuida a la contribución de divacancias sumada a la de vacancias.

A fin de explorar las causas de dicha curvatura debimos completar los estudios de Estática Molecular con Dinámica Molecular. El programa de cálculo utilizado para este fin fue complementado mediante el desarrollo y escritura de las subrutinas que permitieron aplicar la teoría de Einstein de la difusión atómica aleatoria. Sospechábamos que a altas temperaturas podían ocurrir saltos múltiples de la vacancia, afectando así a su dinámica al desviarla del comportamiento lineal. Y efectivamente encontramos la ocurrencia de saltos simples, dobles y triples tras un paciente y minucioso trabajo que consistió en la tesis de Maestría de la Profesora María García Ortega, codirigida con Susana. Dichos saltos múltiples, cuya frecuencia vimos aumentar con el incremento de temperatura, requieren barreras energéticas más altas que la asociada al salto simple de la vacancia. En cuanto a las divacancias, observamos que su baja energía de unión (predicha por los potenciales interatómicos utilizados) llevaban a la

disociación del defecto en la zona de altas temperaturas (García Ortega y col. 2002).

La no linealidad en el gráfico de la concentración de equilibrio de vacancias podía ser también atribuida a una dependencia explícita de las entalpía y entropía de formación con la temperatura. Si bien los efectos anarmónicos en las propiedades de los defectos puntuales se habían propuesto en el pasado, los progresos alcanzados en técnicas de simulación podían demostrar su importancia. Usamos entonces Dinámica Molecular, Integración Termodinámica y cálculos de Trabajo Reversible para obtener la energía libre a diferentes temperaturas, contando con la contribución fundamental del Dr. Maurice de Koning, de la Universidad Estadual de San Pablo. Encontramos así una clara curvatura en el gráfico de Arrhenius de la concentración de equilibrio de vacancias en Al y Ni, causada por un incremento notable de la entalpía de formación de la vacancia y de la correspondiente entropía a la temperatura de fusión respecto del valor a 0K. En consecuencia, los efectos anarmónicos dan lugar a un notable incremento (superior al 100 %) en la concentración de vacancias a la temperatura de fusión, mientras que la contribución de las divacancias en Ni representa apenas el 2%.

Finalmente estudiamos las propiedades de formación termodinámica y la migración de autointersticiales en Al y Ni, en función de la temperatura, usando el mismo esquema de cálculos arriba indicado. Según el modelo de intersticialia habrían de esperarse altos valores de entropías vibracionales de formación a altas temperaturas, entre 10-20 k_B (en unidades de la constante de Boltzmann). Y explorando el comportamiento de la configuración intersticial dumb-bell <100>,

ya referida en esta reseña, encontramos valores en el orden de $15k_B$ indicando que la contribución de los autointersticiales a la autodifusión a altas temperaturas no debería ser despreciada (Ramos de Debiaggi y col. 2006).

Una síntesis de lo anterior titulada "Termodinámica y cinética de defectos puntuales en Al y Ni", presentada en el Congreso de la SAM de 2005, mereció el Premio Jorge Kittl al mejor trabajo de Investigación Científica.

Años después colaboré con el estudio del sistema Cu-In-Sn, de interés por su aplicación en el desarrollo de nuevas aleaciones libres de Pb en tecnologías de unión. La soldadura por difusión permite desarrollar uniones que requieren bajas temperaturas de fabricación y soportan altas temperaturas de servicio (ideal para dispositivos utilizados en las industrias electrónica y eléctrica). Las propiedades tecnológicas de la unión (temperaturas de servicio admisibles, dureza, resistencia mecánica, eléctrica y a la corrosión) se vinculan directamente con las propiedades estructurales y termodinámicas de las necesarias fases intermetálicas que forman la soldadura. Junto a investigadores de UNCOMA, de la Universidad Nacional del Sur, y del Centro Atómico Bariloche, acompañamos el trabajo experimental analizando diversas fases intermetálicas mediante el empleo de métodos basados en primeros principios (Ramos de Debiaggi y col. 2011) conformando un nutrido y enriquecedor grupo de trabajo.

■ UN ESLABÓN

Es lo que afortunadamente he sido (y aún procuro ser), fuertemente ligado de uno y otro lado en la

larga cadena del conocimiento que nutre a la Ciencia y la Tecnología de Materiales. Desde las tarjetas perforadas a las nuevas y potentes computadoras, desde la descripción de una simple vacancia a la multiplicidad de temas en los que se aborda el efecto de la microestructura en las propiedades del material, desde los Cursos Panamericanos al Instituto de Tecnología Profesor Jorge A. Sabato, con su oferta académica y sus actividades de extensión. Efectivamente el campo ha crecido, en el país y en el mundo. Para ello es imprescindible construir y conservar la cadena.

Las universidades (públicas) que me formaron y mis directores de tesis fueron fundamentales por lo que sembraron, el Décimo Curso Panamericano de Metalurgia me sumergió de lleno en un mundo fascinante, mis compañeros de trabajo en CNEA, UNCOMA, UNSAM (una lista interminable de personas) me abrieron (afortunadamente) muchas veces la cabeza así como mis alumnos con sus agudas preguntas, mis padres, mi esposo, mis hijas (que soportaron mis ausencias cuando lo requería) siempre fueron un apoyo incondicional. A todos les debo mi profundísimo agradecimiento porque, gracias a ellos, pude sumar un granito de arena en la Ciencia y Tecnología de Materiales.

■ NOTAS

1. En una estructura perfecta en equilibrio se generarían defectos, desequilibrando así al sistema. Pero los Gradientes Conjugados del Devil minimizarían la energía a expensas de relajaciones en las posiciones atómicas bajo condiciones de contorno adecuadas. Contrastando este valor de energía con el corres-

pondiente a la red perfecta obtendríamos la energía interna de formación del defecto, un objetivo de nuestro trabajo.

2. Pude desarrollar un potencial semi-empírico para Mg que reproducía razonablemente ambos parámetros de red, las seis constantes elásticas y la energía de cohesión del material. Contaba con alcance a unas cinco capas de vecinos y una pared repulsiva a distancias cortas. Estaba compuesto por varios polinomios de grado tres que empalmaban entre sí con continuidad de la función y de sus dos primeras derivadas. Este potencial aseguró la estabilidad de la red perfecta al ser perturbada por ligeros desplazamientos atómicos asignados al azar. Ya estaba en condiciones de estudiar algo tan simple como el efecto producido en la red por el desequilibrio de fuerzas generado por la vacancia. Y mi primer resultado fue describir los desplazamientos, respecto de su posición en red perfecta, de las diferentes capas de vecinos del defecto.
3. Esto último implicaba otro desafío dadas las facilidades computacionales disponibles. Primero escribí un programa en Fortran IV para aplicar la aproximación de Einstein, la cual considera a la red como un conjunto de osciladores independientes vibrando en el pozo de potencial creado por su entorno. Obtuve entonces los tres autovalores de la matriz de constantes de fuerzas construida para cada oscilador, esto es, sus frecuencias vibracionales. Luego, en una descripción más adecuada consideré acoplados a todos los átomos del cristal, y mediante diagonalización de la correspondiente matriz de constantes de fuerzas

(de dimensión apreciable) obtuve las frecuencias y los modos de vibración de la red.

4. Los EAM constan de un término que da cuenta de la interacción de los carozos iónicos y un segundo término que depende de la densidad electrónica local. Son potenciales de equilibrio y aventajan a los de pares porque permiten reproducir exactamente los valores de todas las constantes elásticas del material. Además, al incluir un término que da cuenta de la densidad, son confiables para el estudio de defectos que producen un cambio local de volumen, especialmente defectos puntuales y sus aglomerados, así como superficies externas e internas del material.
5. Describimos la energía libre de la red en la aproximación armónica local, que consta de dos contribuciones: estática y vibracional. La primera depende de las coordenadas atómicas, las cuales cambian con la expansión térmica. La segunda depende explícitamente de la temperatura y de las frecuencias de los modos normales, las cuales son funciones implícitas de las coordenadas atómicas y por lo tanto pueden cambiar con la expansión térmica. Este formalismo exigió un arduo trabajo de programación iniciado por el Dr. Ricardo Migoni. También hubo que construir un potencial interatómico continuo hasta el tercer orden de derivación (para incluir los cambios en las frecuencias vibracionales) eligiendo trabajar en Cu, material de estructura cúbica centrada en las caras (fcc), debido a la disponibilidad de resultados experimentales.

■ BIBLIOGRAFÍA

Fernández, J.R.; Monti, A.M.; Sarce, A. L.; Smetniansky-De Grande, N. (1994) "Pressure Tube Deformation predicted via a Microstructural Evolution description", *Journal of Nuclear Material* 210, 282-289.

Fernández, J.R.; Monti, A.M.; Pasianot, R.C.; Vitek, V. (2000) "An Atomistic Study of Vacancies Formation and Migration in Twin Boundaries for Ti and Zr", *Philosophical Magazine (A)* 80, 1349-1364.

García Ortega, M.; Ramos de Debiaggi, S.B., Monti, A.M. (2002) "Self-diffusion in fcc metals: static and dynamic simulations in Aluminum and Nickel", *physica status solidi (b)* 234, 506-521.

Monti, A.M.; Banchik, D. (1980) "Effect of the Quenching Medium and the Solidification Microstructure on the θ' Precipitation in Al-Al₂Cu Eutectic Alloys", *Canadian Metallurgical Quarterly* 19, 279-284.

Monti, A.M.; Savino, E.J. (1981) "Calculation of the Formation Entropy and Diffusivity Constants for the Vacancy in Mg", *Physical Review B* 23, 6494-6502.

Monti, A.M. (1994) "Computer Simulation of Point Defects at Finite Temperatures", *physica status solidi (b)* 184, 81-91.

Pascuet, M.I.; Fernández, J.R.; Pasianot, R.C.; Monti, A.M. (2003) "Modeling of surface diffusion in hcp Zr and Ti", *Interface Science* 11, 121-129.

Ramos de Debiaggi, S.B.; de Koning, M.; Monti, A.M. (2006) "Thermodynamics and kinetics of self-interstitials in aluminum and nickel", *Physical Review B*, 73 (10), 1-9.

Ramos de Debiaggi, S.B.; Cabeza, G.F.; Deluque Toro, C.; Monti, A.M.; Sommadossi, S.; Fernández Guillermet, F. (2011) "Ab initio study of the structural, thermodynamic and electronic properties of the Cu₁₀In₇ intermetallic phase", *Journal of Alloys and Compounds*, 509, (7), 3238-3245.

Ruiz, D.H.; Monti, A.M.; Ortiz Albuixech, A.; Gribaudo, L.M. (2006) "Equilibria in the Zr-Hf-Sn system in the region up to 37.5 %Sn", *Journal of Nuclear Material* 348, 45-50.

■ NOTAS

1 Eutéctico es una mezcla de varios componentes con punto de fusión mínimo, inferior al correspondiente a cada uno de los componentes en estado puro.

2 Ver Reseña de Heraldo Biloni en <https://aargentnapciencias.org/publicaciones/revista-resenas/resenas-tomo-1-no-2-2013/>

3 Ver Reseña de Alicia Sarce en <https://aargentnapciencias.org/wp-content/uploads/2023/09/05-RESENA-Sarce-CeIResenasT11N3-2023.pdf>

4 Ver Reseña de Alfredo Caro en <https://aargentnapciencias.org/wp-content/uploads/2022/12/02-RESENA-Caro-CeIResenasT10N4-2022.pdf>