

## La investigación siderúrgica en el CENIM(\*)

S.F. Medina\*, F. López\* y M. Morcillo\*

### Resumen

En el año 2002 el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) cumplió 39 años como Centro de Investigación Metalúrgica, siendo el acero el material más estudiado entre los diferentes metales y aleaciones que han sido investigados a través de proyectos financiados por los planes nacionales de ciencia y tecnología, por los distintos programas europeos de apoyo a la investigación metalúrgica y por las empresas siderúrgicas que han depositado su confianza durante muchos años en la labor investigadora que se ha desarrollado en el CENIM. Dos generaciones de investigadores han dedicado su vida profesional al estudio del acero en sus múltiples especialidades, desde la metalurgia primaria que parte del mineral y los procesos de enriquecimiento, la termodinámica de las reacciones en el horno alto y en la cuchara, los tratamientos térmicos y termomecánicos, la metalurgia física de los aceros, sus propiedades mecánicas y finalmente el deterioro de los mismos en multitud de medios de diferente agresividad. El CENIM sigue apostando por la investigación siderúrgica, donde cabe destacar la ingente labor investigadora desarrollada y financiada en el marco del Programa CECA desde que España ingresó en enero de 1986 en la Comunidad Europea.

### Palabras clave

Siderurgia. Investigación comparativa. Publicaciones.

## Iron and steel research at CENIM

### Abstract

In 2002 the National Centre for Metallurgical Research (CENIM) celebrated its 39<sup>th</sup> anniversary. During this time, steel has been the most studied material of all the metals and alloys researched in the different projects funded by national science and technology plans, European metallurgical research programmes, and by the iron and steelmaking companies who over the years have placed their trust in the research work undertaken at CENIM. Two generations of researchers have dedicated their careers to studying the different aspects of steel, from primary metallurgy considering iron ores and enrichment processes, the thermodynamics of reactions in the blast furnace and in the ladle, thermal and thermomechanical treatments, the physical metallurgy of steels, their mechanical properties, and finally their deterioration in a wide range of media of different aggressivities. CENIM maintains its commitment to iron and steel research, drawing attention to the vast amount of research work undertaken and financed within the framework of the ECSC programme since Spain joined the European Community in January 1986.

### Keywords

Iron and steel. Comparative research. Publications.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) nació en 1963 como resultado de la fusión de tres Institutos públicos de Investigación: El Instituto del Hierro y del Acero, el Instituto de la Soldadura y el Instituto de Metales no Férricos. Desde 1963 hasta 1977 perteneció al Patronato Juan de la Cierva y desde entonces pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Organismo Público de Investigación (OPI) que actualmente se enmarca y depende ad-

ministrativamente del nuevo Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCyT). La labor investigadora del CENIM se ha centrado en la metalurgia en general y los proyectos de investigación realizados han seguido las líneas establecidas por los Planes Nacionales de Investigación y desde el primero de enero de 1986, fecha en que España se integró en la Comunidad Europea (CE), ha realizado una importante tarea investigadora en colaboración con otras instituciones europeas, incrementando su prestigio internacional como demuestra el notable número de proyectos financiados por la CE y la

(\*) Trabajo recibido el día 11 de octubre del 2002 y aceptado en su forma final el día 23 de julio de 2003.

(\*) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM); Avda. de Gregorio del Amo, 8; 28040 Madrid. E-mail: smedina@cenim.csic.es

divulgación de los resultados científicos en Congresos y Revistas Internacionales relacionados con la Metalurgia.

En particular, un gran esfuerzo investigador se ha focalizado en la investigación siderúrgica. No en vano, el acero sigue siendo la aleación metálica más investigada en el mundo y evidentemente el CENIM no ha sido ni debe ser una excepción en este sentido.

Actualmente, el CENIM cuenta con una plantilla de 50 investigadores científicos, 8 Titulados Superiores, 8 Titulados Técnicos, 67 Técnicos y el resto distribuido entre el personal administrativo y laboral, hasta completar una plantilla fija de aproximadamente 150 personas.

Además de la investigación científica y técnica, el personal investigador realiza tareas de formación, especialmente de Doctorado y Posdoctorado, contando en la actualidad con un grupo en formación de aproximadamente 40 becarios, que representan en buena medida el potencial investigador y, por consiguiente, el futuro del CENIM. Su formación se completa con estancias de más de dos años en Institutos de Investigación Extranjeros, reconocidos como Instituciones de élite en el campo de la Metalurgia. De este modo, el CENIM asegura el relevo generacional y configura un Centro con nueva savia que conoce de primera mano las líneas prioritarias de la investigación metalúrgica de los países más avanzados.

Desde 1964 el CENIM empezó a editar "Revista de Metalurgia", publicándose de una manera ininterrumpida hasta nuestros días. La revista goza de una buena reputación y difusión tanto dentro del país, como en el extranjero, especialmente en Ibero-América, y podemos decir con orgullo que gracias a los autores de los artículos científicos, a los revisores y a las personas más directamente involucradas en su publicación, la revista se encuentra desde 1997 incluida en el ranking del "Science Citation Index". Es una de las pocas revistas que siendo editadas en castellano se encuentra catalogada en dicha lista y la única en el campo de la metalurgia.

Para realizar las tareas científicas, el CENIM se estructura en cuatro departamentos, lo que permite unificar y facilitar el trabajo de investigación de acuerdo con la especialidad de las mismas: (1) Metalurgia Primaria y Reciclado de Materiales; (2) Metalurgia Física; (3) Ingeniería de Materiales, Degradación y Durabilidad; (4) Corrosión y Protección. Como apoyo a las actividades de investigación, el CENIM cuenta con ocho Unidades de Apoyo y Servicio: Biblioteca y Documentación,

Análisis químico, Ensayos Mecánicos, Taller Mecánico, Electrónica, Informática, Metalografía y Mantenimiento.

## 2. INVESTIGACIÓN SIDERÚRGICA

Una breve mirada retrospectiva al antiguo Instituto del Hierro y del Acero, auténtico embrión del actual CENIM como centro de investigación metalúrgica, y en particular a los primeros años de su singladura como tal, permiten resaltar como actividad relevante y trascendente, el apoyo directo a la industria y a los sectores relacionados con el acero: investigación, asistencia técnica, normalización y formación. Un buen número de técnicos metalúrgicos, especialmente de procedencia siderúrgica, de empresas tan importantes como ENSIDESA, Altos Hornos de Vizcaya, etc., actualmente integrados en ACERALIA, fueron formados en nuestros laboratorios, y una buena parte de las normas UNE, especialmente sobre aceros, análisis metalúrgicos, recubrimientos protectores, etc. se hicieron en el CENIM. El control radiológico de todas las soldaduras de las primeras centrales nucleares de Garoña y Zorita, de la central térmica de Puentes de García Rodríguez y del complejo petro-químico de Tarragona fue realizado por personal especializado de nuestro centro.

Como ha ocurrido con otras ciencias y técnicas, la investigación siderúrgica y la forma de realizarla ha evolucionado enormemente en los últimos 25 años. Los nuevos equipos y laboratorios han modificado la forma de hacer investigación. El conocimiento científico es necesario para progresar en el desarrollo tecnológico y este último facilita a su vez el camino para profundizar en la ciencia. La tecnología plasmada en los nuevos equipos de investigación (Microscopios Electrónicos, Aceleradores de Partículas, etc.) o bien en la modernización de los equipos clásicos (difractómetros, equipos simuladores de procesos industriales, equipos analíticos, etc.) han permitido incrementar notablemente el conocimiento científico y tecnológico en la fabricación de nuevos y mejores aceros, que hacen que este material continúe estando presente en la mayor parte de las construcciones de ingeniería.

### 2.1. Líneas de investigación

La investigación en el CENIM se realiza en los cuatro Departamentos anteriormente citados<sup>[1]</sup>.

Cada uno cuenta con el equipamiento necesario que permite afrontar con éxito la investigación específica, además de contar con el equipamiento propio y más general de las distintas Unidades de Apoyo. Un resumen de las líneas de investigación que actualmente se llevan a cabo son las siguientes:

- *Física de Materiales*: Caracterización microestructural; Propiedades mecánicas; Transformaciones en estado sólido y diagramas; Deformación a alta temperatura; Pulvimetalurgia; Materiales compuestos; Intermetálicos; Nanomateriales; Dinámica de aerosoles; Texturas; Recristalización estática y dinámica; Superaleaciones y aleaciones ligeras; Aceros.
- *Metalurgia Primaria*: Tratamientos metalúrgicos; Operaciones en metalurgia extractiva no férrea; Procesos siderúrgicos de cabecera y ferroaleaciones.
- *Reciclado de Materiales*: Caracterización de residuos; Tratamientos de residuos; Depuración de efluentes industriales; Degradación y aprovechamiento energético de residuos.
- *Deterioro de Materiales y Tratamiento de Superficies*: Recubrimientos protectores; Corrosión en medios naturales; Modificación superficial; Biomateriales base hierro; Corrosión de armaduras en hormigón; Físico-química de superficies; Pasivación; Alteración y conservación del patrimonio cultural
- *Ingeniería de Procesos*: Modelización y simulación de procesos metalúrgicos; Metalurgia de la soldadura y corte; Mecánica de fractura; Técnicas avanzadas de unión; Desarrollo de métodos analíticos; Tratamientos termomecánicos (laminaación, forja, extrusión, etc.).

## 2.2. Equipamiento científico

El CENIM dispone de un amplio equipamiento científico y técnico que permite afrontar con éxito la investigación tanto a través de proyectos financiados por programas nacionales y europeos, como por contratos de investigación financiados por la industria. Por otra parte, la renovación de los equipos obsoletos se realiza fundamentalmente a través de los Programas Nacionales de Infraestructura. Una relación del equipamiento más relevante sería la siguiente:

- Microscopio electrónico de transmisión (MET)
- Microscopios electrónicos de barrido (MEB), incluido el de tipo "Field Emission"

- Difractómetros de rayos X (DRX), equipado con círculo abierto de Euler, y de electrones
- Laboratorio de microscopía óptica
- Equipo de torsión en caliente
- Equipos de ensayos de fatiga y resistencia a la fractura
- Solidificación rápida
- Dilatómetros, equipos de análisis térmico diferencial y termogravimetría
- Generador y clasificador de aerosoles
- Equipos de análisis químico (absorción atómica, fluorescencia de rayos X, espectrometría de masas con fuente IPC, espectrometría de emisión óptica, etc.)
- Espectrómetro fotoelectrónico de rayos X (XPS)
- Analizador de gases por espectrometría de masas
- Técnicas especiales de fusión y colada: plasma y electroescoria
- Técnicas electroquímicas para estudios de corrosión
- Equipos de soldadura: MIG, TIG, MIG/MAG
- Equipos de compactación isostática en frío y en caliente
- Prensa de extrusión en caliente
- Atomizador
- Molino planetario de alta energía
- Hornos de vacío para tratamientos térmicos
- Técnicas de adelgazamiento iónico, sputtering y evaporador
- Analizador de imágenes
- Equipos de tracción y fluencia
- Equipos de desgaste y rugosímetro
- Técnicas de lixiviación a presión, extracción con disolventes, sinterización y combustión.
- Planta piloto de utilización conjunta ACERALIA-CENIM, instalada en Gijón, con el siguiente equipamiento: planta de sinterización; cámara de gasificación de coque y filtro metálico de gases calientes.
- Viscosímetro
- Equipo para la determinación de ecotoxicidad
- Equipo de corrosión bajo tensión
- Equipo láser de CO<sub>2</sub>
- Técnicas de galvanización por inmersión en caliente

## 2.3. Materiales férreos

Tradicionalmente en el CENIM se ha venido investigando el acero desde el propio mineral hasta el producto. La investigación del acero en su fase primaria, en la que sucintamente se incluyen

operaciones y procesos tales como la separación magnética, caracterización de los minerales, peletización y sinterización, combustión de carbones y coques, distribución de la carga en el horno alto, etc., son investigados en plantas piloto, o simuladores de los procesos industriales, instalados en el CENIM y en ACERALIA.

La fase intermedia comprende desde el horno eléctrico o el convertidor hasta la cuchara, donde se ajusta la composición química del acero por adición de ferroaleaciones, desulfurantes y técnicas de desgasificación, etc. En este campo, la investigación del CENIM es de colaboración con las acerías en aquellos temas que incluyen aspectos termodinámicos o cinéticos que dan lugar a una investigación concertada a través de contratos o bien proyectos de cooperación.

En cuanto a los tipos de aceros estudiados se cubren prácticamente todas las familias, especialmente los aceros de nuevo desarrollo, y los aspectos que se investigan se circunscriben a líneas citadas en el apartado 3.1. Las actividades de investigación siguen las tendencias generales en Europa, que tienen como objetivo general incrementar su utilidad y su competitividad. En este sentido, hacemos un breve resumen de la investigación que se realiza sobre el acero, entendido como producto y por tanto como material en condiciones de servicio.

En los aceros especiales se estudia la mejora de sus propiedades mecánicas a través del control de la microestructura. En los aceros con aplicaciones a altas temperaturas, se estudia la optimización de la soldadura, la mejora de las propiedades mecánicas, especialmente la dureza y la fluencia, así como el crecimiento de partículas con la temperatura. En el caso de los aceros de corte, se trabaja fundamentalmente en los nuevos aceros con menos carbono. En los aceros magnéticos, con un porcentaje de Si comprendido entre 1 y 3 %, se realizan estudios de la evolución microestructural en laminación en caliente, de la laminación en frío y el recocido posterior. Los aceros estructurales, como los aceros HSLA, IF y en general microaleados con diferentes porcentajes de carbono, son estudiados desde el punto de vista de la evolución microestructural en los procesos de conformación en caliente (laminación, forja, extrusión) a través de simulaciones termomecánicas y estudios de transformaciones de fase. La importancia de los microaleantes (Nb, V, Ti, N) en este tipo de aceros es decisiva en la formación, distribución y tamaño de los precipitados, responsables en buena medida

de la microestructura final y por tanto de sus propiedades mecánicas. Los precipitados son estudiados y clasificados mediante microscopía electrónica (SEM, TEM). Todos los grupos de aceros inoxidables (ferríticos, austeníticos, martensíticos y duplex) son estudiados, especialmente desde el punto de vista de la laminación, soldadura y corrosión. Un capítulo importante son los aceros con aplicaciones en el sector de la automoción y en este sentido el CENIM viene trabajando en los aceros multifase, TRIP, HSS y en general en los aceros contemplados en el Proyecto ULSA-X.

## 2.4. Proyectos de investigación

La labor investigadora se desarrolla fundamentalmente a través de subvenciones de la Unión Europea, especialmente del Programa CECA, de los Programas del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Plan Nacional de Investigación, FEDER, PROFIT, PETRI) y finalmente mediante contratos directos con la industria siderúrgica. La tabla I muestra la evolución en el período 1992-2001 del número de proyectos y contratos realizados por el personal investigador del CENIM. Se observa una clara progresión con el tiempo.

Los datos anteriores están referidos al número total de proyectos. Sin embargo, una buena parte de la actividad investigadora se ha concentrado en el tema acero, donde la participación en el programa CECA ha sido de gran importancia, de tal modo que el número de proyectos subvencionados por dicho programa representa anualmente más del 70 % del total de proyectos europeos (Fig. 1), siendo la financiación relativa aún superior, lo que ade-

**Tabla I.** Proyectos de investigación en curso de realización durante el período 1992-2001

*Table I. Research projects under way each year during the period 1992-2001*

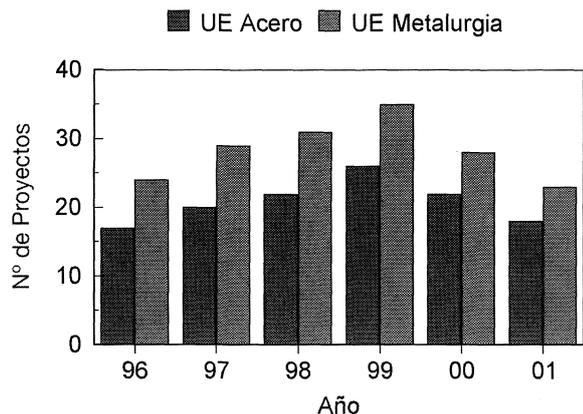
Proyectos Projects	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01
UE	18	14	14	18	24	29	31	35	28	23
N	31	21	24	29	29	39	40	36	53	42
A	1	3	3	2	4	1	3	5	8	16
C	34	20	27	31	22	37	36	28	45	37

UE = Financiados por la Unión Europea/*Financed by European Union*

N = Financiados por Instituciones Nacionales/*Financed by National Institutions*

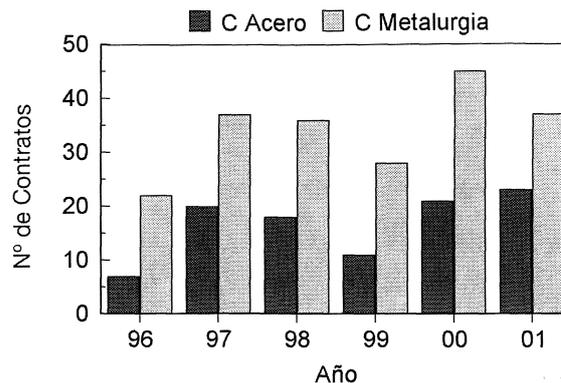
A = Acciones/*Actions*

C = Financiados por la industria/*Financed by industry*



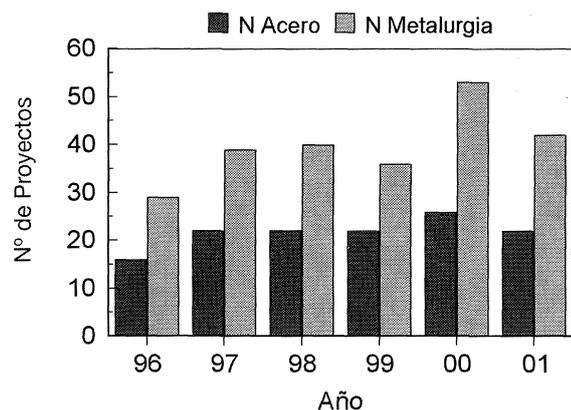
**Figura 1.** Distribución de proyectos europeos, metalúrgicos en general y siderúrgicos en particular, en el período 1996-2001.

Figure 1. Distribution of European projects, metallurgy in general and iron and steel in particular, in the period 1996-2001.



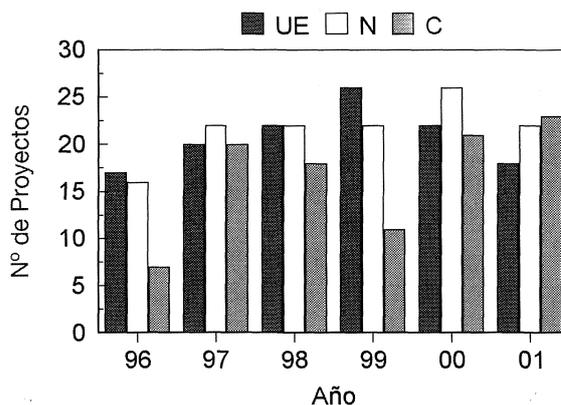
**Figura 3.** Distribución de contratos de investigación, metalúrgicos en general y siderúrgicos en particular, en el período 1996-2001.

Figure 3. Distribution of research contracts, metallurgy in general and iron and steel in particular, in the period 1996-2001.



**Figura 2.** Distribución de proyectos nacionales, metalúrgicos en general y siderúrgicos en particular, en el período 1996-2001.

Figure 2. Distribution of national projects, metallurgy in general and iron and steel in particular, in the period 1996-2001.



**Figura 4.** Evolución de proyectos y contratos de investigación siderúrgicos durante el período 1996-2001.

Figure 4. Evolution of iron and steel research projects and contracts in the period 1996-2001.

más de señalar la decidida vocación europea del CENIM, facilita que nuestros investigadores alcancen y mantengan un alto nivel científico por el intercambio de conocimientos con investigadores pertenecientes a otras Instituciones Europeas.

Del mismo modo, aunque en menor porcentaje, la investigación siderúrgica con fondos públicos nacionales alcanza un porcentaje próximo al 50 % (Fig. 2), e igualmente puede decirse de los contratos con la industria siderúrgica (Fig. 3). Tradicionalmente el CENIM ha venido colaborando estrecha y directamente con las empresas, prestándoles un apoyo técnico que ha sido beneficioso para am-

bos. La resolución de aquellos problemas científicos y técnicos que nuestra industria demanda y que el CENIM acomete con eficacia bajo la fórmula de contratos de investigación, representa también una parte importante de nuestra actividad investigadora y sobre todo el mejor modo de mantener nuestro tradicional contacto y apoyo al sector industrial. Todo ello nos permite establecer una permanente relación con la industria, conociendo de cerca los problemas tecnológicos que a la industria se le presentan en sus procesos de fabricación o bien en la puesta en servicio de los materiales metálicos y sus productos.

Por otra parte, es importante resaltar que la investigación siderúrgica, cuantificada a través de los proyectos y contratos de investigación, ha aumentado en los últimos años como se muestra en la figura 4, que ilustra en forma de diagrama de barras la evolución correspondiente al período 1996-2001.

En el año 2001 se encontraban en curso de realización 23 proyectos de investigación subvencionados por la Unión Europea, de los cuales 17 (74 %) correspondían al Programa CECA. Cada proyecto tiene un período de ejecución de aproximadamente tres años y los temas de investigación tratados se incluyen en las líneas expuestas anteriormente. Por razones de espacio, el presente artículo no representa el marco más apropiado para publicar los resúmenes de aquellos proyectos CECA, que por la propia naturaleza del programa estarían, obviamente, relacionados con la investigación siderúrgica. Nuestro objetivo es presentar una síntesis que muestre nuestra actividad investigadora en el campo de los aceros, lo que implica necesariamente autolimitarse en la extensión del mismo. Sin embargo, consideramos conveniente exponer una relación de los títulos de aquellos proyectos relacionados directamente con el acero, tanto en el marco del programa CECA como en otros programas europeos, que por si mismos expresan con suficiente claridad el tema de investigación en curso de realización:

1. *Eco-efficient technology for recovering acids and metals from rinse water in stainless steel pickling*; ECSC 7210-PR-301; Socios/Partners: APS (F), BFI (D), CENIM (E), KTN (D).
2. *Efficient utilisation of raw materials used in secondary metallurgy as flux in steelmaking furnaces*; ECSC 7210-PR-203; Socios/Partners: CENIM (E), FEHS (D), FQZ (D), RIVA (I), THYSSEN KRUPP (D).
3. *Sustainable agriculture using blast furnace and steel slag as liming agents*; CECA/ECSC 7210-PR-267; Socios/Partners: BFL (A), CENIM (E), FEHS (D), THD-KAMPERHOF (D), TKS (D).
4. *Above burden & in burden probe data interpretation by neural network based model to improve blast furnace control*; CECA/ECSC 7210-PR073; Socios/Partners: ACERALIA (E), CENIM (E), CSM (I), DILLINGER (D), RAUTARUUKKI (FIN).
5. *Neuro-fuzzy system to improve the control of EAF*; CECA/ECSC 7210-PR131; Socios/

Partners: ACERALIA (E), BFI (D), CENIM (E), CSM (I), MEFOS (S).

6. *Optimisation of sinter plant operating conditions and BF burden material resources using advanced multivariate statistics*; CECA/ECSC: 7210-PR194; Socios/Partners: ABO AKAD (FIN), CENIM (E), CORUS (UK), CSM (I), EKO STAHL (D).
7. *Reduction in dust and gaseous emission from sinter strand*; CECA/ECSC 7210-AA/942; Socios/Partners: ACERALIA (E), CENIM (E), CORUS (UK), ISQ (P).
8. *Influence of sinter mix materials on the environmental impact of high productivity iron ore sintering*; CECA/ECSC 7210-PR/127; Socios/Partners: ACERALIA (E), BFI (D), CENIM (E), CORUS (UK).
9. *Aspects on recrystallisation-precipitation interaction in microalloyed steels*; CECA/ECSC 7210-PR/158; Socios/Partners: ASCOMETAL CRÉAS (F), CENIM (E), SIDENOR (E), THYSSEN-KRUPP (D), UNIVERSITY OF PISA (I).
10. *Grain refinement by intragranular ferrite nucleation on precipitates in microalloyed steels*; CECA/ECSC 7210-PR/158; Socios/Partners: CENIM (E), DILLINGER (D), RIVA (I), SIMR (S), UNIVERSITY OF PISA (I), USINOR (F).
11. *Light weight FeAl intermetallic alloy for high efficiency components in transportation and power generation industries*; GROWTH/ 9910221; Socios/Partners: AEROSPATIAL (F), AIRMINES (F), ANSALDO (I), CENIM (E), CEREM (F), EUROCOPTER (D), FIAT (I), ONERA (F), PLANSEE (D), UMETZ (F), UNIVERSITY OF NANCY (F).
12. *High performance protection with sol-gel coatings on metals and enamels*; BRPR-CT98-0725; Socios/Partners: ABB FLEXIBLE AUTOMATIQUE (F), CENIM (E), FERRO (F), HOOGOVENS (NL), INSTITUT FÜR NEUE MATERIALIEN (D), INSTITUTO CERÁMICA Y VIDRIO (E), MIELE (D).
13. *Improvement of weld properties of high nitrogen alloyed stainless steels*; CECA/ECSC 7210-PD177; Socios/Partners: ACERINOX (E), AVESTA SHEFFIELD AB (S), CENIM (E), IRSID (F), SIMR (S), USINOR INDUSTRIAL (F).
14. *Environmentally friendly coated tinplate for food cans*; CECA/ECSC 7210-PR-193; Socios/Partners: ACERALIA (E), CENIM (E), CSM (I), IATA (E), INETI (P).

15. *Soluble salt contamination on blast cleaned surfaces and the effect on the durability of subsequently applied paint systems*; CECA/ECSC 7210-PR-320; Socios/Partners: CENIM (E), CORUS (UK), MAX PLANCK INSTITUT (D), PROFILARBED (L).
16. *Development of alternative technologies for off-site applied intumescent coatings*; CECA/ECSC 7210-PR/191; Socios/Partners: CENIM (E), CETIM (F), CORUS (UK), PROFILARBED (L).
17. *Increased infrastructure reliability by developing a low cost and high performance stainless steel re-bars*; GROWTH-CT-2000-00339; Socios/Partners: CENIM (E), COGNE ACCIAI SPECIALI (I), FCC (E), FERRERI DI STABLO (CH), FIRE SAFETY DESIGN (S), IMMIG (UK), LNEC (P), MG (UK), POLITECNICO DI TORINO (I), SELMER ASA (NO), UNIBETON (F).
18. *High spatial resolution analysis of steel samples using laser ablation ICP-MS*; CECA/ECSC 7210-PA/PB/PC/PD/297; Socios/Partners: CENIM (E), OCAS (B), SIMR (S).

Igualmente en el año 2001, se encontraban en fase de ejecución 42 proyectos nacionales financiados fundamentalmente por el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. De ellos, 22 (52 %) están relacionados con el acero o con aleaciones base hierro, cuyos títulos se relacionan a continuación:

1. *Reutilización de óxidos metálicos procedentes del proceso PIBARE de tratamiento de aguas de decapado de acero inoxidable*; CICYT, MAT 99-1153-CE.
2. *Interpretación mediante modelos basados en redes neuronales de los datos de sondas superiores e internas del H.A. para mejorar el control del mismo*; CICYT, MAT1999-1336-CE.
3. *Sistemas neuronales difusos para mejorar el control del horno eléctrico de arco*; CICYT, MAT 2000-0323-CE.
4. *Mejora de la producción de la banda de sinter y de la regularidad del sinter producido controlando la producción y la propagación del frente de llama*; CICYT, MAT 98-1397-CE.
5. *Diseño y desarrollo de un horno, mediante sistemas neuro-fuzzy, de gran capacidad para altas temperaturas homólogas*; CICYT, FEDER, MAT, FD1997-1539
6. *Reciclado integral de los polvos de acería eléctrica*; CICYT, QUI99-1103.
7. *Influencia de los materiales de la mezcla de sinterización de minerales de hierro de alta productividad sobre el impacto ambiental*; MCYT-DGI, MAT PPQ2000-1774-CE.
8. *Degradación biológica de contaminantes orgánicos presentes en aguas de desengrasado de acero*; CICYT, MAT 98-1345.
9. *Estudio de las diferencias en las transformaciones en calentamiento continuo de aceros ferrítico-perlíticos de bajo y medio carbono con vistas a la modelización del proceso de austenización*; CAM, 07N-0065-98.
10. *Modelización de los cambios microestructurales y posterior transformación en la forja en caliente de aceros al C y microaleados*; CICYT, PETRI, PTR1995-0436-OP.
11. *Aleación intermetálica ligera de FeAl para componentes de rendimiento elevado en las industrias del transporte y de generación de energía*; MCYT-DGI, MAT 00-1885-CE.
12. *Efecto de las condiciones de laminación y tratamiento térmico en la textura de aceros*; CICYT, FEDER, MAT 2FD97-0682.
13. *Materiales compuestos de matriz acero rápido reforzado con carburos*; CICYT, MAT 2000-0439-C02-02.
14. *Sistemas de unión para chapas recubiertas y pre-pintadas: uniones soldadas, mecánicas y por adhesivos*; CICYT, MAT 98-0970-C02-01.
15. *Degradación "in vitro" e "in vivo" de biomateriales metálicos convencionales y modificados y su efecto sobre la biocompatibilidad y la toxicidad tisular*; CICYT, MAT 2000-1331.
16. *Aplicación de recubrimientos vítreos para la biocompatibilidad del acero inoxidable AISI 316 y la aleación Ti6Al4V*; MCYT-DGI, MAT 00-0952-C02-02.
17. *Influencia del proceso de fabricación y condiciones de uso sobre las características de dilatación térmica de tubos de aceros refractarios de alta aleación al Ni-Cr, fabricados por fundición centrifuga, para aplicación en la industria*; MCYT, MAT00-0412-P4-02.
18. *Ensayos de demostración industrial para mejorar el control de fluoruros en el proceso Waelz*; MCYT, PRT1995-0543-OP.
19. *Nuevos aceros bainíticos de altas propiedades de resistencia y tenacidad*; MCYT, MAT01-1617.
20. *Interacción recristalización-precipitación en aceros microaleados*; MCYT, MAT00-3131-CE.
21. *Aumento de la reproducibilidad industrial mediante el desarrollo de refuerzos de acero inoxidable de bajo coste y altas prestaciones*; MCYT, MAT00-3111-CE

22. Desarrollo de tecnologías alternativas para la aplicación de recubrimientos intumescentes; MICYT, MAT00-3231-CE

Como se ha mencionado anteriormente, el CENIM mantiene una estrecha colaboración con la industria metalúrgica a través de la ejecución de "Contratos de Investigación". En el año 2001 se realizaron 37 contratos con la industria metalúrgica de los que 23 (62 %) estaban relacionados con el acero:

1. Nueva aproximación para la determinación de la zona cohesiva en el horno; Empresa/Company: ACERALIA. Corporación Siderúrgica Integral.
2. Optimización de la eficiencia energética de hornos de recalentamiento mediante metodologías de simulación de lógica difusa; Empresa/Company: Esteban Orbezo, S.A.
3. Hornos simulados avanzados para la homogeneización de altas temperaturas internas en materiales metálicos; Empresa/Company: Hormesa
4. Sistema de información, supervisión y control de procesos; Empresa/Company: SEAC S.A.
5. Propiedades mecánicas, de composición química y geométricas, en productos de acero para hormigón; Empresa/Company: FOMENTO DE CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.
6. Propiedades mecánicas, de composición química y geométricas, en productos de acero para hormigón; Empresa/ Company: PREFABRICADOS DELTA, S.A.
7. Estudio de las posibles causas de rotura en botellas de acero sin soldadura para oxígeno; Empresa/ Company: PRAXAIR PRODUCCIÓN ESPAÑA, S.L.
8. Desarrollo de nuevos productos de alambro con aceros de ultraalto carbono y sus procesos termomecánicos de producción; Empresa/ Company: INASMET
9. Desarrollo de nuevos productos de alambro con aceros de ultraalto carbono y sus procesos termomecánicos de producción (2ª Parte); Empresa/Company: INASMET
10. Estudio de I+D para la vigilancia de la corrosividad de la atmósfera interna del cajón de la C.N. Vandellós 1; Empresa/Company: ENRESA
11. Soldadura de aceros especiales utilizados en maquinaria para trenes de alta velocidad; Empresa/Company: TALGO
12. Soldadura de tuberías helicoidales de gran diáme-

tro para trasvases de agua; Empresa/Company: FOMENTO DE CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.

13. Estudio y homologación de procedimientos para soldadura de estructuras metálicas para grandes superficies; Empresa/Company: TALLERES CYM
14. Homologación de procedimiento de soldabilidad de aceros inoxidables para celdas y aparallaje de alta tensión; Empresa/Company: INAEL
15. Soldabilidad de componentes soldados de alta seguridad para elevadores; Empresa/Company: METALÚRGICA MARTÍNEZ
16. Soldabilidad e inspección de uniones soldadas para estructuras metálicas; Empresa/Company: H. BERMEJO
17. Soldadura de estructuras metálicas de acero al carbono con procesos manuales y semiautomáticos; Empresa/Company: API
18. Homologación de procedimientos para fabricación por soldadura de tuberías de gran diámetro para trasvases de agua; Empresa/Company: TUBO FABREGA
19. Estudio de la soldabilidad de transformadores y torretas para distribución de energía eléctrica; Empresa/Company: FAMMSA
20. Influencia del cobre y el molibdeno en la resistencia a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos; Empresa/Company: ACERINOX, SA
21. Determinación de las causas del proceso de corrosión aparecido en las barras de dirección del automóvil; Empresa/Company: TRW, automotive S.A.
22. Aplicación de la técnica de la espectroscopia de impedancia EIS al estudio de la influencia de las características superficiales de chapas de hojalata en la adhesión con lacas; Empresa/Company: INASMET, S.A.
23. Evaluación de adsorbentes y desecantes en base sepiolita como agentes inhibidores de corrosión de componentes metálicos en atmósferas cerradas; Empresa/Company: TOLSA

El balance final sobre las actividades principales de investigación, realizadas en el marco de los proyectos europeos, nacionales y contratos con la industria, indica que la investigación relacionada con el acero representa el 62 % de toda la actividad investigadora. Esta cifra sintoniza plenamente con la demanda tecnológica de la sociedad actual donde el acero ocupa el primer lugar entre los materiales metálicos utilizados en la construcción de estructuras y equipos, especialmente en la industria de la automoción.

Además de los proyectos y contratos de investigación, el CENIM realiza una importante asistencia técnica para la industria en la forma conocida de "Ordenes de Trabajo" (OT). Es una actividad también importante mediante la cual el CENIM, como centro científico-tecnológico, trata de resolver aquellos problemas puntuales que la industria metalúrgica plantea frecuentemente. La diferencia con los contratos de investigación radica fundamentalmente en el volumen de trabajo que representan. Mientras en los primeros, la investigación es suficientemente amplia y exige la formalización de un contrato, las OT son trabajos tecnológicos de carácter más específico y de menor volumen, y no exigen la formalización de un contrato.

### 3. DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Una parte de la producción científica es publicada en revistas y congresos nacionales e internacionales<sup>[1 y 2]</sup>. Debido a que la evaluación de la actividad científica del personal investigador dependiente de la Administración Pública en la última década, por la Comisión Nacional de Evaluadora, valora preferentemente las publicaciones científicas frente a otros méritos, el medio más utilizado para la divulgación de los resultados son las revistas internacionales de reconocido prestigio e incluidas en el Science Citation Index (SCI), especialmente aquellas de alto factor de impacto.

Sin embargo, a pesar de que la investigación siderúrgica en el CENIM alcanza un volumen importante, la divulgación de sus resultados no guarda la misma proporción. Esto es debido, fundamentalmente, al obligado carácter confidencial de los proyectos financiados por la Comunidad Europea y también de los contratos de investigación con la industria.

La tabla II ilustra la evolución del número de publicaciones realizadas por el Personal Científico del CENIM en los últimos 10 años. Las publicaciones en revistas no incluidas en el SCI han ido dis-

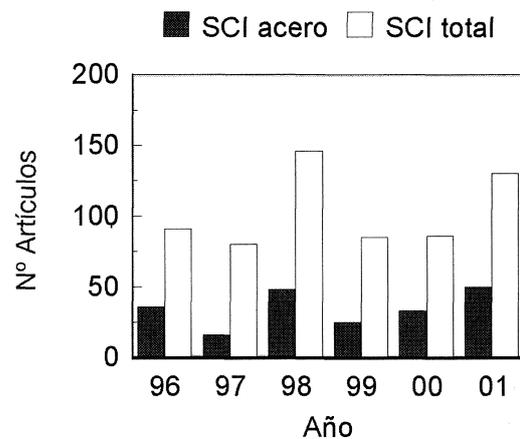


Figura 5. Distribución de las publicaciones realizadas en el SCI, totales y sobre acero, en el período 1996-2001.

Figure 5. Distribution of papers published in SCI journals, totals and on iron and steel, in the period 1996-2001.

Tabla II. Trabajos publicados en revistas, presentados a congresos y Tesis Doctorales leídas, correspondientes al período 1992-2001

Table II. Papers published in journals, presented to congresses and Doctoral Theses corresponding to the period 1992-2001

Artículos/Congresos/ Tesis Doctorales	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01
Revistas del SCI	33	47	53	57	91	80	146*	85	86	130
Rev. internacionales no incluidas en SCI	6	13	3	6	6	11	9	9	12	13
Rev. nacionales no incluidas en SCI	20	15	24	20	12	12	4	7	4	4
Congresos internacionales	77	36	52	44	37	52	58	61	56	53
Congresos nacionales	25	20	17	15	26	8	65	29	34	15
Tesis Doctorales	4	2	7	11	4	6	6	6	2	6

\* 42 ponencias presentadas al 8º Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Metalúrgicas (mayo 1998), fueron publicadas en la Rev. Metal. Madrid, en el Nº especial de mayo de 1998 / 42 papers presented at the 8th National Metallurgical Science and Technology Congress (May 1998) were published in the May 1998 special issue of Rev. Metal. Madrid.

minuyendo en favor de las que están incluidas. Después de un notable incremento en el período 1992-1996, se observa una estabilización en torno a las 90 publicaciones en SCI/año. La presentación de trabajos en congresos internacionales y nacionales ha aumentado considerablemente, como se desprende de los datos contemplados en la tabla II.

Debido a las razones señaladas anteriormente, la proporción de artículos referidos al acero disminuye considerablemente respecto del total publicados en el período 1996-2001 (Fig. 5). Los artículos de carácter siderúrgico son publicados tanto en revistas de materiales como en revistas especializadas del acero.

Por último, en la tabla III se muestra la relación de Revistas Internacionales del SCI donde el personal científico del CENIM publicó en el año 2001, el nú-

**Tabla III.** Revistas del SCI en las que se ha publicado durante el año 2001

*Table III.* SCI journals where papers have been published during 2001

Revista	Factor de Impacto	Nº. Artículos	Nº. Artículos Acero	Nº. Orden, Campo, Nº. Revistas
Acta Mater.	2.166	1		1, Metallurgy, 65
Adv. Eng. Mater.	0.333	2		11, Mater. Sci., Multidis., 166
Adv. Powder Technol.	0.442	1		115, Mater. Sci., Multidis., 166
Aerosol Sci. Tech.	1.049	1		60, Engineering, Chemical, 117
AIChE J.	1.645	1		6, Engineering, Mechanical, 102
Biomaterials	1.796	1		6, Engineering, Chemical, 117
Brit. Corros. J.	0.320	2	2	2, Mater. Sci., Biomat, 10
				31 Metallurgy 65
				116, Mater. Sci., Multidis., 66
Chem. Eng. J.	0.677	1		33, Engineering, Chemical, 117
Chem. Eng. Sci.	1.053	1		16, Engineering, Chemical, 117
Corros. Sci.	0.881	5	2	9, Metallurgy, 65
				45, Mater. Sci., Multidis., 166
Corrosion	0.695	3	3	15, Metallurgy, 65
				65, Mater. Sci., Multidis., 166
FEMS Microbiol. Lett.	1.615	1		39, Microbiology, 80
Filtr. Separat.	0.088	1		104, Engineering, Chemical, 117
Hydrometallurgy	0.846	3		10, Metallurgy, 65
Intermetallics	1.374	3		5, Metallurgy, 65
				22, Mater. Sci., Multidis., 166
ISIJ Int.	0.672	4	4	16, Metallurgy, 65
J. Aerosol Sci.	2.071	3		2, Engineering, Chemical, 117
				11, Environmental Sciences, 126
J. Air Waste Manage.	1.007	1		55, Environmental Sciences, 126
J. Alloy Compd.	0.845	1		11, Metallurgy, 65
				48, Mater. Sci., Multidis., 166
				64, Chemistry, Physical, 91
J. Biomed.Mater. Res.	1.900	1		1, Mater. Sci., Biomaterials, 10
J. Chem. Eng. Jpn.	0.633	2		36, Engineering, Chemical, 117
J. Chem. Res-S	0.522	2		71, Chemistry, Multidis., 18
J. Chem. Technol. Biot.	0.883	2		72, Biotech. & Appl. Microbiology, 133
				49, Chemistry, Multidis., 118
J. Coating Technol.	0.519	1	1	10, Mater. Sci., Coat. & Films, 16
J. Electrochem. Soc.	2.293	4		2, Electrochemistry, 16
J. Electron Spectrosc.	0.875	1	1	27, Spectroscopy, 37
J. Lumin.	1.101	1		18, Optics, 57
J. Mater. Sci.	0.701	2	1	63, Mater. Sci., Multidis., 166
J. Mater. Sci. Lett.	0.496	2	1	97, Mater. Sci., Multidis., 166
J. Mater. Sci.-Mater. M	0.621	2		6, Mater. Sci., Biomaterials, 10
J. Membrane Sci.	1.587	1		7, Engineering, Chemical, 117
J. Non-Cryst. Solids	1.269	1		2, Mater. Sci., Ceramics, 25
J. Phys. A-Math. Gen.	1.365	1		7, Physics, Mathematical, 29
Mater. Corros.	0.569	6	2	18, Metallurgy, 65
				82, Mater. Sci., Multidis., 166
Mater. Charact.	0.413	1	1	8, Mater. Sci., Charact. & Test., 21
Mat. Sci. Eng. A	0.897	7	4	43, Mater. Sci., Multidis., 166
Mater. Sci. Forum	0.597	3	1	78, Mater. Sci., Multidis., 166
Mater. Sci. Tech.	0.562	6	6	19, Metallurgy, 65
				83, Mater. Sci., Multidis., 166
Metall. Mater. Trans. A	1.361	4	3	6, Metallurgy, 65
				23, Mater. Sci., Multidis., 166
Metallurgist	0.055	1	1	63, Metallurgy, 65
Miner. Eng.	0.517	1		53, Engineering, Chemical, 117
Opt. Mater.	1.165	1		33, Mater. Sci., Multidis., 166
Oxid. Met.	1.798	3		2, Metallurgy, 65
Plat. Surf. Finish.	0.189	1		14, Mater. Sci., Coat. Films, 16
Prog.Org. Coat.	0.612	1		9, Mater. Sci., Coat. & Films, 16
Rev. Metal. Madrid	0.190	22	10	45, Metallurgy, 65
Scripta Mater.	0.923	7	5	7, Metallurgy, 65
				41, Mater. Sci., Multidis., 166
Steel Res.	0.320	1	1	31, Metallurgy, 65
Surf. Coat. Tech.	1.002	1		5, Mater. Sci., Coat. & Films, 16
Surf. Sci.	2.198	1		23, Chemistry, Physical, 91
Waste Manage. Res.	0.466	1		18, Engineering, Environmental, 36
Wear	0.698	2	1	64, Mater. Sci., Multidis., 166
Z. Metallkd.	0.664	1		17, Metallurgy, 65

Factor de impacto medio / Mean Impact Factor =0,935 / 0.935

Factor de impacto medio ponderado / Weighted Mean Impact Factor =0,803 / 0.803

mero de artículos publicados en cada una, el factor de impacto de cada revista y el número de artículos referidos al acero. En resumen, 50 artículos sobre el acero fueron publicados en el año 2001, que representa el 38,5 % del total de artículos publicados.

#### 4. FORMACIÓN

La formación de jóvenes investigadores y técnicos es un cometido importante en la labor que realizan los distintos grupos de investigación existentes en el Centro, formación que año tras año adquieren muchos licenciados, becarios predoctorales y doctores que desean ampliar su formación aprendiendo distintas técnicas o formándose como investigadores. En la línea inferior de la tabla II puede contemplarse como ha sido la evolución de las tesis doctorales realizadas en el CENIM correspondiente al período 1991-2001.

#### 5. FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN SIDERÚRGICA

El día 26 de junio de 2002 tuvo lugar en Luxemburgo el acto oficial de clausura del Programa de investigación científica y técnica de la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA). Después de 50 años de incentivar y potenciar la investigación siderúrgica en Europa, CECA desaparece habiendo cumplido satisfactoriamente, en opinión de todos los países europeos, con la misión y objetivos que se habían trazado: aumentar la competitividad de la industria siderúrgica europea a través de la fabricación de mejores aceros, de la reducción de costes y de la reducción del impacto medioambiental. La importancia estratégica del acero en los años 50 motivó a los seis países fundadores de la CECA (Francia, Alemania, Italia, Holanda, Bélgica y Luxemburgo) a crear dicho programa como una necesidad prioritaria en el contexto industrial de la nueva Europa. La labor impulsora de personajes ilustres como Jean Monet y Robert Shumann ha sido ampliamente reconocida. El Programa CECA de investigación ayudó y facilitó la reestructuración industrial de los países europeos en la década de los 80. Hoy la industria siderúrgica europea es reconocida como la más moderna y competitiva del mundo, con una producción anual de aproximadamente 270 millones de toneladas.

Como ejemplo de lo que ha representado CECA, cabe citar que el primer proyecto financiado

por este programa fue sobre el horno alto y el objetivo era el empleo de carbón pulverizado como agente reductor. Su aplicación industrial ha ahorrado más dinero que toda la inversión hecha en el programa de investigación durante los 50 años de su existencia. Otro logro importante ha sido el aumento de la colada continua sin perder calidad. Se han producido avances en la galvanización, en la degradación del medio ambiente (destrucción de dioxinas, depuración de humos.....). Se han obtenido muchas mejoras en la fabricación de productos largos y planos, en el desarrollo de nuevos aceros (alta resistencia) para la industria de la automoción, para la fabricación de tubos, etc. Actualmente en Europa se fabrican más de 4.000 clases de aceros. El desarrollo del sinter fue muy importante para reducir la emisión de los gases de combustión. El CO<sub>2</sub> pasó de 2.996 Kg/t en 1950 a 1.553 Kg/t en el año 2000. La utilización de coque pasó de 927 Kg/t a 366 Kg/t en el mismo período.

El presupuesto CECA para investigación aumentó continuamente desde su fundación, estabilizándose desde 1995 en aproximadamente 55 millones de euros. La inversión realizada ha sido indiscutiblemente rentable, ya que por cada euro invertido en la investigación de CECA han retornado 12 euros a la industria europea.

Todos los países europeos están de acuerdo en que CECA se ha traducido en un verdadero éxito, no sólo político sino económico. ¿Por qué, entonces, no continúa?, o bien ¿por qué no es renovado, con las oportunas modificaciones? La razón principal es la integración de toda la Investigación Científica y Técnica Europea en los sucesivos Programas Marcos, y en particular será el VI-PM donde tendrán cabida los futuros proyectos sobre el acero, especialmente aquellos que tengan que ver con el medio ambiente y las nanotecnologías. Por otra parte, hoy el acero no es un material estratégico como lo fue para la defensa y para las economías nacionales de los años 50.

Después de lo dicho cabría preguntarse, conectando con el título de este apartado, ¿qué futuro tiene la investigación siderúrgica en Europa y como puede afectar al CENIM?.

Aunque la CECA dejó de existir exactamente el 23 de Julio de 2002, los fondos que aún mantiene, de aproximadamente 1.600.000 €, seguirán apoyando proyectos específicos. Por otra parte, y como ya ha sido mencionado, el VI-PM financiará la investigación siderúrgica en los próximos años, aunque la fórmula anunciada para tramitar las solicitudes seguirán métodos distintos a los utilizados

en CECA, potenciando la formación de nuevos grupos de investigadores, denominados "Grupos de Excelencia", que asumirán la investigación casi exclusiva de temas priorizados.

Otra fuente de financiación futura para la investigación siderúrgica en el CENIM serán obviamente los Planes Nacionales de Investigación en los que la investigación del acero está contemplada e incluida en el Área de los Materiales, sin olvidar la financiación procedente de la industria a través de los contratos de investigación y de la asistencia técnica.

El acero tiene un futuro prometedor. No sólo es un material resistente, abundante en la naturaleza, económico, insustituible en la mayor parte de las construcciones, sino que representa además un material apropiado para la seguridad y el bienestar de los ciudadanos. La industria del acero es hoy líder en competitividad y en oferta renovable.

El mejor cliente de la industria siderúrgica sigue siendo el sector automovilístico. Hoy tenemos aceros más ligeros que mantienen una alta seguridad de los pasajeros en el automóvil. Estas y otras características han permitido enunciar la conocida fórmula:

Acero=Seguridad+Material Económico+Belleza

Una de las líneas prioritarias de la investigación siderúrgica en Europa para los próximos años será la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, debido a su impacto medioambiental.

Por último, otros dos aspectos, uno de carácter general y otro específico, permiten suponer que la investigación siderúrgica será potenciada en el futuro. De una parte, la Unión Europea pretende alcanzar en los próximos años una inversión en in-

vestigación del 3 % de su Producto Interior Bruto, objetivo que fue planteado en la Conferencia de Barcelona, bajo la Presidencia Española. Actualmente se encuentra en el 1,9 %. En segundo lugar, varios países de la Unión Europea se están planteando la necesidad de continuar con programas específicos de investigación sobre el acero y en este sentido Alemania ya ha anunciado la disponibilidad de varios millones de euros.

Finalmente, la investigación realizada por el CENIM en el ámbito de la CECA, ha tenido un merecido reconocimiento por parte de la Unión Europea, estando clasificado como Centro de Excelencia en la Red Europea de la Investigación Siderúrgica elaborada por EUROFER.

### Nota final

Esperamos que este trabajo constituya una semblanza, aunque concisa, de la investigación siderúrgica en el CENIM, al mismo tiempo que un reconocimiento a los investigadores y técnicos que han trabajado y continúan trabajando en ciencia y tecnología siderúrgicas. Somos conscientes de que la intención de lograr dicho objetivo final es siempre difícil, ya que es imposible resumir en unas pocas páginas las diversas actividades investigadoras que el CENIM viene realizando en torno al material "acero".

### REFERENCIAS

- [1] *Memorias del CENIM 1991-2001.*
- [2] *Networking in European Steel Research*, Eurofer, Bruselas, 2002.
- [3] E.J. ALGUACIL, M. CARSI Y O.A. RUANO, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 38-44.