



SEGURIDAD NUCLEAR

ENTREVISTA : EDUARDO GALLEGO,
Catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid

SUMARIO

EDITORIAL

Garantía de suministro. **4**

PRESENTACIÓN

ENTREVISTA

Eduardo GALLEGO DÍAZ. Catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid. 9

SEGURIDAD NUCLEAR

Incremento de márgenes en los análisis deterministas de accidentes mediante el empleo de métodos estadísticos. **Gonzalo Hernández y Marisol Corisco 14**

Aplicaciones de los APS gestionados por Iberdrola.

Carlos López Fernández-Quevedo, Marta Benito Roberti,

Francisco Osorio de Rebellón Villar y Aránzazu Rísquez Bailón 18

Licenciamiento, criterios de seguridad y protección radiológica del ATI de C.N. Almaraz.

Pascual Cámara Ranera y José Luis Cormenzana López 22

A delineation of activities in the CSNI Working Group on the Analysis and Management of Accidents (WGAMA). **Luis E. Herranz, Didier Jacquemain, T. Nitheanandan & Nils Sandberg 26**

Adaptación de la metodología MORT de análisis de causa raíz a las centrales nucleares españolas. **Violeta Solano Udina y Rodolfo Isasia González 31**

Formación de expertos en seguridad de las centrales nucleares: experiencia personal.

Agustín Alonso Santo 35

Concepto de la defensa en profundidad y ejemplo específico de aplicación en las centrales nucleares españolas. **Manel Campoy, Rodrigo Cuesta y Miguel Barreiro 38**

Proyectos INSC de la Comisión Europea. **Rafael J. Caro 42**

ARTÍCULO DIVULGATIVO

Energía nuclear, la otra cara de la moneda. **Mª Teresa Torres de la Peña. 46**

MEJORES PONENCIAS DE LA 44ª REUNIÓN ANUAL

SEGURIDAD NUCLEAR: LBLOCA Simulation in an AP1000®-PCS 3D Model with the GOTHIC Code. Samanta Estévez-Albuja, Gonzalo Jiménez, Kevin Fernández-Cosials y César Queral 51

MATERIALES: Ingeniería inversa y caracterización avanzada de materiales para el establecimiento de requisitos de aceptación en procesos singulares de dedicación. 55

Álvaro Rodríguez Prieto

TERMINOLOGÍA 30

SECCIONES FIJAS 67

SOCIOS COLECTIVOS DE LA SNE

AHLBERG CAMERAS AB
ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD
AMARA, S.A.
APPLUS NORCONTROL, S.L.U.
ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ - VANDELLÓS II
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ - TRILLO AIE
CEGELEC, S.A.
CIC CONSULTING INFORMÁTICO DE CANTABRIA S.L.
CIEMAT
COAPSA CONTROL, S.L.
COLEGIO DE INGENIEROS DEL ICAI
CUADROS ELECTRICOS NAZARENS, S.L.
EDP ESPAÑA, S.A.U.
ELECOR, S.A.U.
EMPRESARIOS AGRUPADOS
ENDESA GENERACION, S.A.
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A.
ENWESA OPERACIONES
EPRI
EQUIPOS NUCLEARES, S.A.
EULEN, S.A.
EXPRESS TRUCK S.A.U.
FRAMATOME
GAMESA ELECTRIC S.A.U.
GD ENERGY SERVICES, S.A.U.
GE - HITACHI NUCLEAR ENERGY INTERNACIONAL
GEOCISA
HELGESON SCIENTIFIC SERVICE
IBERDROLA GENERACION NUCLEAR S.A.U.
IBERDROLA INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.
IDOM CONSULTING, ENGINEERING AND ARCHITECTURE, S.A.U.
INGECID, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROYECTOS, S.L.
MANSEVA, S.L.
MANTENIMIENTOS, AYUDA A LA EXPLOTACION Y SERVICIOS, S.A.
MARSEIN, S.A.
MEDIDAS AMBIENTALES S.L.
MOMPRESA
MONCOBRA
NATURGY ENGINEERING, S.L.U.
NATURGY GENERACION S.L.U.
NUCLENOR, S.A.
NUCLEONOVA S.L.
ORANO CYCLE
ORANO TN
PROINSA
PROSEGUR
PRYSMIAN SPAIN, S.A.
RINGO VÁLVULAS S.L.
SGS TECNOS, S.A.U.
SIEMSA INDUSTRIA, S.A.
TECNALIA
TECNASA
TECNATOM, S.A.
TÜV SÜD ATISAE SAU
VECTOR & WELLHEADS ENGINEERING, S.L.
WESTINGHOUSE ELECTRIC SPAIN
WESTINGHOUSE TECHNOLOGY SERVICES, S.A.

Edita  SENDIA EDITORIAL, S.A.

Directora: Matilde PELEGRÍ

Consejo de Redacción: Comisión de Publicaciones de la SNE - Traducciones Inglés: IPT Translations

Diseño y Maqueta: José RIBERA y Clara TRIGO - Administración y suscripciones: Lola PATIÑO

C/ Poeta Joan Maragall, 56. 7º D. 28020 MADRID - Tel: (34) 91 373 47 50 • email: nuclear@gruposenda.es
Suscripción: España: 113€ + IVA - Europa: 221€ Otros: 226€

Depósito legal: M-22.829/1982 - ISSN: 1137-2885

Esta publicación está asociada a la AEPP (que a su vez es miembro de CEOE, CEPYME, EMMA y FIPP) y a CEDRO



La SNE permite la reproducción en otros medios de los resúmenes de los artículos publicados en NUCLEAR ESPAÑA, siempre que se cite al principio del texto del resumen reproducido su procedencia y se adjunte un enlace a la portada del sitio web www.sne.es, así como también el nombre del autor y la fecha de publicación. Queda prohibida cualquier reproducción o copia, distribución o publicación, de cualquier clase del contenido de la información publicada en la revista sin autorización previa y por escrito de la SNE.

La reproducción, copia, distribución, transformación, puesta a disposición del público, y cualquier otra actividad que se pueda realizar con la información contenida en la revista, así como con su diseño y la selección y forma de presentación de los materiales incluidos en la misma cualquiera que fuera su finalidad y el medio utilizado para ello, sin la autorización expresa de la SNE quedan prohibidos.

NUCLEAR ESPAÑA no se hace responsable de las opiniones expresadas por los autores.

INGENIERÍA INVERSA Y CARACTERIZACIÓN AVANZADA DE MATERIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE REQUISITOS DE ACEPTACIÓN EN PROCESOS SINGULARES DE DEDICACIÓN

Se define *dedicación* como un proceso mediante el cual se certifica y acepta que un elemento de grado comercial sea válido para su utilización en aplicaciones relacionadas con la seguridad en centrales nucleares. Mientras los criterios de aceptación de esos componentes habitualmente están bien establecidos, existen algunos componentes de equipos que por sus singulares características no se acogen a un proceso de fabricación normalizado. Para dar solución a este problema, se ha desarrollado una metodología basada en procesos de ingeniería inversa y caracterización avanzada de materiales para el establecimiento de requisitos tecnológicos de componentes de nueva adquisición que, en la actualidad, no se fabrican bajo un programa de garantía de calidad nuclear.

INTRODUCCIÓN

Durante la concepción de cualquier proyecto que contenga la fabricación de algún elemento que deba proporcionar una función estructural, es de suma importancia tras la selección de materiales a emplear, realizar una adecuada selección de la normativa que contiene los requisitos tecnológicos que deben cumplir, con el objeto de asegurar que son adecuados para la finalidad inicialmente prevista [1-3].

La norma UNE 73401-95 [4], en sus apartados 5.4 "Control de documentos de compra", 5.7 "Control de equipos y servicios adquiridos" y 5.13 "Manipulación, almacenamiento y expedición", expone los criterios para la aplicación de un programa de garantía de calidad al sistema de gestión de elementos y servicios en centrales nucleares [5].

Se define *dedicación* como un proceso mediante el cual se certifica y acepta que un elemento de grado comercial sea válido para su utilización en aplicaciones relacionadas con la seguridad en centrales nucleares. Así, las características críticas de aceptación para dicho proceso corresponden con propiedades o atributos identificables y/o cuantificables pertenecientes a un componente de grado comercial y cuya verificación proporciona una certeza razonable de que el elemento adquirido es el especificado.

Mientras los criterios de aceptación de esos componentes grado comercial suelen estar bien establecidos por la normativa de fabricación y por los requerimientos del fabricante, existen una serie de componentes de equipos que por sus singulares carac-

terísticas no se acogen a un proceso de fabricación normalizado, o que simplemente en origen se suministraban bajo un programa de garantía de calidad nuclear y, hoy en día, el fabricante ya no dispone de ese programa nuclear y no proporciona suficiente información para definir completamente los criterios de aceptación de los materiales que van a ser adquiridos en la actualidad como reemplazo. Para dar solución a este problema, se ha desarrollado una metodología basada en procesos de ingeniería inversa y caracterización avanzada de materiales para el establecimiento de requisitos tecnológicos de componentes de nueva adquisición no fabricados bajo un programa de garantía de calidad nuclear.

METODOLOGÍA DE INGENIERÍA INVERSA Y TÉCNICAS AVANZADAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN PROCESOS DE DEDICACIÓN

Durante la fase de construcción de centrales nucleares, los equipos y sus componentes fueron diseñados usando técnicas clásicas de ingeniería de diseño. Los diseños utilizados fueron adaptaciones de equipos grado comercial, realizando modificaciones para asegurar el cumplimiento de los requisitos específicos de licencia y base de diseño, así como los requisitos reglamentarios [6].

Debido a la reducción en el número de plantas en fase de construcción y ante la perspectiva en un futuro próximo, muchos suministradores han discontinuado sus programas de garantía de calidad nuclear que certifi- can que un elemento puede ser empleado en equipos relacionados con



ÁLVARO RODRÍGUEZ PRIETO

Coordinador de Proyectos
(Área Nuclear)

SGS TECNOS

REVERSE ENGINEERING AND ADVANCED MATERIALS CHARACTERIZATION FOR ACCEPTANCE REQUIREMENTS DEFINITION IN SPECIAL COMMERCIAL-GRADE DEDICATION PROCESSES

Commercial-Grade Dedication is defined as a process by which it is certified and accepted that an element is valid for use in safety-related applications in nuclear power plants. While the acceptance criteria for these components are usually well established, there are some components of equipment that due to their unique characteristics are not designed and manufacture based on standardized guidelines. To address this issue, a methodology based on reverse engineering processes and advanced materials characterization has been developed for the establishment of technological requirements of recently acquired components that, nowadays, are not manufactured under a nuclear quality assurance program.

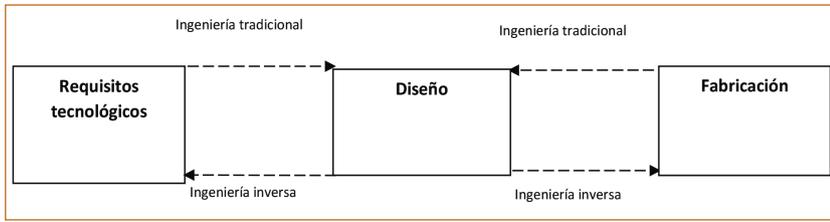


Figura 1. Secuencia de etapas principales en ingeniería inversa versus ingeniería tradicional.

la seguridad de la planta. Esto supone que en muchos casos los repuestos necesarios solamente pueden adquirirse como grado comercial.

Para resolver este problema, la industria nuclear, liderada por el organismo regulador norteamericano (*Nuclear Regulatory Commission, NRC*) ha desarrollado lo que se denomina *proceso de dedicación de componentes grado comercial*. En los procesos de dedicación de componentes grado comercial se lleva a cabo un proceso de evaluación técnica y un proceso de aceptación. En la evaluación técnica se definen las características críticas de diseño del elemento. Así mismo, se define un subgrupo de características conocidas como *características de aceptación* que permiten certificar un elemento como dedicado y, por tanto, equiparlo a un componente fabricado bajo un programa de garantía de calidad nuclear. En algunos casos, no se dispone de los criterios de aceptación necesarios para desarrollar el proceso de dedicación de un componente, ya que el fabricante no aporta datos de fabricación. En esos casos una solución es la aplicación de un proceso de ingeniería inversa para el establecimiento de requisitos de diseño y fabricación (Figura 1).

Ingeniería inversa aplicada a la gestión de repuestos en centrales nucleares

En la mayoría de proyectos de ingeniería inversa se dispone de algunos datos de diseño y/o fabricación. No obstante, hay una falta de datos de diseño que serían necesarios para reproducir la fabricación del componente original o para establecer criterios de validación de componentes nuevos fabricados. Por ejemplo, se suele disponer de algunas cotas dimensionales exteriores, pero no se dispone de información sobre dimensiones de internos, tolerancias o acabados superficiales suficientes que permitirían la reproducción del proceso de fabricación del componente. Otro caso típico, es la falta de datos de composición química, propiedades mecánicas o microestructura de los materiales empleados. La Figura 2 muestra la influencia de la disponibilidad de datos en función del riesgo y del coste asociado al proceso.

Las características de fabricación son obtenidas mediante la realización de ensayos de caracterización realizados sobre patrones que se encuentran en almacén y que no se han visto sometidos a una sustancial degradación por efecto del tiempo de almacenamiento (vida en estantería) o por obsolescencia. Para el

desarrollo de procesos de ingeniería inversa en la industria nuclear, en la práctica se emplean diversas técnicas avanzadas de caracterización de materiales que complementan, en la dedicación de componentes mecánicos, ensayos tradicionales como son el ensayo de tracción, el ensayo de dureza, el ensayo de impacto o los análisis químicos habituales.

Técnicas avanzadas de caracterización de materiales

En este apartado se presentan algunas de las técnicas avanzadas empleadas en los procesos de definición de requisitos como parte del proceso de ingeniería inversa. Estas técnicas son la espectroscopía infrarroja (a), la calorimetría diferencial de barrido (b), la termogravimetría (c) y la microscopía electrónica de barrido junto con la espectrometría de dispersión de rayos X (d). En cada apartado se hace una breve introducción a cada técnica junto con un ejemplo ilustrativo basado en un caso real de caracterización de materiales diseñados *ad hoc* para ser empleados en equipos relacionados con la seguridad.

A) Espectroscopía infrarroja de polímeros mediante el método de la transformada Fourier

La técnica de espectroscopía infrarroja mediante transformada de Fourier, se basa en el concepto de la absorción de radiación infrarroja por la muestra. La señal resultante en el detector es un espectro que representa de forma característica al polímero analizado. Se suele emplear en la caracterización de polímeros y, por tanto, permite obtener datos sobre el diseño de la pieza. En la Figura 3 se muestra la absorbancia frente a la longitud de onda en una muestra de

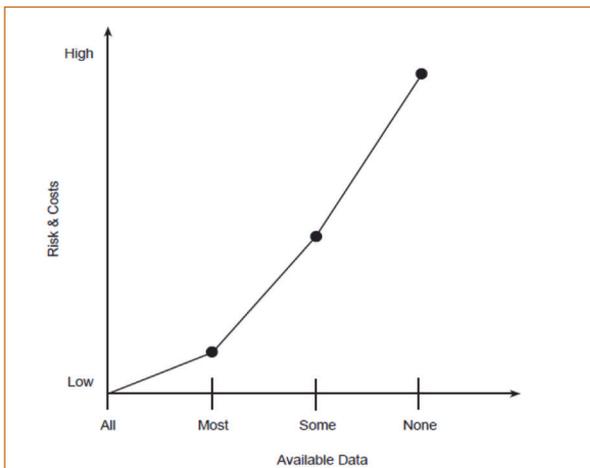


Figura 2. Influencia de la disponibilidad de datos sobre los riesgos y costes asociados a un proyecto de ingeniería inversa [6].

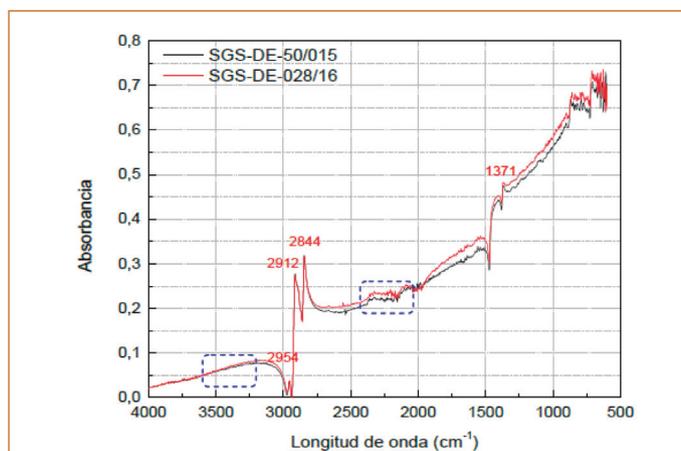


Figura 3. Determinación de absorbancia frente a longitud de onda en una muestra de EPDM mediante espectroscopía infrarroja mediante transformada de Fourier.

Polímero	Longitud de onda (cm ⁻¹)	Enlace
EPDM	722	-CH ₂ rocking vibrations
	1376	C-H bending vibrations of CH ₃ polypropilene unit
	1461	-CH ₂ scissoring vibrations
	1660	C=C stretching
	2856	Antisymmetric C-H stretching
	2926	Symmetric C-H stretching

Tabla 1. Enlaces característicos del EPDM en función de la longitud de onda en el ensayo de espectroscopía infrarroja mediante transformada de Fourier.

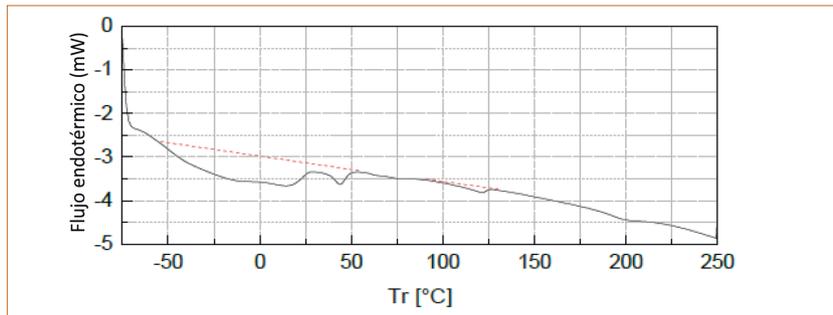


Figura 4. Ensayo de calorimetría diferencial de barrido en una muestra de EPDM.

EPDM empleado en la fabricación de un componente de un actuador de válvula motorizada relacionado con la seguridad.

Las bandas de absorción del espectro permiten identificar el EPDM por sus enlaces característicos situados a las longitudes de onda características, tal y como se puede observar a partir de la Tabla 1.

B) Calorimetría diferencia de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) permite determinar las transiciones térmicas de un polímero. Focalizando en el caso de estudio que se ha tomado para presentar la técnica de espectroscopía de emisión óptica, la conclusión de que se trata de EPDM se ve reforzada por los valores de temperatura de transición vítrea (T_g) obtenidos en el análisis por calorimetría diferencial de barrido.

La T_g del EPDM se encuentra en el intervalo de -40 a -60 °C [7-9], dependiendo de los aditivos y carga que contenga. En este caso particular, la T_g obtenida es de -49 y -51 °C, situándose, por tanto, en el rango correspondiente al polímero EPDM. Este hecho apoya las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos de espectroscopía infrarroja. La Figura 4 muestra el flujo endotérmico de la muestra en función de la temperatura.

C) Termogravimetría

La termogravimetría está basada en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando dic-

ha muestra se somete a una variación de temperatura en atmósfera controlada. Los cambios de masa identificados permiten determinar bajo qué condiciones los materiales se descomponen. Los resultados se expresan gráficamente a través de termogramas (Figura 5).

Volviendo al caso de estudio, el EPDM presenta una temperatura de degradación, en torno a 425 - 500 °C [10].

D) Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de rayos X (EDS)

La microscopía electrónica de barrido (Scanning Electronic Microscopy, SEM) es una de las técnicas más versátiles para el estudio de super-

ficies de distintos materiales gracias a la combinación de elevada resolución y gran profundidad de campo. Mediante este tipo de microscopios podemos observar distintos objetos de tamaños que van desde aproximadamente unos milímetros hasta unos cuantos nanómetros.

En un microscopio electrónico la formación de la imagen se produce por la dispersión de los electrones. Así, esta capacidad de dispersión depende de las distintas estructuras atómicas de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido ambiental es un tipo de equipo que se caracteriza por contener un gas en la cámara de muestra, evitando tener que metalizar la muestra antes de insertarla en el equipo con el consiguiente ahorro de tiempo. En el equipo que normalmente empleamos se utiliza vapor de agua. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de estudio microestructural de una interfase polímero-metal correspondiente al material de un componente sometido a proceso de dedicación en el cual se ha aplicado ingeniería inversa para el establecimiento de criterios de aceptación. Adicionalmente, se pudo realizar control dimensional de la capa de polímero (recubrimiento) tal y como se observa en la figura (Figura 6).

La Figura 7 muestra un difractograma en el que mediante espectrometría de dispersión de rayos X (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) podemos determinar de forma cuantitativa el porcentaje en masa de elementos químicos presentes en la muestra analizada.

El microanálisis mediante EDS (Figura 7) de la interfase polímero-metal nos da ciertas pautas en cuanto

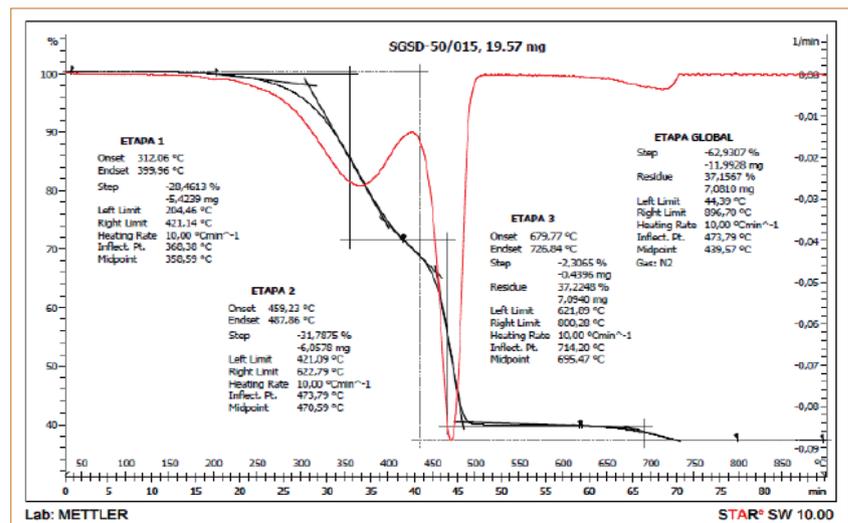


Figura 5. Ensayo de termogravimetría en una muestra de EPDM.

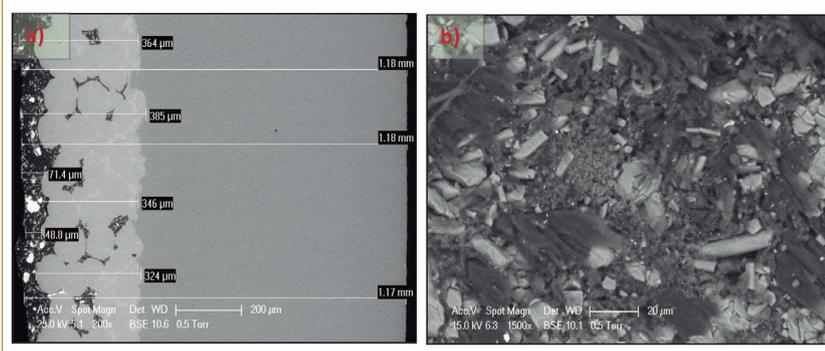


Figura 6. Control dimensional y análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido.

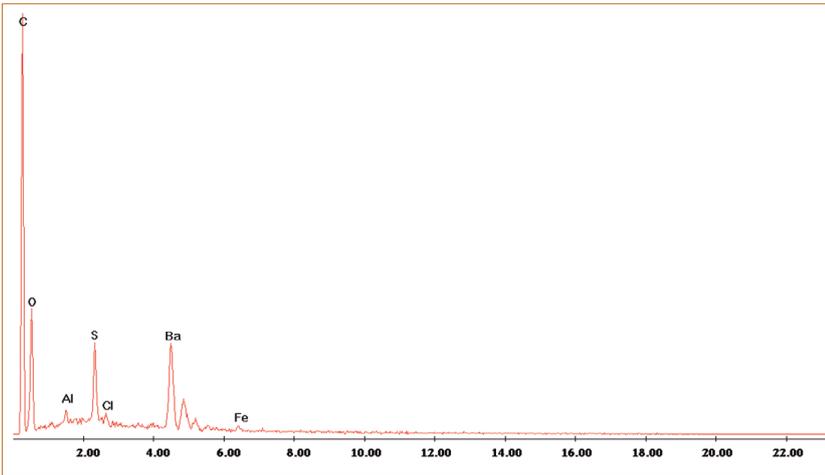


Figura 7. Difractograma EDS sobre la interfase polímero-metal de uno de los materiales estudiados.

a composición del polímero y cargas minerales que se han empleado en su composición. Se observa que el material del recubrimiento de las juntas tiene un origen orgánico, en el cuál destacan el S y el Ba en la composición. Esto posiblemente se debe a la presencia de BaS, que aparte de usarse como pigmento, también se utiliza como aditivo en piezas sometidas a fricción para modificar sus propiedades tribológicas. La presencia de este aditivo sugiere que se añade para mejorar la resistencia al desgaste y/o a la abrasión, además de proporcionar protección del material base de las juntas frente a la corrosión.

CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo de la metodología propuesta ha permitido la creación de una base de datos de diseño de determinados componentes de equipos relacionados con la seguridad. Estos resultados han sido obtenidos clasificando y analizando diversas muestras patrón existentes en el actual inventario de almacén de varias centrales nucleares españolas. Estas muestras patrón pertenecen a lotes de fabricación cuyo resto de

unidades se encuentran instaladas y sometidas por tanto a los programas de vigilancia y reglas de manteni-

miento y/o fiabilidad de planta. De este modo, los resultados obtenidos permiten establecer requisitos de los materiales originales sin tener en cuenta efectos de degradación de materiales debidos a la instalación del componente, que lo someterían a las condiciones de operación (solicitaciones mecánicas, vibraciones, humedad/ambiente corrosivo y radiación). Los ensayos de caracterización de los materiales de inventario han consistido en ensayos convencionales de caracterización de materiales además del empleo de determinadas técnicas avanzadas como son la calorimetría diferencial de barrido, la termogravimetría y la microscopía electrónica de barrido junto con la espectrometría de dispersión de rayos X. Cabe destacar que en la selección y análisis de patrones se han considerado efectos de degradación/obsolescencia debida al almacenamiento prolongado.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi agradecimiento al Producto Inspección y Asistencia Técnica de SGS Tecnos, así como al Laboratorio de Materiales (Metalurgia y ensayos mecánicos). Así mismo, quiero agradecer al Departamento de Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de los Materiales y Tecnología Electrónica y al Centro de Apoyo Tecnológico (CAT) de la URJC por su colaboración en la caracterización avanzada de materiales. ■

- [1] Rodríguez-Prieto A, Camacho AM, Sebastián MA. Materials selection criteria for nuclear power applications: a decision algorithm. *JOM* 2016; 68(2): 496–506.
- [2] Rodríguez-Prieto A, Camacho AM, Sebastián MA. Selection of candidate materials for reactor pressure vessels: application of irradiation embrittlement prediction models and a stringency level methodology. *Proc. IMechE Part L J. Mater. Des. Appl.* 2017; DOI: 10.1177/1464420717727769.
- [3] Rodríguez-Prieto A, Camacho AM, Sebastián MA. Multicriteria materials selection for extreme operating conditions based on a multiobjective analysis of irradiation embrittlement and hot cracking prediction models. *Int. J. Mech. Mater. Des.* 2017; DOI: 10.1007/s10999-017-9393-2.
- [4] UNE 73401. Garantía de la calidad en instalaciones nucleares. Madrid (España): Asociación Española de Normalización y Certificación; 1995.
- [5] Guía de seguridad 10.8. Garantía de calidad para la gestión de elementos y servicios para las instalaciones nucleares. Madrid (España): Consejo de Seguridad Nuclear; 2001.
- [6] EPRI TR-107372. Guideline for Reverse Engineering at Nuclear Power Plants. Palo alto-CA, (USA): Electric Power Research Institute; 1998.
- [7] Prasertsri S, Kurakanok K, Sukkapan N. Physico-mechanical properties and automotive fuel resistance of EPDM/ENR blends containing hybrid fillers. *J. Polym. Res.* 2016; 23:228.
- [8] Shokrzadeh A, Naderi G, Esmizadeh E. Mechanical and rheological properties of calcium carbonate-filled ethylene propylene diene elastomer reinforced by metallic acrylate salt. *Fibers Polym.* 2014; 15:1694–1700.
- [9] Ismail H, Mathialagan M. Comparative study on the effect of partial replacement of silica or calcium carbonate by bentonite on the properties of EPDM composites. *Polym. Test.* 2012; 31:199–208.
- [10] Nair AB, Kurian P, Joseph R. Ethylene-propylene-diene terpolymer/hexa fluoro-propylene-vinylidene fluoride dipolymer rubber blends: Thermal and mechanical properties. *Mater. Des.* 2012; 36: 767–778.