

“Estudio de resistencia a la radiación de materiales de aislaciones poliméricas de cables de producción nacional para su uso en centrales nucleares”

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumno: Ing. Jorge Zorrilla
Director: Dra. Ana Fortis



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Índice

Resumen	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	4
a) Problemática de cables en centrales nucleares.....	7
b) Estudio de la degradación de polímeros en centrales nucleares	10
c) Normativa existente	14
d) Situación de los cables instalados en centrales nucleares en Argentina	14
CAPÍTULO 2: TRABAJO EXPERIMENTAL	16
a) Selección de materiales a ensayar	16
b) Procedimiento experimental.....	19
i. Ensayos de tracción.....	19
ii. Ensayos de espectroscopía (FTIR-ATR).....	20
iii. Ensayo de nanoindentación.....	21
iv. Irradiación con Co60.....	23
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	24
a) Ensayos de nanoindentación.....	24
b) Ensayos de FTIR.....	27
c) Ensayos mecánicos.....	34
d) Análisis de resultados.....	43
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....	47
AGRADECIMIENTOS.....	48
REFERENCIAS	49

RESUMEN

Los cables utilizados en centrales nucleares en ambientes con radiación deben poseer la característica de tener una muy buena resistencia a la misma, debido a la necesidad de que operen, en su gran mayoría, durante un mínimo de 30 años, con alta dificultad para cambiarlos debido al costo económico y en dosis de la operación. En el mundo hay pocas empresas especializadas en fabricar este tipo de cables, y, en la Argentina, los fabricantes no han realizado estudios auxiliares que verifiquen su desempeño en estos ambientes, por lo que se utilizan proveedores extranjeros aumentando los costos considerablemente.

En este contexto, la empresa nacional Marlew S.A., fabricante de cables, pidió asistencia a la CNEA en el estudio de resistencia a la radiación de aislaciones poliméricas de cables de nueve materiales distintos utilizados en sus procesos de fabricación, con la finalidad de comparar su desempeño entre sí frente a la radiación.

Posteriormente se determinaron cuáles son las condiciones de envejecimiento que aseguran la degradación homogénea en los materiales y se realizaron ensayos auxiliares de medición de módulo tensil a lo largo del espesor de las muestras para asegurar dicha homogeneidad. Para cumplir con el objetivo de envejecimientos acelerados, en primer lugar se irradiaron grupos de muestras de las aislaciones seleccionadas hasta dosis totales de 100, 150, 250, 350 y 500 kGy. Para la irradiación se utilizó la Planta de Irradiación Semi Industrial, ubicada en el Centro Atómico Ezeiza, que posee una fuente de cobalto 60. Por lo tanto, se utilizaron rayos gamma para realizar un envejecimiento acelerado por radiación, simulando las dosis totales en servicio mencionadas anteriormente. Además se ensayaron las aislaciones poliméricas de un cable utilizado con éxito durante la operación de la central nuclear Atucha I a fin de compararlo con los materiales de origen nacional antes mencionados y establecer un criterio de aceptación.

Luego, para cuantificar la resistencia a la radiación en función de la dosis acumulada, se realizaron ensayos de tracción sobre las muestras de los siete materiales a todas las dosis de radiación totales mencionadas anteriormente. De esta manera se obtuvieron curvas de elongación a la rotura en función de la dosis acumulada para todos los materiales en estudio.

Para finalizar, se compararon las curvas obtenidas teniendo en cuenta la degradación alcanzada por las aislaciones de los cables usados en centrales nucleares. De esta manera, se priorizaron las aislaciones poliméricas de cables de fabricación nacional según su resistencia al daño por radiación.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los cables eléctricos constituyen unos de los elementos más importantes de las centrales nucleares de potencia en términos de mantenimiento, disponibilidad y seguridad de la planta. Debido a su gran extensión (del orden de los miles de kilómetros) constituye un componente imposible de ser reemplazado totalmente. Es por esto que la calificación original antes de su instalación y la posterior gestión de envejecimiento de cables se torna crucial para la operación prolongada de una central nuclear [Ref 1].

Cuando se habla de la relación de cables con sistemas de seguridad cabe mencionar que muchos cables son componentes eléctricos clase 1E. Se clasifica a un componente eléctrico como 1E cuando son esenciales para la parada del reactor, para asegurar la aislación de la contención, la refrigeración del núcleo del reactor, la contención y/o para prevenir la emisión de material radiactivo al medio ambiente.

A continuación se definen los componentes de las estructuras más habituales de cables. Se utilizan figuras con fines ilustrativos, asimismo se especifican los nombres de dichos componentes en español e inglés para una mayor facilidad a la hora de ampliar la lectura con autores internacionales en temas relacionados con aplicaciones de cables.

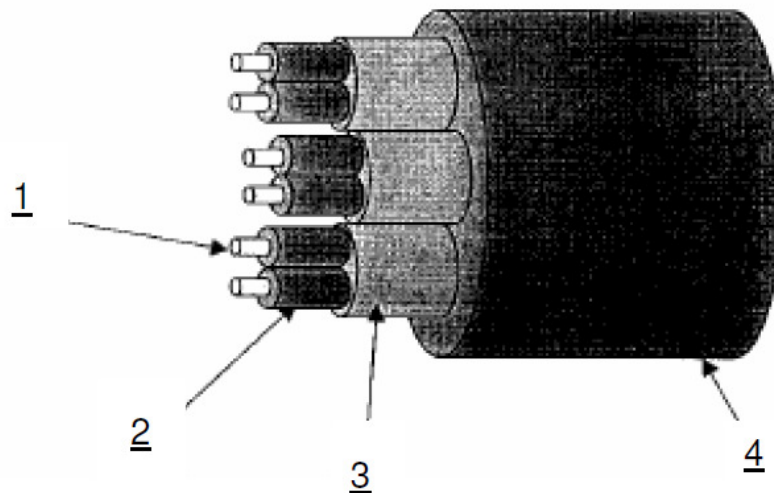


Figura 1: **1** Conductor / Conductor componente de naturaleza metálica responsable de la conducción eléctrica. **2** Aislación / Insulation: componente de naturaleza polimérica responsable de la aislación eléctrica del conductor. **3** Relleno / Filler: material no higroscópico que llenan espacios entre las partes interiores de un cable previniendo la entrada de agua. **4** Envoltura / Jacket: cobertura integral que es aplicada sobre la aislación, blindaje, relleno etc. cuya función fundamental es proveer protección mecánica y contra el medio ambiente para el componente que cubre.

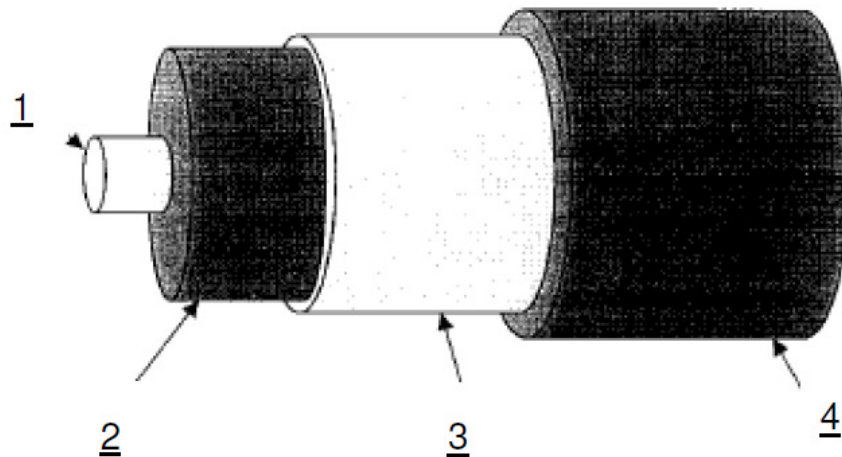


Figura 2 : 1 Conductor / Conductor, 2 Aislación / Insulation, 3 Blindaje / Shield: material no magnético que cubre el conductor aislado para confinar el campo eléctrico en el mismo, 4 Envoltura / Jacket .

Es también conveniente tener presente la definición de un agente estresor (stressor). Se define como agente estresor a un agente que proviene del proceso de fabricación, condiciones de trabajo, de pre-servicio, de almacenamiento o de servicio que produce degradación inmediata o envejecimiento de un sistema, estructura o componente [Ref 3, Ref 4]

En cuanto al proceso de fabricación de un cable es posible dividirlo en las siguientes etapas:

-Trefilado de las varillas de cobre hasta el diámetro correcto.

Por lo general, el cobre llega a la fábrica con un tamaño estándar de ocho milímetros de diámetro (alambión). En una primera fase, el alambre se trefila a través de varios moldes y discos hasta reducirlo a diámetros mínimos del orden del milímetro. A continuación, el cable se pasa a través de una máquina de recocido que calienta el cobre, de forma que sea lo suficientemente dúctil para conseguir deformaciones de entre 30 al 35 %. A continuación, el alambre se enrolla en bobinas.

-Trenzado de los alambres

El conductor de un cable eléctrico puede tener tres formas: (1) alambre de cobre sólido, (2) grupos de cables de cobre o (3) cables de cobre trenzados. El proceso de torcer o trenzar los alambres para formar un cable se denomina trenzado y da como resultado un cable de mayor o menor flexibilidad. A fin de garantizar la idoneidad de la estructura y estabilidad dimensional del tipo de conductor en cuestión, se modifican las direcciones de torsión de varias capas. La torsión de una de las capas se realiza a la izquierda, y la de la siguiente a la derecha

-Aplicación de la aislación.

El siguiente paso es el más importante desde el punto de vista de la degradación ya que consiste en la aplicación de la capa de aislamiento polimérico alrededor del conductor de cobre. Este proceso se realiza en la línea de aislamiento, que incluye un extrusor alimentado continuamente con pellets

del material de la aislación (polietileno, PVC, LSOH, EPR, etc.). Esta máquina mezcla, compone y calienta los pellets hasta que alcanzan el nivel de viscosidad correcto. El alambre se procesa a través del cabezal de extrusión, de forma que se pueda aplicar la capa de aislamiento del color deseado. A continuación cruza un baño con agua corriente que solidifica rápidamente el aislamiento. El conductor se comprueba mediante equipos de prueba de alta calidad para detectar posibles defectos.

-Trenzado de cables con varios conductores

Al igual que los alambres de cobre, los conductores también se pueden trenzar entre sí mediante un proceso similar. Las bobinas industriales que contienen los conductores con aislamiento de color se suspenden para alimentar la trenzadora. Dependiendo de la forma de la sección transversal, este proceso se denomina trenzado redondo o sectorial. Una vez trenzados, los cables se enrollan en una bobina industrial, quedando preparados para el siguiente paso

-Aplicación del revestimiento, blindaje y revestimiento final

Algunos cables requieren un blindaje de acero, aluminio, cobre o plomo como protección contra daños mecánicos externos y/o interferencias electromagnéticas. Para que el blindaje se pueda aplicar, es necesario añadir un revestimiento interior a los conductores trenzados en la línea de extrusión en un proceso análogo al de aplicación de la aislación a fin de dar un acabado preciso al cable. En caso de que el cable no requiera blindaje, se le aplicará directamente un revestimiento exterior final, también análogo a la aplicación de la aislación.

a. Problemática de cables en centrales nucleares

Existe un gran esfuerzo en asegurar que una vez instalado un cable en una central nuclear, el mismo pueda cumplir sus funciones esperadas durante un tiempo prolongado. En este sentido cabe distinguir los cables que cumplen funciones de seguridad y dentro de los mismos aquellos que deben cumplir su función de seguridad en caso de un accidente base de diseño [Ref 2].

El principal objetivo de la calificación es demostrar con una certeza razonable que el cable para el cual se ha establecido una vida o condición calificada puede realizar su función/es de seguridad sin experimentar fallas de causa común antes, durante y después de eventos de base de diseño aplicables (por ejemplo accidente de pérdida de refrigerante, rotura de línea de vapor principal...etc.). Los equipos de Clase 1E, junto con sus interfaces (cables por ejemplo), deben cumplir o superar los requisitos de las especificaciones propias del equipo. Esta capacidad debe ser asegurada de forma permanente a través de un programa que incluye, pero no está limitado a, el control de diseño, control de calidad, la calificación, instalación, mantenimiento, pruebas periódicas, y la vigilancia. [Ref 2].

El objetivo específico de la calificación es establecer la *vida calificada* para cables que:

- cumplen funciones de seguridad
- están instalados en ambientes “severos” (“harsh”), es decir con presencia de agentes estresores importantes
- deben trabajar adecuadamente durante y, según el caso, después de un accidente base de diseño.[Ref 2].

La vida calificada puede ser expresada entonces como una cierta cantidad de años a una temperatura de operación específica. No se requiere una estimación de vida calificada para cables instalados en ambientes no severos, es decir cuando el cable opera dentro de los límites establecidos por norma o especificaciones técnicas. [Ref 5].

En cuanto a la metodología de calificación de componentes en general existen tres metodologías principales pudiéndose dar una combinación de las mismas:

- por ensayo de tipo: es decir ensayos de simulación de condiciones de servicio, simulación de accidente, etc.
- por experiencia operativa: es decir validando la calificación a través del funcionamiento de un componente que ya se encuentra en operación en centrales.
- por análisis: realizando análisis de ingeniería sobre las capacidades del componente en cumplir sus funciones de seguridad.

Para el caso de cables la calificación por análisis no puede ser exclusiva, siendo la calificación por ensayo de tipo la preferida tanto en normas como

recomendaciones internacionales [Ref 2, Ref 5, Ref 6, Ref 7]. Este tipo de calificación comienza con una planificación de ensayos detallada, continúa con envejecimiento acelerado, diseño, simulación y medición de propiedades funcionales durante accidente base de diseño [Ref 8].

La etapa de envejecimiento acelerado tiene como objetivo simular el envejecimiento debido a la operación normal. En esta etapa se simula el envejecimiento térmico y por radiación.

Teniendo en cuenta que los cables que se encuentran dentro del edificio de contención de un reactor están expuestos a diferentes agentes estresores, la simulación de esta operación normal se torna sumamente compleja. Por ejemplo, los principales factores que definen esas condiciones son la temperatura, la dosis de radiación ionizante y la naturaleza propia del ambiente (principalmente el contenido de oxígeno y vapor de agua). Los efectos mecánicos también deben ser considerados como agentes causantes de envejecimiento, dentro de los cuales se encuentran: vibraciones, operaciones de conexión y desconexión, excesivos plegados durante su instalación, tensiones eléctricas excesivas, tensiones mecánicas, etc.

Se pueden considerar dos tipos de agentes estresores:

a) Ambientales: Estos son los agentes estresores que existen en el medio ambiente alrededor del equipo ya sea que este esté en operación o no. Los principales agentes estresores que definen esas condiciones son la temperatura, la dosis de radiación ionizante y la naturaleza propia del ambiente (principalmente el contenido de oxígeno y vapor de agua).

b) Operacionales: Estos agentes estresores son debidos a la operación del componente. Ejemplos de esta clase de agentes son el calentamiento interno debido a la carga eléctrica o mecánica.

Como solución a la hora de estipular especificaciones técnicas de ensayos, se aplican márgenes de seguridad, por ejemplo en las temperaturas de servicio supuestas. Sin embargo este tipo de simplificaciones da lugar a un cierto grado de incerteza sobre la calificación de cables, dichas incertezas son provenientes de la aplicabilidad de modelos teóricos para calcular condiciones de envejecimiento acelerado, incerteza en la medición de parámetros asociados a dichos modelos, simplificación del efecto de la sinergia de agentes estresores presentes en la operación, etc.

Para salvar dicha incertidumbre en la calificación de los cables muchos países han optado por la estrategia de "*Condition Based Qualification (CBQ)*" como complemento a la estrategia de calificación por vida útil. En la CBQ se define una condición calificada como el valor del/los Parámetro/s de Monitoreo (PM) para los cuales se garantiza la capacidad del cable a tener un desempeño satisfactorio según diseño ante un accidente base de diseño. En el proceso de calificación se somete a una muestra representativa, a través de ensayos de laboratorio, a un envejecimiento acelerado equivalente al envejecimiento en condiciones de trabajo por el tiempo de vida útil. Si bien se debe hacer una

suposición inicial de equivalencia entre el envejecimiento acelerado y el tiempo de operación, dicha suposición puede ser verificada y corregida.

En el siguiente gráfico, Figura 3 se esquematiza la utilización de la condición calificada. En el eje y se grafica el valor de PM seleccionado y en el eje x el tiempo de operación. Se observa en línea naranja continua la evolución del PM durante el tiempo de trabajo en condiciones de operación.

Se observan en la Figura 3 tres mediciones de PM a tres tiempos diferentes (T_1 , T_2 , T_3) antes de alcanzar un PM igual a la condición calificada. En línea roja se observa la evolución del PM durante y después de la prueba de DBE (accidente base de diseño).

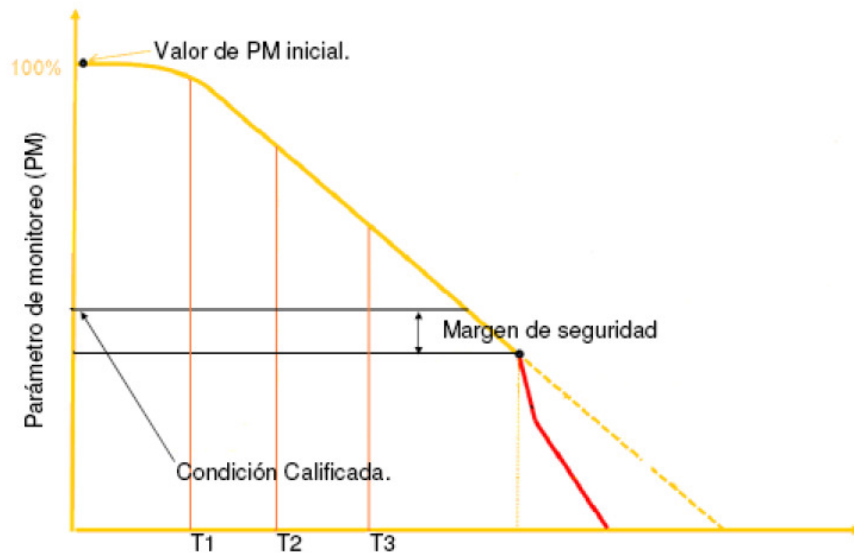


Figura 3: Diagrama conceptual de condición calificada, condición calificada crítica y capacidad de desempeño satisfactorio ante un accidente base de diseño.

En tal sentido se aprovechó el período de construcción de la Central Nuclear Atucha II para diseñar e implementar un programa de gestión de envejecimiento de cables desde el montaje, acorde con el estado del arte en esta área, implementando las medidas necesarias para la aplicación de este enfoque de calificación [Ref 9].

b. Estudio de la degradación de polímeros en centrales nucleares

El envejecimiento de los polímeros depende principalmente de tres factores:

- Del tipo de polímero
- De los agentes estresores .
- Del tiempo en servicio (generalmente largos períodos)

La envoltura y la aislación están compuestos de materiales cuya base es un polímero o un co-polímero y de aditivos encargados de proveer al material de sus propiedades específicas. Estos aditivos son generalmente utilizados como agentes protectores (antioxidantes, estabilizadores térmicos, retardantes de llama, etc.), rellenos minerales, plastificantes, pigmentos, etc. Algunos materiales con los que se fabrican las envolturas y los aislantes pueden poseer hasta quince diferentes constituyentes. Pequeños cambios en la composición pueden afectar sensiblemente la velocidad a la cual el material se degrada (envejece) térmicamente y las dosis máximas permitidas de radiación.

Los mecanismos de envejecimiento actúan cuando un material susceptible es expuesto a condiciones ambientales adecuadas. Como resultado de esta combinación surgen cambios en el material (degradación) que modifican las características funcionales del cable.

El envejecimiento de los compuestos que conforman el aislante y la envoltura de los cables, es consecuencia de procesos, que pueden ser de tipo físico o químico. Estos procesos microscópicos inducen cambios irreversibles en las propiedades del material (eléctricas y mecánicas) las cuales pueden llevar a la falla del cable. Estos cambios macroscópicos en las propiedades del material incluyen:

- Reducción de la elongación a la rotura, asociada a una reducción de la resistencia a la tracción.
- Incremento de la dureza
- Incremento de la densidad
- Cambios en las propiedades eléctricas

La inmensa mayoría de los cables está sujeto a ambientes de trabajo en los cuales puede existir degradación térmica y por radiación gamma. El efecto de los neutrones es excluido de los análisis y de la gestión de envejecimiento debido a que no son muchos los cables en centrales nucleares que puedan verse sometidos a una tasa de fluencia significativa. Los cables que sí lo están, por lo general son gestionados a través de programas de mantenimiento preventivo/predictivo. Por lo tanto, los cambios en sus propiedades eléctricas no son muy importantes. La pérdida de la funcionalidad del cable usualmente

está determinada por la pérdida de sus propiedades mecánicas, fisuración del aislante seguida de falla eléctrica etc.

El envejecimiento de un cable puede ser producido por varios mecanismos que pueden generar efectos acumulativos, competitivos, sinérgicos y/o antagónicos. Se distinguen dos grandes categorías de mecanismos, los físicos y los químicos, dependiendo de si implican cambios químicos en la estructura o si existen cambios macromoleculares en las cadenas o en los aditivos.

A pesar de que la mejor forma de evaluar el comportamiento de un cable luego de largos periodos consiste en remover aquellos que han operado luego de 40 a 50 años en planta, esta solución generalmente es imposible de llevar a cabo. Sin embargo a veces es posible utilizar muestras de cables obtenidas de circuitos redundantes o de depósitos específicos que han estado el mismo tiempo y bajo las mismas condiciones que los cables de servicio.

Otra posible solución es la de simular el envejecimiento generado durante largos periodos de manera acelerada mediante ensayos de laboratorio, con una duración de algunos meses. A fin de que este envejecimiento acelerado sea lo más representativo posible se debe tener especial cuidado en la elección de las condiciones del ensayo.

En la Figura 4 se observa una representación gráfica de los diferentes mecanismos de envejecimiento que pueden ocurrir en un cable en función de la tasa de dosis y la temperatura. Para cada una de las áreas (I, II, III o IV) es posible establecer una ecuación representativa del mecanismo de envejecimiento actuante en esas condiciones de tasa de dosis y temperatura. El dominio I es controlado por el proceso de envejecimiento homogéneo por radiación. El dominio II es controlado por el envejecimiento térmico homogéneo. El III es una combinación procesos de envejecimiento, por radiación y térmicos. Finalmente en el IV actúan los mecanismos de envejecimiento controlados por difusión.

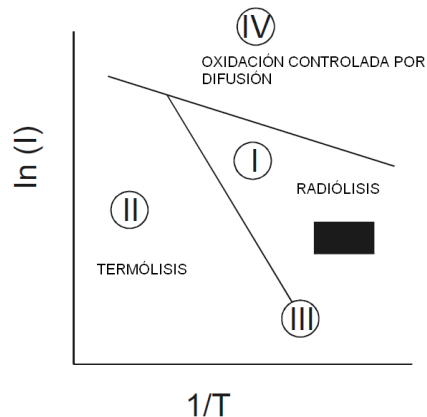


Figura 4: Diagrama esquemático donde se muestran los mecanismos de envejecimiento a las diferentes condiciones de tasa de dosis (I) y temperatura (T) [Ref 1]

La principal condición para validar el envejecimiento acelerado es que el mismo se realice dentro del mismo dominio correspondiente a las condiciones de servicio. En el caso de que el envejecimiento no se lleve a cabo en el mismo dominio, se introducirán incertezas las cuales deberán ser minimizadas utilizando otro tipo de información, como condiciones de monitoreo, o se deberán incluir márgenes adicionales.

En la Figura 5 se muestra un esquema de las posibles reacciones de degradación de polímeros ya sea por temperatura como por radiación. En este tipo de reacciones por degradación la concentración de oxígeno en el material se torna sumamente relevante. Al realizarse envejecimientos acelerados se corre el riesgo de consumir la concentración inicial de oxígeno en el material y estar en un régimen de degradación controlada por la difusión de oxígeno en el seno del material.

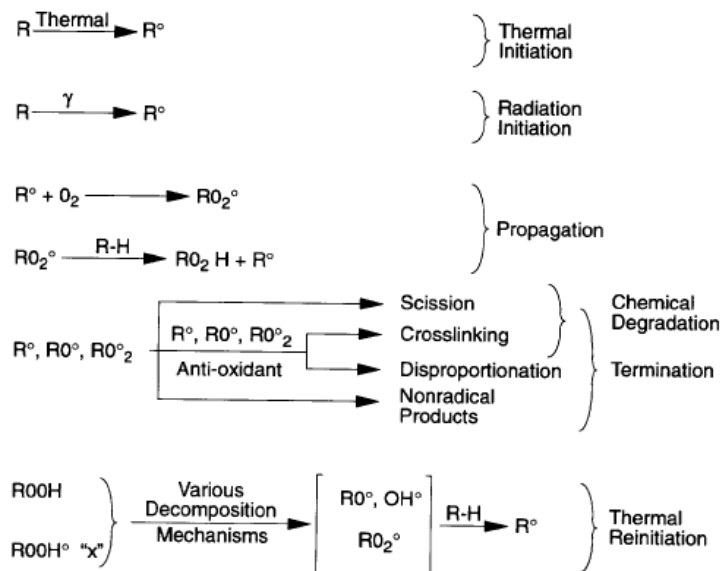


Figura 5: Esquema de distintos pasos en la degradación por oxidación de un material polimérico [Ref 10].

A la hora de estudiar el comportamiento simultáneo del efecto combinado de tasa de dosis y temperatura en la degradación de polímeros se suele recurrir al modelo de superposición de dosis a daño equivalente [Ref 1]. Este tipo de modelo consiste en determinar y tipificar el comportamiento de un polímero a través del gráfico dosis de daño equivalente (DED) en función de la tasa de dosis para una dada temperatura, Figura 6. Dicho gráfico se obtiene a partir de la elaboración de múltiples ensayos a distintas tasas de dosis y temperaturas, y posteriormente ajustando valores experimentales con variables de ajuste.

Para comenzar se grafica la evolución de un parámetro de monitoreo dado en función del tiempo para distintas condiciones de temperatura y tasa de dosis. Se toma una temperatura de referencia y se calcula el factor de multiplicación (a) necesario para solapar todas las curvas, Figura 7.

Como se expresa gráficamente en la Figura 7, el factor de multiplicación es función tanto de la temperatura como de la tasa de dosis del ensayo. Dicha dependencia puede ser aproximada para muchos materiales por la Ecuación 1:

$$a(T, \dot{D}) = e^{\frac{E}{R T_{ref}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right)} \left\{ 1 + k \dot{D}^x e^{\frac{E x}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right)} \right\}$$

Ecuación 1

donde

a: factor de multiplicación

T, \dot{D} : Temperatura y tasa de dosis respectivamente.

E, T_{ref} , R: energía de activación de la ecuación de Arrhenius, temperatura de referencia y constante de los gases.

k, x: variables de ajuste

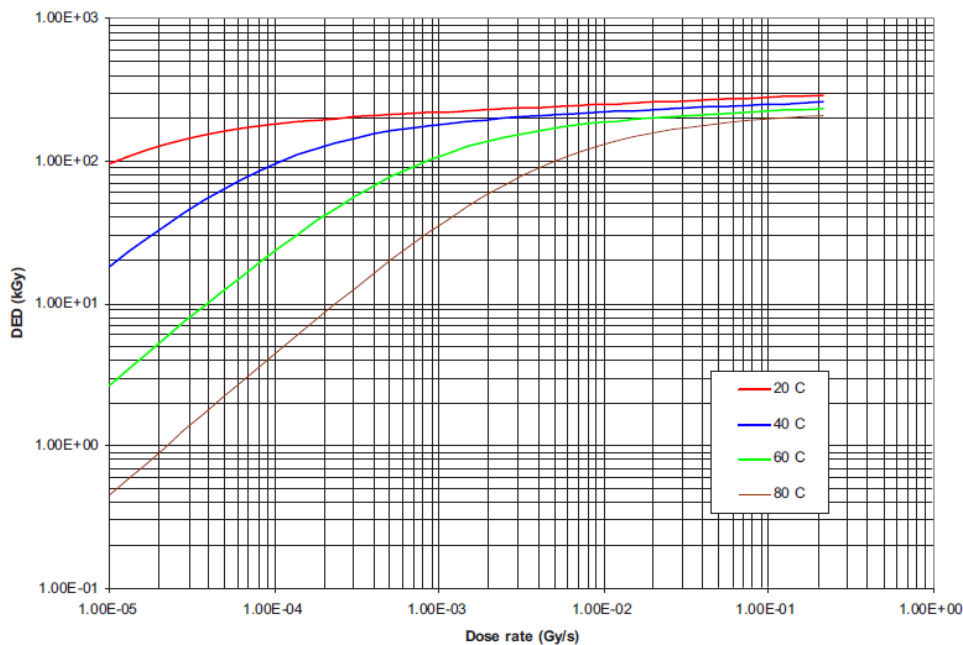


Figura 6: Gráfico general del comportamiento polimérico. En el eje de ordenadas se grafica DED (dosis de daño equivalente) para un determinado nivel de daño, por ejemplo el daño igual a un nivel de elongación a la rotura de un 70%, [Ref 8].

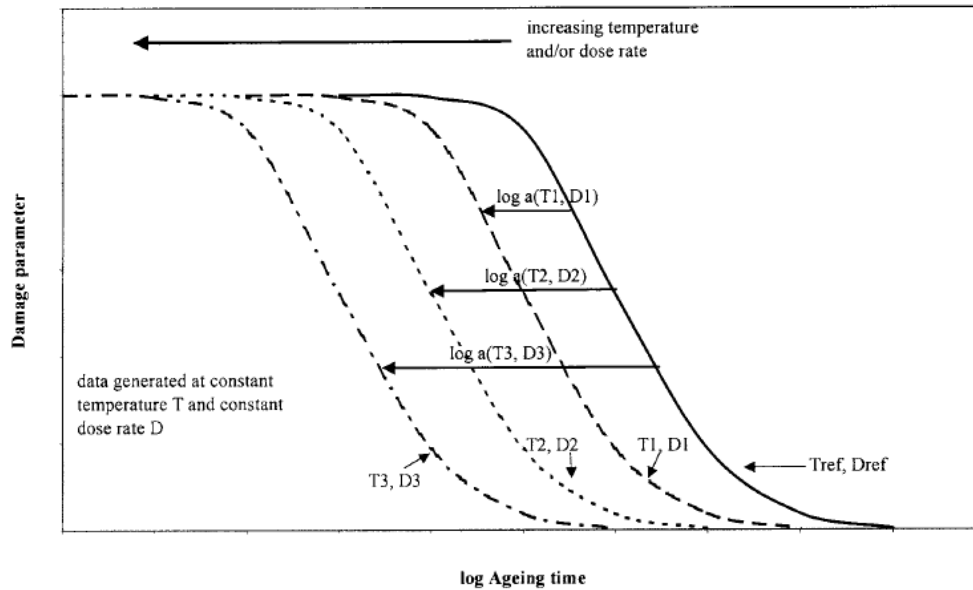


Figura 7: Ejemplo de superposición de curvas de evolución de parámetro de monitoreo en función del tiempo.

c. Normativa existente

Como se ha mencionado anteriormente existe una extensa normativa relacionada con el proceso de calificación de cables para centrales nucleares, [Ref 2, Ref 5, Ref 6]. Dicha normativa data de los años 70 en su mayor parte y ha sido revisada y reeditada a lo largo de los años. Sin embargo, a la hora de implementar el monitoreo de la condición, la normativa es reciente y se suscribe a los ensayos de parámetros de monitoreo más aceptados a nivel mundial [Ref 11, Ref 12]. Cabe destacar que si bien en esencia los ensayos a realizar han sido desarrollados hace bastante tiempo, los mismos están pensados para ser aplicados sobre muestras de cables “convencionales”. Dichos ensayos debieron ser modificados en algunos de sus parámetros a fin de poder ser adaptados a programas de gestión de envejecimiento y monitoreo de condición de cables en centrales nucleares. Las muestras, en este contexto, presentaron un importante nivel de envejecimiento. Además, donde no es posible extraer una importante cantidad de material, se reduce el número de probetas por ensayo, entre otros condicionamientos.

d. Situación de los cables instalados en centrales nucleares en Argentina

En el caso de Argentina la situación de los cables instalados en las centrales nucleares es la siguiente:

- Atucha 1: conexión a la red: 1974. Los cables de esta central fueron provistos por el diseñador de la central. Dichos cables fueron importados, marca SIEMENS. Actualmente esta empresa no existe en el mercado como proveedora de cables. Es esperable un recambio considerable de cables para una posible extensión de vida.
- Embalse: conexión a la red: 1984. Mayor participación de proveedores nacionales. Muchos de los cables utilizados fueron hechos en Argentina por Pirelli; dicha marca no existe en el mercado como proveedora de cables. Se prevee un gran recambio de cables para la extensión de vida de la central nuclear.
- Atucha 2: conexión a la red: 2014. En las aplicaciones convencionales se utilizaron cables tanto nacionales como importados. Para los sistemas y componentes dentro de la esfera de contención fueron utilizados mayoritariamente cables importados.

CAPÍTULO 2: TRABAJO EXPERIMENTAL

a. Selección de materiales a ensayar

Para la selección de materiales a utilizar se tuvieron en cuenta tres factores:

- Materiales de aislaciones y envolturas utilizados para cables en la industria nuclear a nivel mundial.
- Materiales en los cuales hubiera experiencia en la industria nacional.
- Materiales de aplicación en la industria nuclear nacional de buen desempeño en servicio.

Se tuvo en cuenta para lo primero la experiencia argentina en el proyecto SCAP (Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project). Dicho proyecto fue organizado por miembros de la NEA (Agencia de Energía Atómica perteneciente a la Organización de Desarrollo Económico) pero de participación abierta a países no miembros de la misma. Los principales objetivos del proyecto fueron:

- Establecer una base de datos completa con foco en Degradación de Cables a través de un esfuerzo colectivo de los miembros del proyecto, aportando la experiencia operativa en sus países.
- Establecer una base de conocimiento en estas áreas a través de la compilación y análisis sistemático de la información.
- Sentar las bases para prácticas recomendables que ayudarían a los operadores a elaborar mejores planes de monitoreo y gestión del envejecimiento.

De las conclusiones obtenidas en este proyecto [Ref 10] se muestran materiales tanto de aislación como de envoltura de cables utilizados en centrales nucleares (Figura 8 y Figura 9).

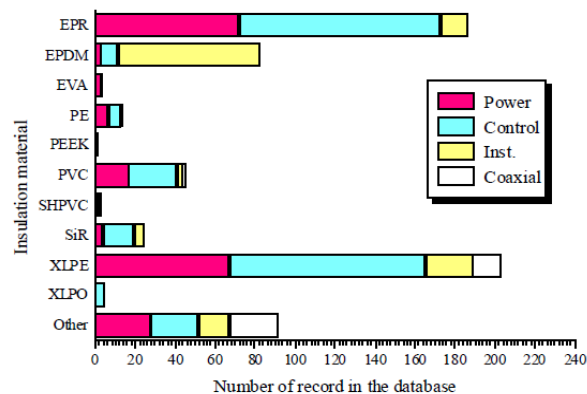


Figura 8: Materiales utilizados como aislación en cables de centrales nucleares en función de la cantidad de entradas en la base de datos del proyecto SCAP.

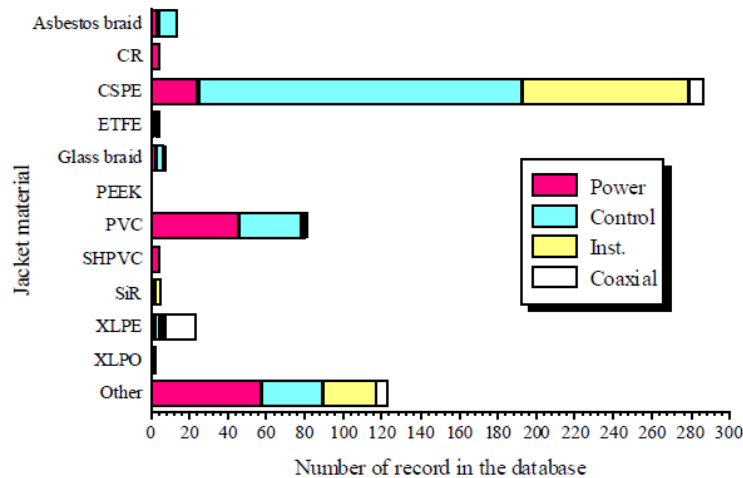


Figura 9: *Materiales utilizados como envoltura en cables de centrales nucleares en función de la cantidad de entradas en la base de datos del proyecto SCAP.*

Para los cables de origen nacional se contó con la colaboración de Marlew S.A. Dicha empresa de origen argentino se dedicada a la fabricación y comercialización de conductores eléctricos. Comenzó su actividad, hace 39 años, fabricando cables de instrumentación y desarrollos especiales. Actualmente sus líneas de productos abarcan también cables de control, potencia, automatización industrial e instalaciones domiciliarias, comercializándose, no sólo en el mercado nacional, sino también en el internacional.

En cuanto a materiales utilizados exitosamente en la industria nuclear argentina se contó con la colaboración de NA-SA (Núcleoeléctrica Argentina Sociedad Anónima), empresa operadora de las Centrales Nucleares Atucha I/II y Embalse.

Se detallan a continuación los materiales seleccionados y su origen:

- **LSOH 70 aislación:** este material fue elaborado por Marlew SA con el fin de ser utilizado especialmente en aplicaciones nucleares. Este material formó parte de muestras de aislación a las cuales se les removió el conductor metálico para realizar los distintos ensayos. Dicho material se encuentra certificado para ser operado a una temperatura continua de 70°C en aplicaciones convencionales.
- **LSOH 70 envoltura:** este material fue elaborado por Marlew SA con un fin análogo al anterior. Este material formó parte de la envoltura del cable formado por las aislaciones del material anterior. Dicho material también se encuentra certificado para ser operado a una temperatura continua de 70°C en aplicaciones convencionales.
- **LSOH 90 aislación:** este material fue elaborado por Marlew SA con el fin de ser utilizado especialmente en aplicaciones nucleares. Este material formó parte de muestras de aislación a las cuales se les removió el conductor metálico para realizar los distintos ensayos. Dicho

material se encuentra certificado para ser operado a una temperatura continua de 90°C en aplicaciones convencionales.

- **LSOH 90 envoltura:** este material fue elaborado por Marlew SA con un fin análogo al anterior. Este material formó parte de la envoltura del cable formado por las aislaciones del material anterior. Dicho material también se encuentra certificado para ser operado a una temperatura continua de 90°C en aplicaciones convencionales.
- **EPR** (goma etileno propileno) este material fue elaborado por Marlew SA. Dicha empresa cuenta con experiencia en este tipo de material. Como puede verse en la Figura 8 y la Figura 99 este tipo de material es utilizado en la industria nuclear.
- **GFR** este material fue elaborado por Marlew SA. Dicha empresa cuenta con experiencia en este tipo de material el cual es utilizado en aplicaciones de cables donde se requiere una gran resistencia a solventes orgánicos.
- **XLPE** (polietileno entrecruzado) este material fue elaborado por Marlew SA. Dicha empresa cuenta con experiencia en este tipo de material. Como puede verse en Figura 8 y la Figura 9 este tipo de material es utilizado en la industria nuclear
- **TPU** (poliuretano termoplástico) este material fue elaborado por Marlew SA. Dicha empresa cuenta con experiencia en este tipo de material el cual es utilizado como envoltura en aplicaciones de cables que requieren una gran resistencia al corte, por ejemplo en aplicaciones de minería. Es también sabido la gran resistencia a la radiación de este tipo de material.
- **SiR nacional** (goma siliconada) este material fue elaborado por Marlew SA. Dicha empresa cuenta con experiencia en este tipo de material. Como puede verse en Figura 8 y la Figura 9 este tipo de material es utilizado en la industria nuclear y en especial en centrales argentinas (caso Atucha I y II)
- **SiR CNA I** (goma siliconada) este material fue provisto por personal de la Central Nuclear Atucha I (CNA I). Dicho material de aislaciones tiene una larga y confiable experiencia en servicio a lo largo de más de 30 años de operación. Cabe destacar que el fabricante original de dicho tipo de cable ya no se encuentra disponible en el mercado.

b. Procedimiento experimental

i. Ensayos de tracción

El objetivo de estos ensayos fue determinar la evolución de la elongación a la rotura con la dosis absorbida. Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina modelo INSTRON modelo 5500R con mordazas neumáticas. Se realizaron 10 ensayos de tracción para la determinación de las condiciones iniciales (0 kGy) y 5 muestras para los ensayos a distintas dosis. No se utilizó extensómetro en los ensayos y la elongación a la rotura fue calculada a partir del desplazamiento del cabezal de la máquina.

Se prepararon muestras para ensayos de tracción siguiendo la normativa IEC IEEE desarrollada para monitoreo de condición [Ref 12]. En este caso se contemplan dos tipos de probetas:

- Probetas tubulares: estas probetas se obtuvieron removiendo los conductores de la aislación de forma muy cuidadosa de forma tal de no dañar las aislaciones poliméricas.
- Probetas tipo halterio: dichas probetas se obtuvieron con un sacabocado a partir de aislaciones y envolturas de mayor diámetro. Los detalles dimensionales de dichas probetas se muestran a continuación Figura 10.

Para el caso de las probetas tubulares se utilizaron mordazas cubiertas de goma para no contribuir al inicio de fisuras en el borde de la mordaza en contacto con la muestra.

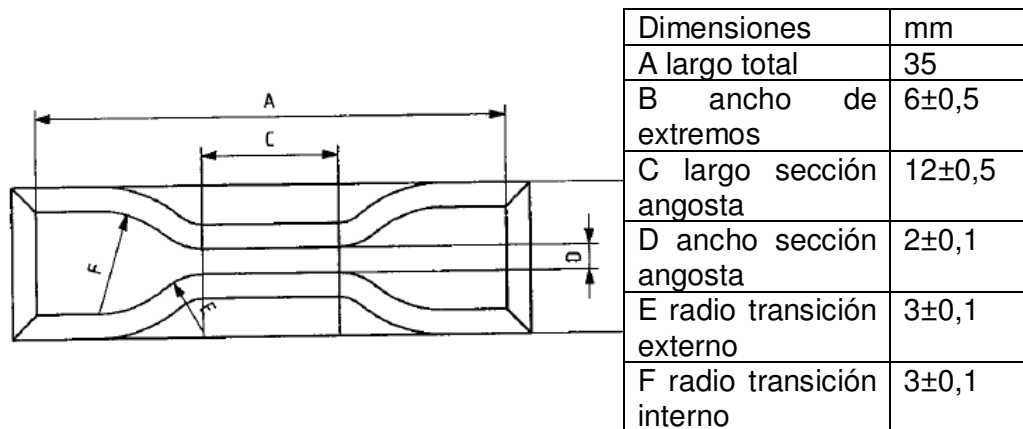


Figura 10: Detalle dimensional de probetas tipo halterio.

En la Tabla 1 se resumen las condiciones de los ensayos.

Tabla 1: Tipo de muestra y condiciones de ensayo.

material	Tipo de probeta	Distancia entre mordazas	Longitud inicial de ensayo	Velocidad de cabezal
LSOH 70 aislación	Tubular	30 mm	30 mm	50mm/min
LSOH 70 envoltura	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
LSOH 90 aislación	Tubular	30 mm	30 mm	50mm/min
LSOH 90 envoltura	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
EPR	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
GFR	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
XLPE (x4 colores, azul rojo marrón y negro)	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
TPU	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
SiR nacional	Halterio	~25mm	12,5 mm	10mm/min
SiR CNAI	Tubular	30 mm	30 mm	50mm/min

ii. Ensayos de espectroscopía (FTIR-ATR)

La espectroscopía infrarroja se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias para las cuales rotan y vibran. Los movimientos de rotación y vibración moleculares tienen niveles de energía discretos (modos normales de vibración). Las frecuencias de resonancia son determinadas por un conjunto de factores asociados con la composición química de la sustancia (tipos de enlace, enlaces vecinos, etc). Para que un modo vibracional en una molécula se active ante el espectro infrarrojo, debe estar asociado con cambios en el dipolo permanente de la molécula. Las moléculas diatómicas simples tienen solamente un enlace, el cual se puede estirar. Moléculas más complejas pueden tener muchos enlaces, y las vibraciones pueden ser conjugadas, llevando a absorciones en el infrarrojo a frecuencias características que pueden relacionarse a grupos químicos. Los átomos en un grupo CH₂, encontrado comúnmente en muchos polímeros pueden vibrar de seis formas distintas, estiramientos simétricos y asimétricos, flexiones simétricas y asimétricas en el plano (tijereteo y balanceo, respectivamente), y flexiones simétricas y asimétricas fuera del plano (aleteo y torsión, respectivamente).

La espectroscopía como técnica de caracterización en materiales poliméricos consiste entonces en hacer pasar a través de una muestra un haz de ondas electromagnéticas en el rango del infrarrojo. Luego el haz se analiza en frecuencia dando lugar a la técnica FTIR (*Fourier Transform Infra Red spectroscopy*) de forma de identificar los picos absorbidos (asociados a ciertos enlaces químicos del material). Debido a que en la mayoría de los casos lo que se busca es identificar la ubicación de los picos de absorbancia y no tanto su intensidad (dependiente de varios factores tales como superficie de la muestra, espesor, etc), las escalas de intensidad de absorbancia son arbitrarias. Típicamente en los espectros se grafica absorbancia en función de número de onda expresado en cm⁻¹.

Para el caso de muestras que no son films delgados, la técnica tiene una variante llamada FTIR-ATR. La misma consiste en colocar un cristal reflector en el rango del infrarrojo contiguo a la muestra, de forma tal que el haz incidente pase muchas veces por la muestra, Figura 11. De esta manera se obtiene una señal con mayor información sobre los enlaces químicos de la muestra.

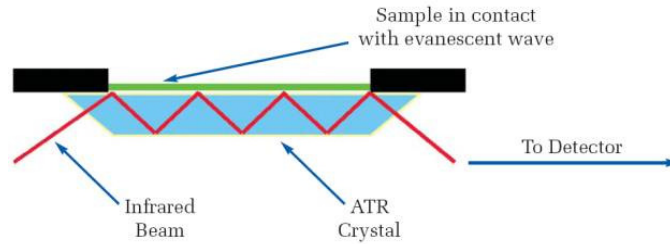


Figura 11: Esquema de trabajo de módulo FTIR-ATR.

Se utilizó un equipo de análisis por espectroscopía FTIR marca Shimadzu modelo IRPrestige 21. Para realizar las mediciones se empleó un accesorio ATR, colocando las muestras parcialmente en el portamuestras del accesorio. Debido a la humedad presente, se debieron realizar blancos previos a cada medición.

Las muestras consistieron en las mismas probetas ensayadas mecánicamente dispuestas de forma tal de cubrir la mayor área del cristal del módulo de ATR del equipo. Se agregaron probetas irradiadas a 1 kGy y 20 kGy

iii. Ensayo de nanoindentación

Este ensayo consiste en introducir una punta indentadora en la superficie de un material y sensar la carga necesaria para introducirla. De la pendiente de la curva de tensión versus deformación se calcula un módulo tensil. Dicho ensayo sirve para identificar la presencia de mecanismos de oxidación limitada por difusión cuando se realiza un barrido de módulo tensión en función del espesor, Figura 12.

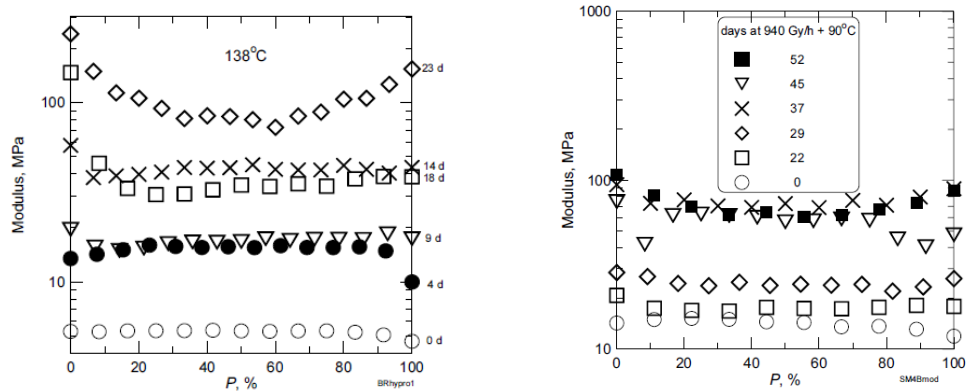


Figura 12: Gráficos de Módulo de indentación en MPa en función del espesor de muestras envejecidas. Izquierda: material de CSPE (Polietileno Cloro Sulfonado) envejecido a 138 °C; derecha: material (CSPE) envejecido a 90 °C y una tasa de dosis de 940 Gy/h,[Ref 13].

Los ensayos fueron realizados en un equipo de nanoindentación marca AGilent modelo G200, punta Berkovich, Figura 13, de 20 nm de radio, bajo la norma ISO 14577. Dichos ensayos fueron realizados en colaboración con la Dra. Cecilia Fuertes perteneciente a la Gerencia Química de la Gerencia de Área de Aplicaciones no Nucleares, de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Para la elaboración de las probetas se cortaron transversalmente probetas de ensayos mecánicos posteriormente a ser irradiadas y antes de realizar el ensayo mecánico. Los fragmentos cortados fueron de 4 mm de alto para no alterar significativamente las dimensiones de las probetas para ensayos mecánicos; fueron incluidos de forma análoga a muestras metalográficas siendo la cara expuesta para la indentación la cara recién cortada. Sólo se hicieron ensayos de nanoindentación para muestras de LSOH 70 aislación; LSOH 70 envoltura; LSOH 90 aislación; LSOH 90 envoltura.

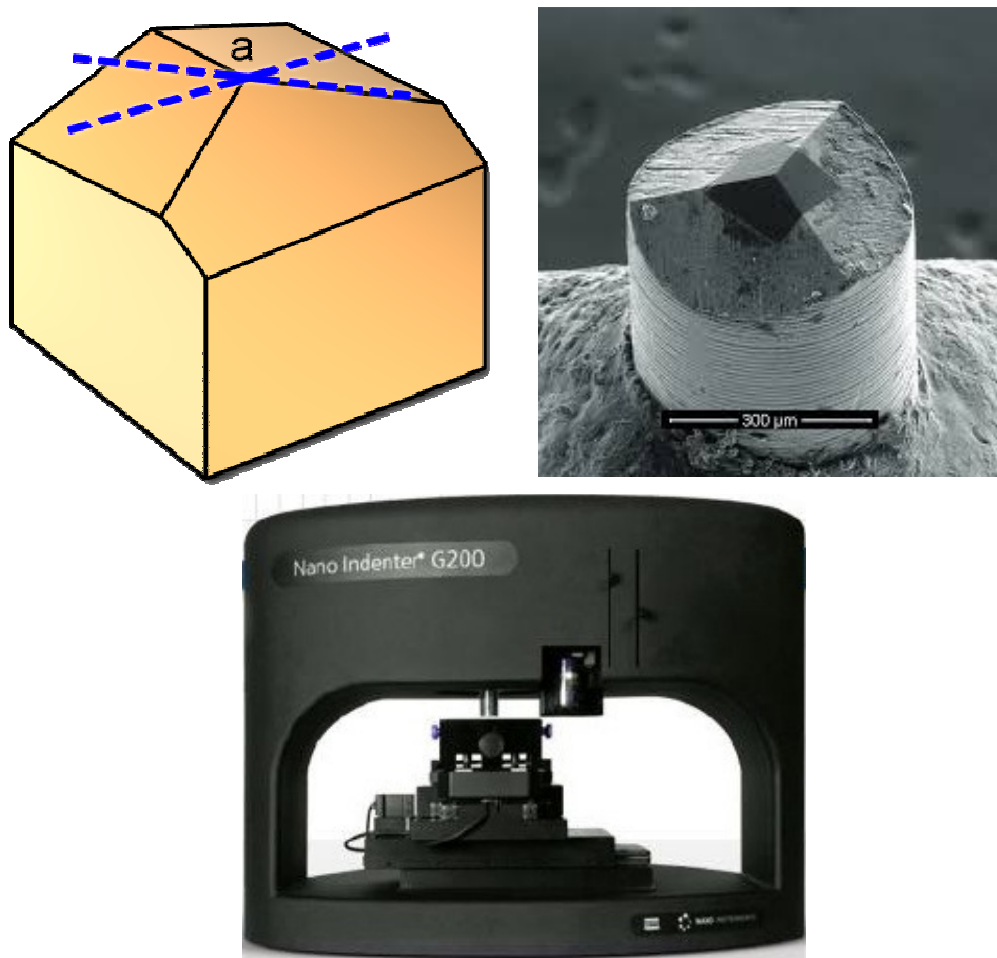


Figura 13: Esquema de punta Berkovich (arriba izquierda), imagen de una punta arriba derecha y foto del equipo.

Se midió el módulo tensil de las muestras a lo largo del espesor. Las medidas fueron separadas entre 50 y 80 micrones, cubriendo todo el espesor de la aislación. Fuerza máxima: 0.6 a 0.8 mN

iv. Irradiación con ^{60}Co .

Se irradiaron muestras de ensayos mecánicos a una tasa de dosis de 1kGy/h en la Planta de Irradiación Semi Industrial del Centro Atómico Ezeiza. Para las muestras de LSOH 70 aislación; LSOH 70 envoltura; LSOH 90 aislación; LSOH 90 envoltura; TPU; EPR; GFR; XLPE y SiR nacional se realizaron irradiaciones de 100 kGy; 150 kGy; 250 kGy; 350 kGy y 500 kGy.

Para el material SiR CNAI se realizaron irradiaciones en iguales condiciones para dosis de 25 kGy; 50 kGy; 100 kGy; 125 kGy; 150 kGy; 200 kGy y 500kGy

Para la determinación de la tasa de dosis se buscó evitar fenómenos de degradación limitada por difusión de oxígeno. Para esto se tuvieron en cuenta los valores de espesor de las muestras, el material del que se trataba y los valores de referencia de tasas de dosis [Ref 10]. Para el caso particular de los materiales LSOH 70 aislación, LSOH 70 envoltura, LSOH 90 aislación y LSOH 90 envoltura no se contaba con información detallada del material base, es por esto que se decidió evaluar la homogeneidad de la degradación a través de ensayos de perfil de módulo tensil.

Se realizaron irradiaciones a una tasa de dosis de 18Gy/h para dosis de de 1kGy y 20kGy con el fin de detectar de forma temprana la aparición de productos de la degradación a través de ensayos de FTIR-ATR. Dichas probetas fueron excluidas de los ensayos mecánicos.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

a. Ensayos de nanoindentación

A continuación se muestran los resultados los perfiles de nanoindentación para LSOH 70 aislación; LSOH 70 envoltura; LSOH 90 aislación; LSOH 90 envoltura para las dosis de 100 y 350 kGy de forma ilustrativa (Figura 14 a Figura 21). Todas las mediciones mostraron una dispersión del valor del módulo elástico a lo largo del espesor sin ninguna tendencia.

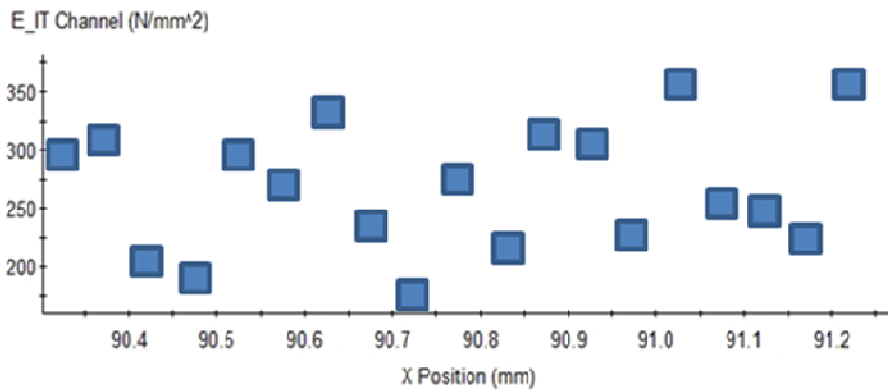


Figura 14: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 70. Aislación irradiada a 100kGy.

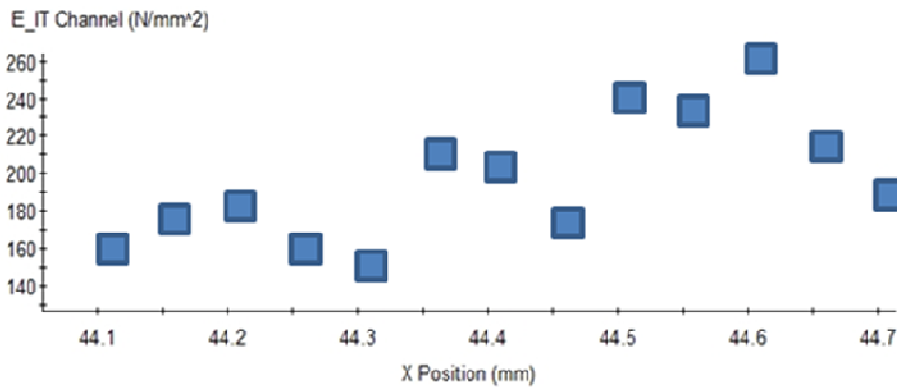


Figura 15: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 70. Aislación irradiada a 350kGy.

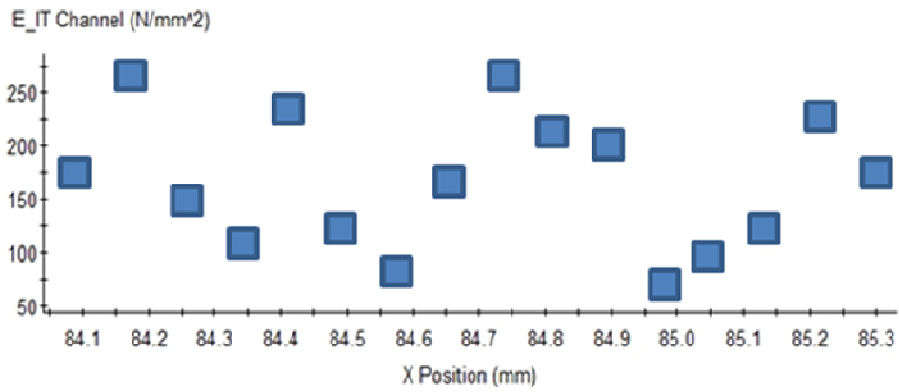


Figura 16: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 70. Envoltura irradiada a 100kGy.

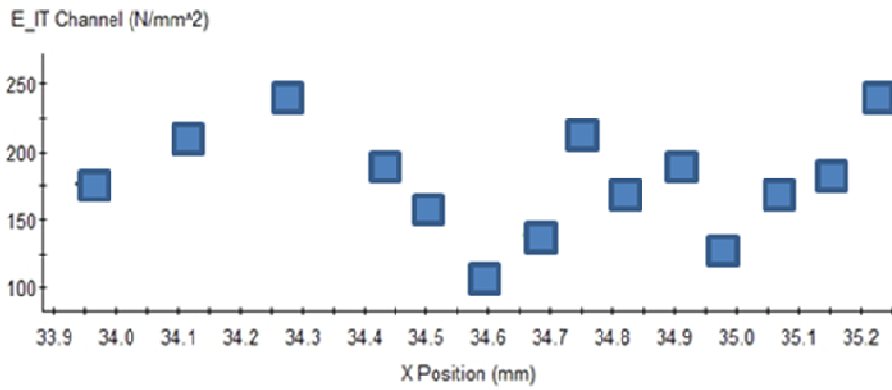


Figura 17: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 70. Envoltura irradiada a 100kGy

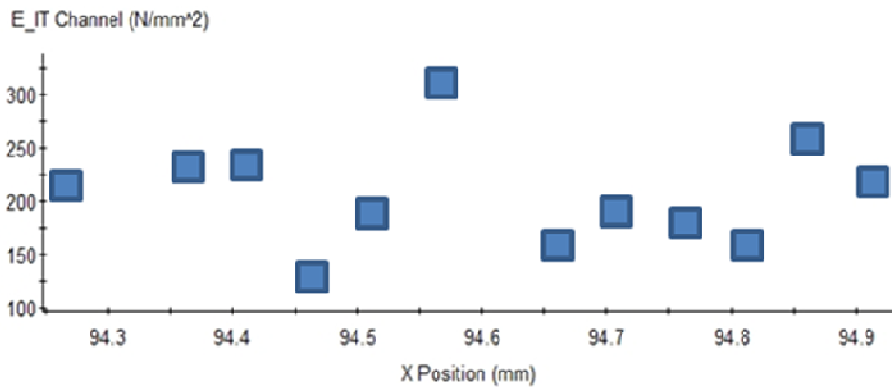


Figura 18: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 90. Aislación irradiada a 100kGy

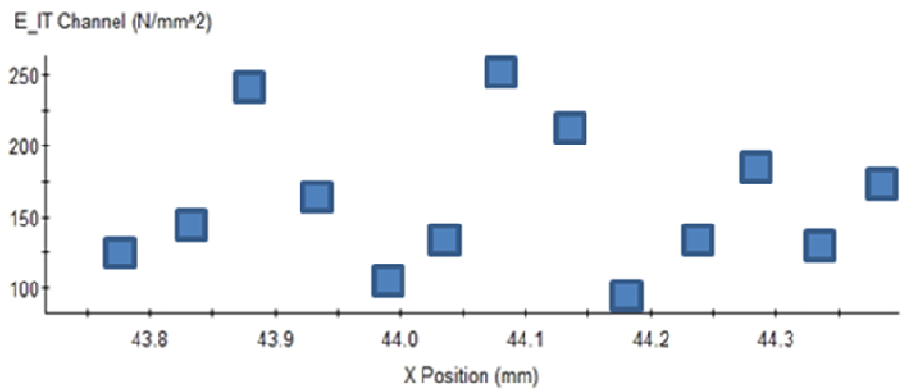


Figura 19: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 90 Aislación irradiada a 350kGy

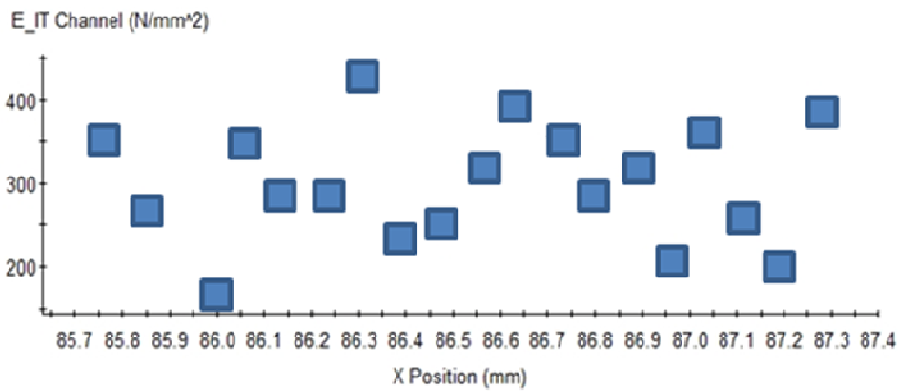


Figura 20: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 90 Envoltura irradiada a 100kGy

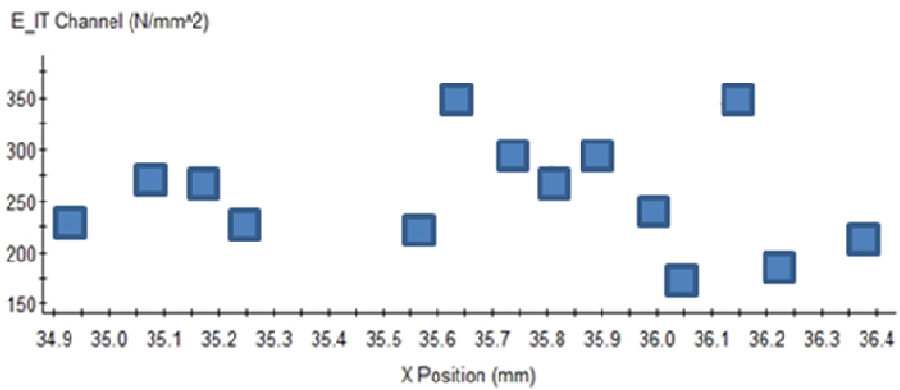


Figura 21: Gráfico de módulo tensil vs. espesor para la muestra de LSOH 90 Envoltura irradiada a 350kGy

b. Ensayos de FTIR

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material LSOH 70 de aislación.

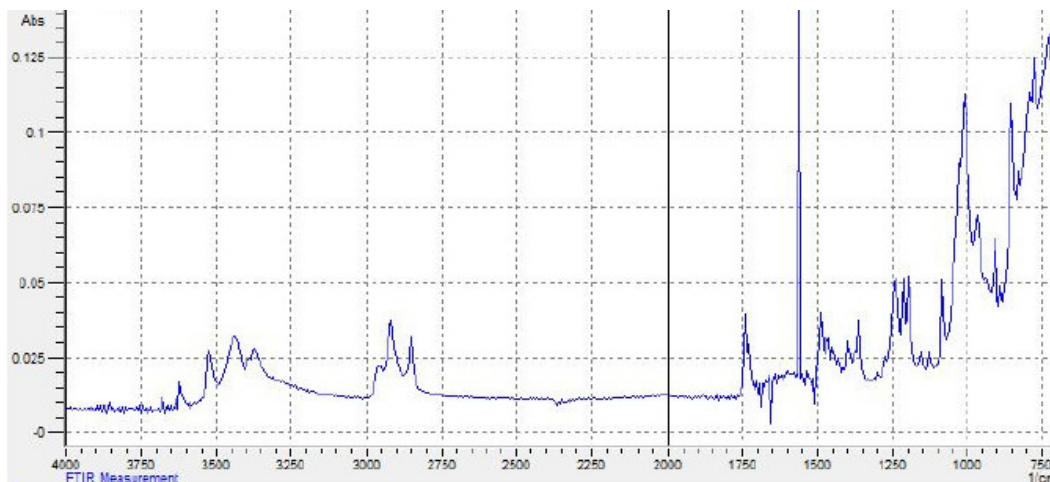


Figura 22: Espectro de la muestra de LSOH 70 no irradiada

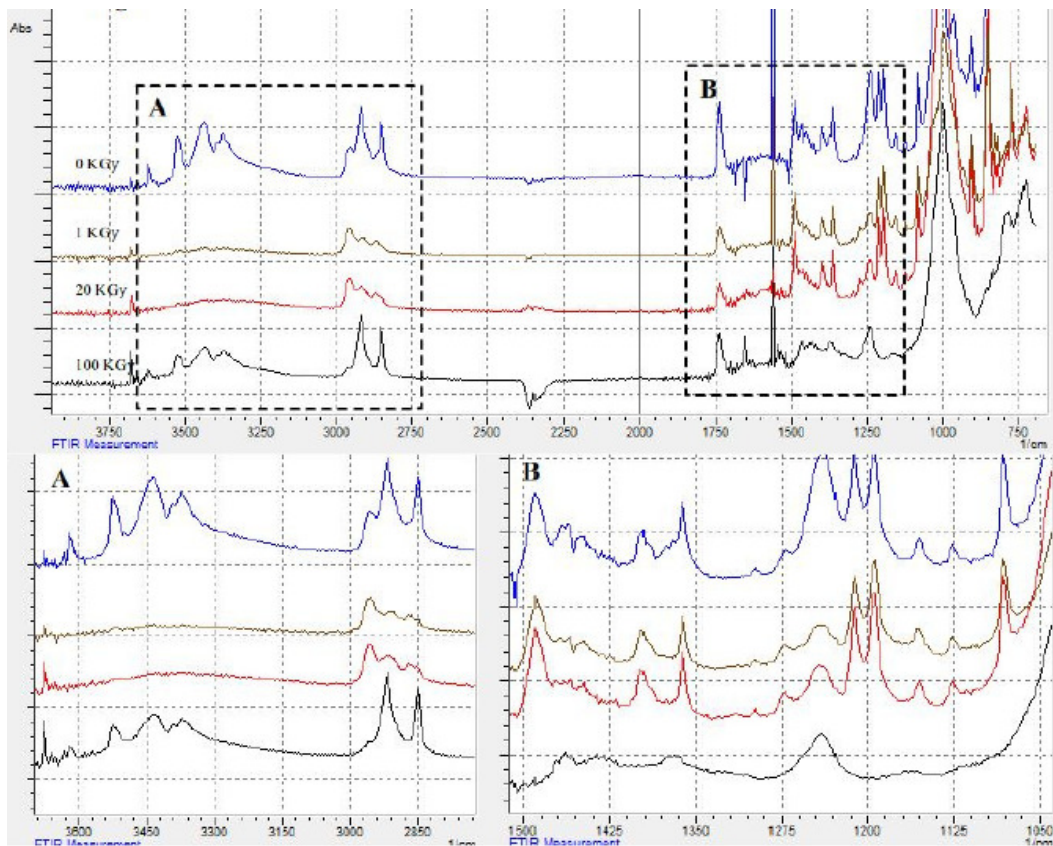


Figura 23: Detalle de espectros de muestras de LSOH 70 aislación

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material LSOH 70 de envoltura.

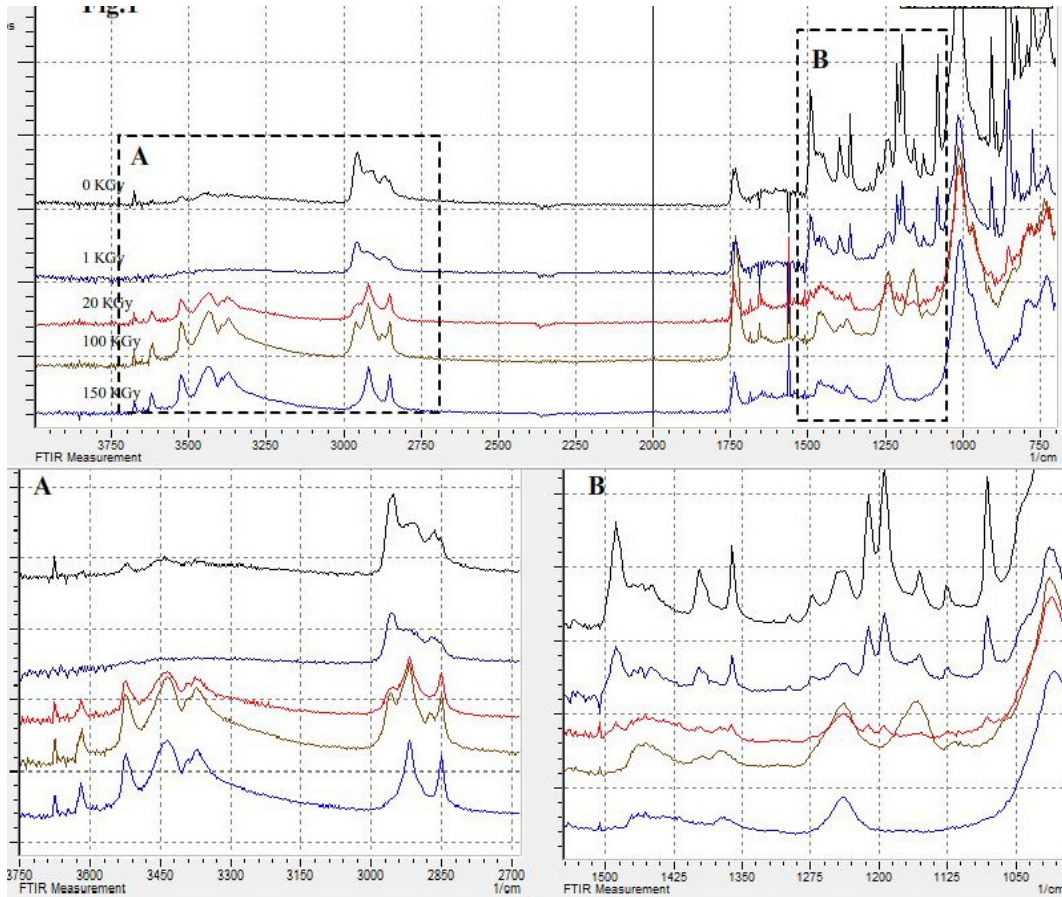


Figura 24: Detalle de espectros de las muestras de LSOH 70 de envoltura.

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material LSOH 90 de aislación

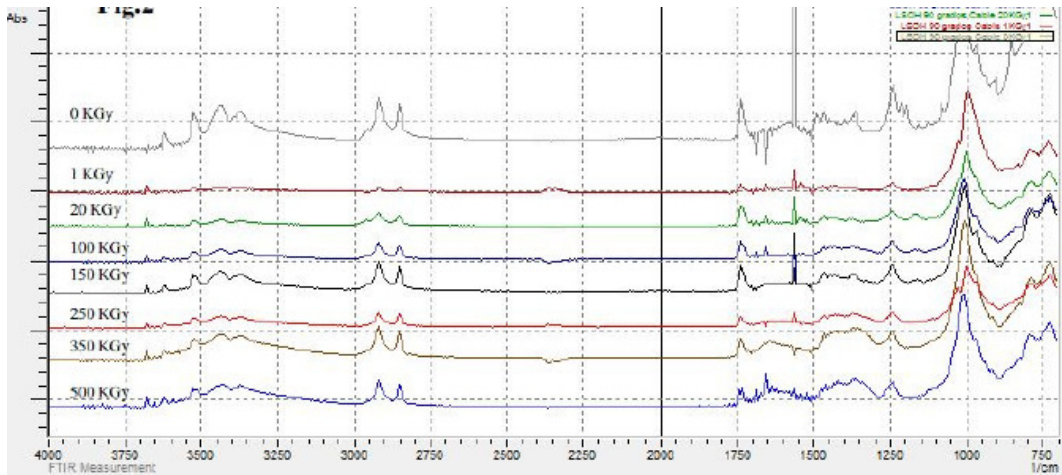


Figura 25: Espectros a diferentes dosis de muestras de LSOH 90 aislación.

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material LSOH 90 de envoltura.

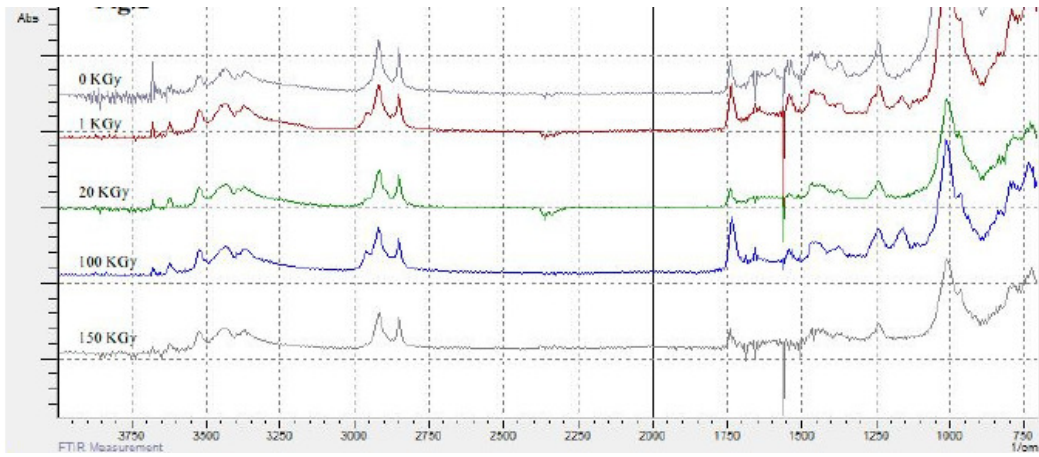


Figura 26: Espectro de las muestras de LSOH 90 envoltura

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material EPR.

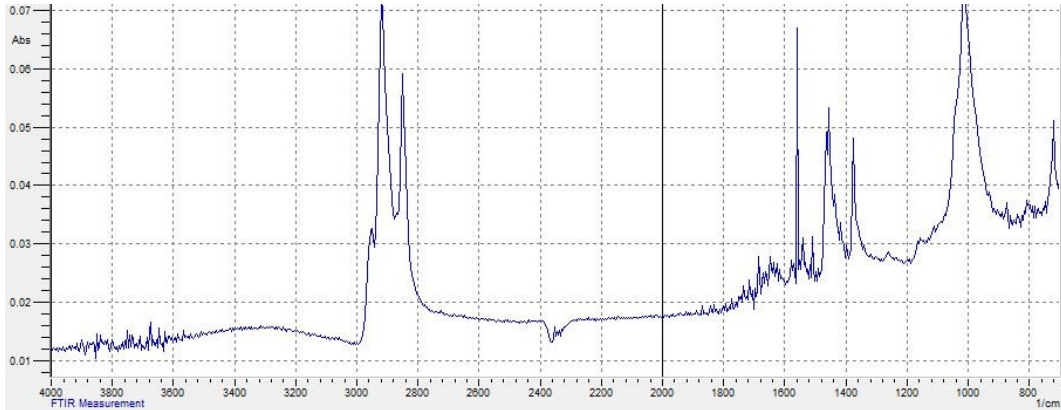


Figura 27: Espectro de EPR sin irradiar

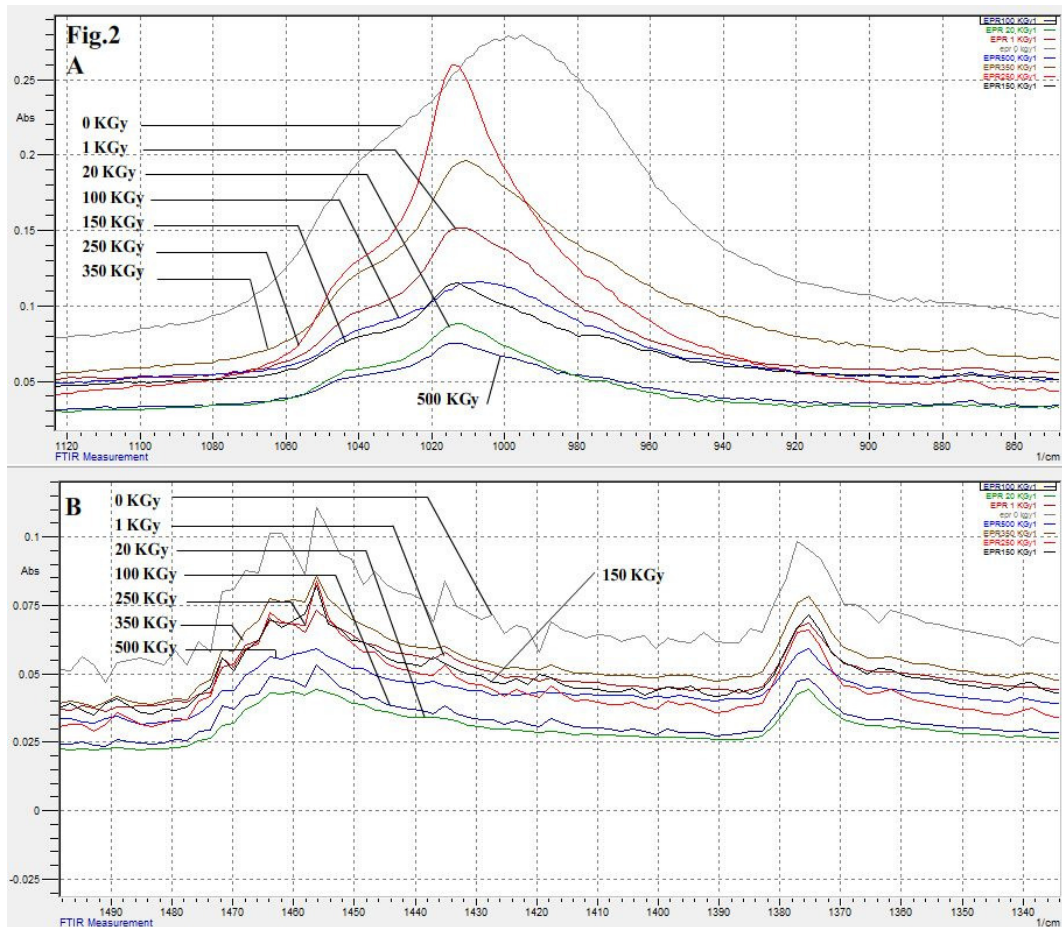


Figura 28: Detalle de espectro de EPR a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material GFR.

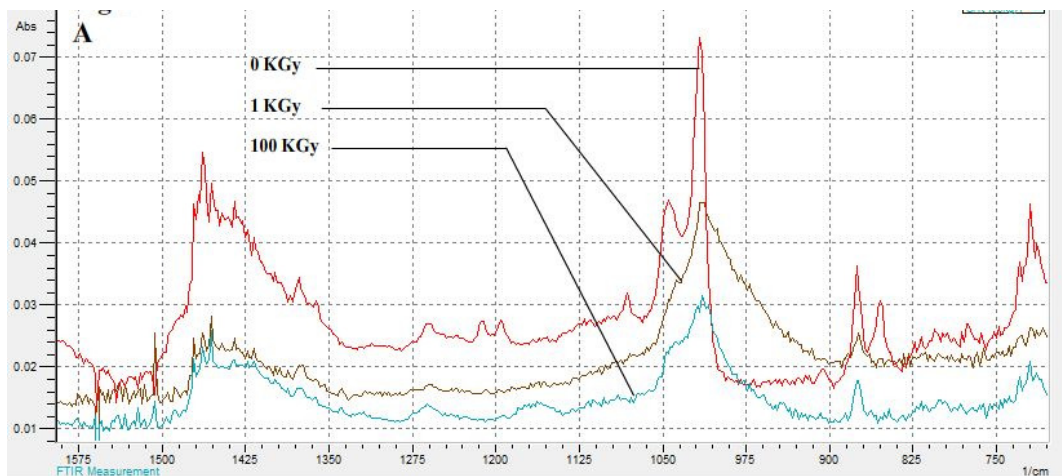


Figura 29: Espectro de las muestras de GFR a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material XLPE – azul:

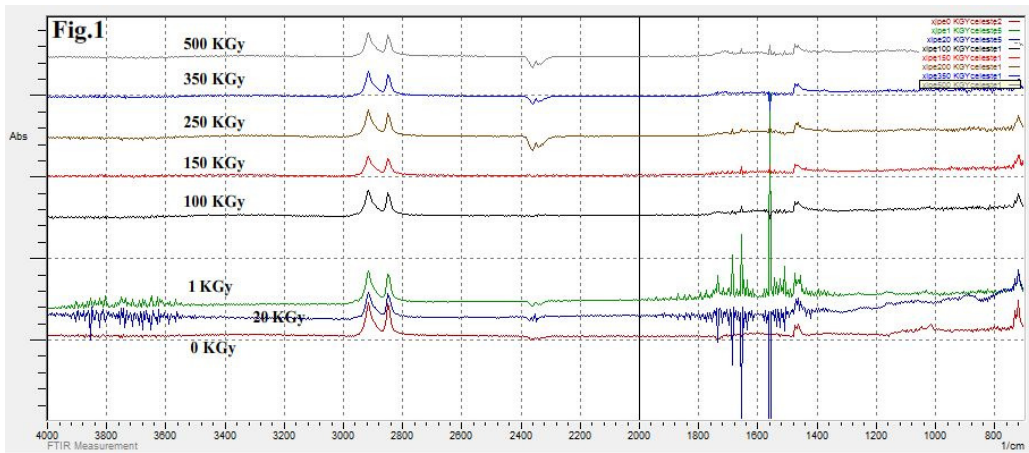


Figura 30: Espectros de XLPE azul a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material XLPE – rojo:

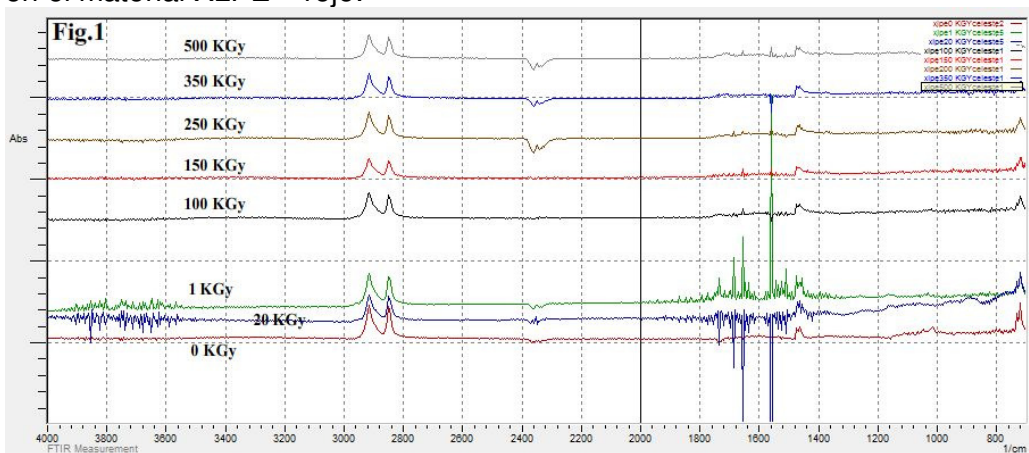


Figura 31: Espectros de XLPE rojo a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material XLPE marrón:

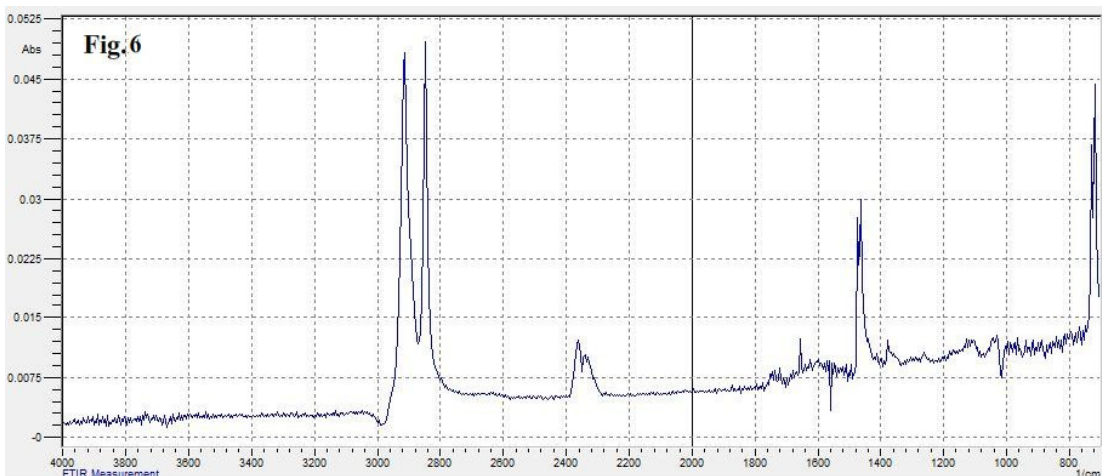


Figura 32: Espectro de XLPE marrón sin irradiar

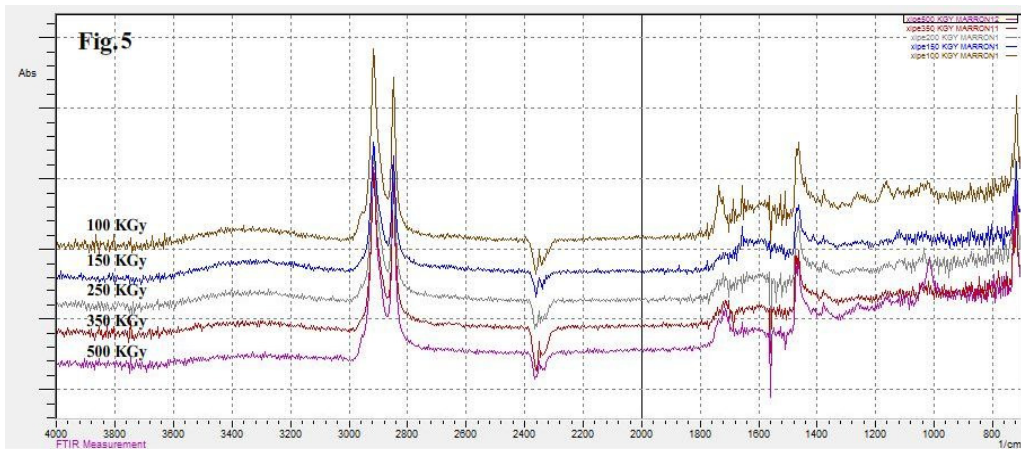


Figura 33: Espectros de XLPE marrón a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material XLPE - negro:

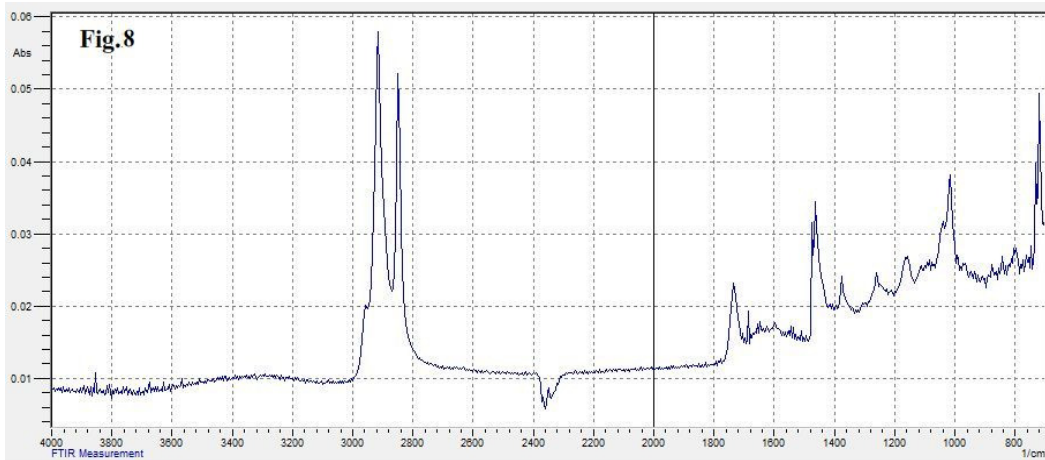


Figura 34: Espectro de XLPE negro sin irradiar

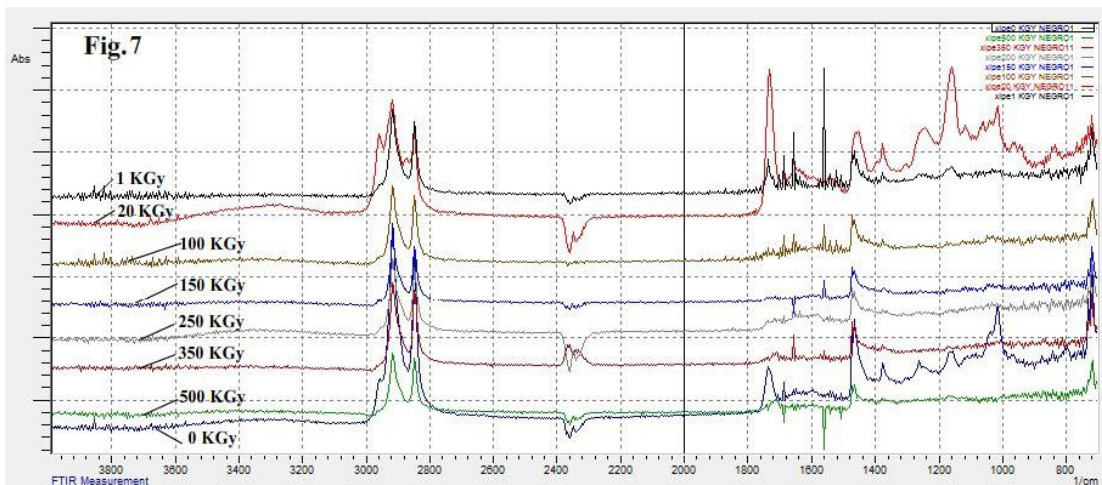


Figura 35: Espectros de XLPE negro a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material TPU:

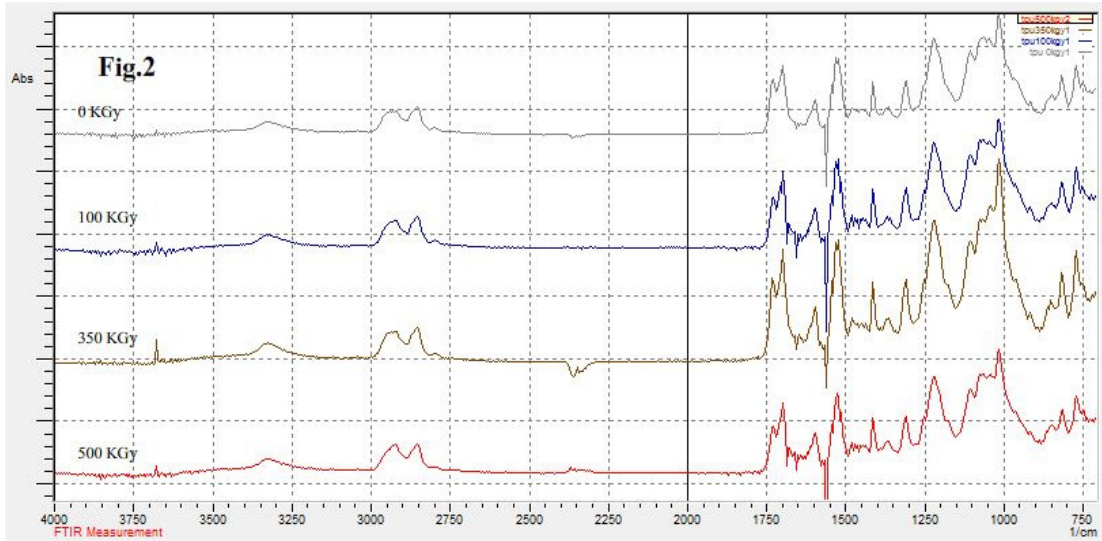


Figura 36: Espectros de TPU a distintas dosis

Se muestran a continuación los resultados más significativos efectuados en el material SiR nacional:

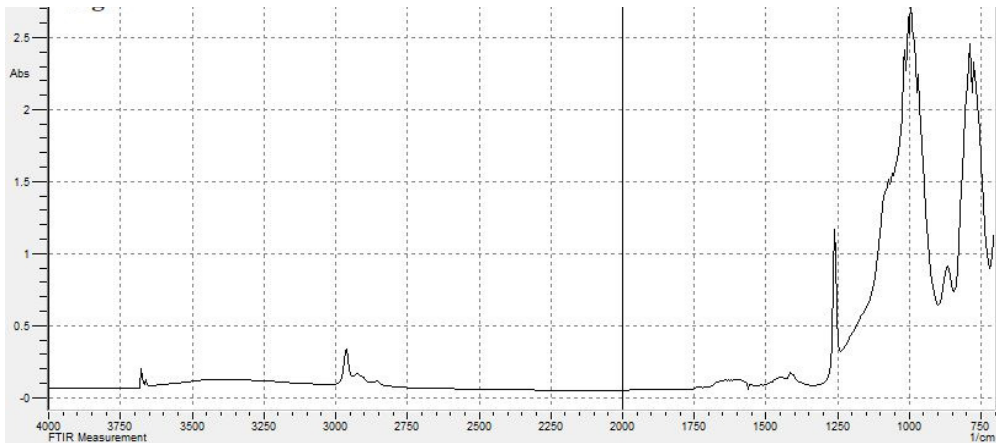


Figura 37: Espectro de las muestras de SiR nacional sin irradiar

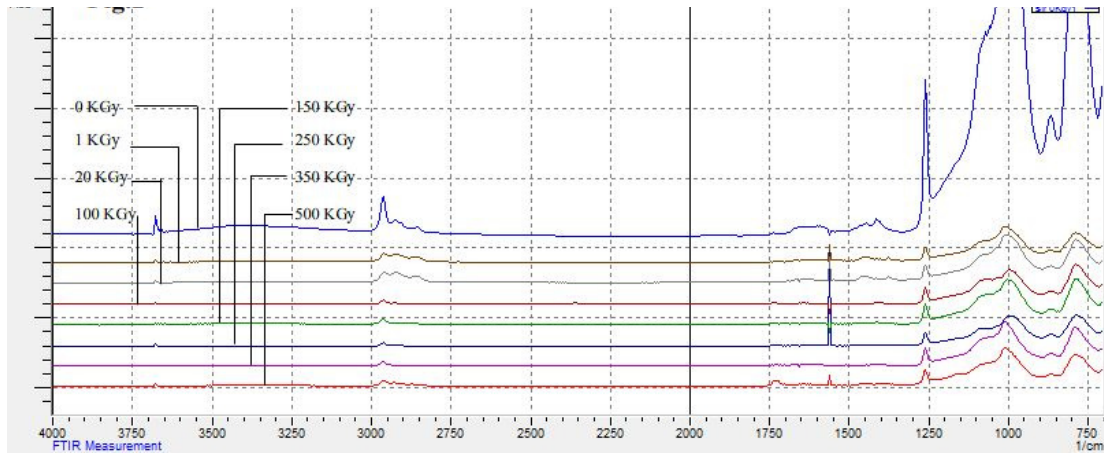


Figura 38: Espectro de las muestras de SiR nacional a distintas dosis

c. Ensayos mecánicos

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos mecánicos. Para mayor simplificación y síntesis se presentan sólo de forma gráfica la evolución de la elongación a la rotura de los materiales ensayados. Los resultados experimentales fueron ajustados con la siguiente ecuación usada frecuentemente para este tipo de análisis para el ajuste de la curva de elongación a rotura en función del tiempo/dosis absorbida:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} + A_2$$

donde

y: variable dependiente; en este caso, elongación a la rotura.

A1, A2, x₀, p parámetros a ajustar

x: variable independiente en este caso dosis absorbida a tasa de dosis constante.

En los siguientes gráficos (Figura 39 a Figura 52) pueden observarse los valores experimentales obtenidos (en cuadrados), en barra de error la desviación estándar y en línea continua los valores de ajustada. En las Figura 51 y Figura 52 pueden verse las curvas ajustadas para todos los materiales. Para estos dos gráficos tanto las barras de error como valores experimentales fueron omitidos para mayor claridad del grafico. En la Figura 52 se grafica la elongación a la rotura relativa, siendo ésta el valor obtenido al dividir el valor obtenido a distintas dosis totales por el valor de elongación a la rotura inicial (0 kGy). Esto permite compensar los distintos valores de elongación a la rotura para percibir de mejor manera la dependencia.

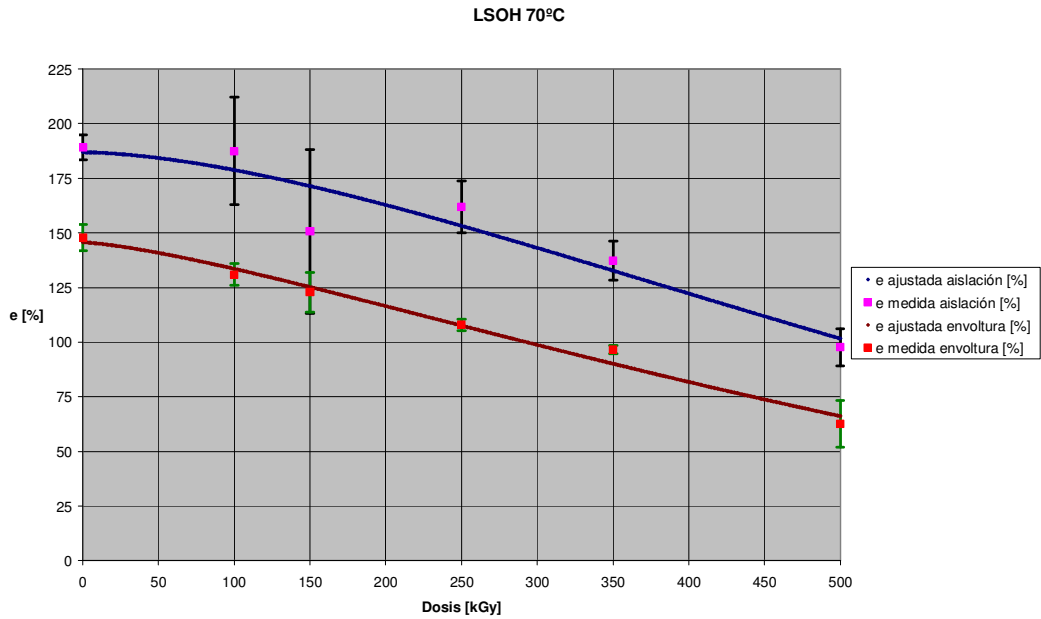


Figura 39: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material LSOH 70 aislación y LSOH 70 envoltura. Para material de la aislación en cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada. Para material de la envoltura en cuadrado rojo el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua roja la curva ajustada

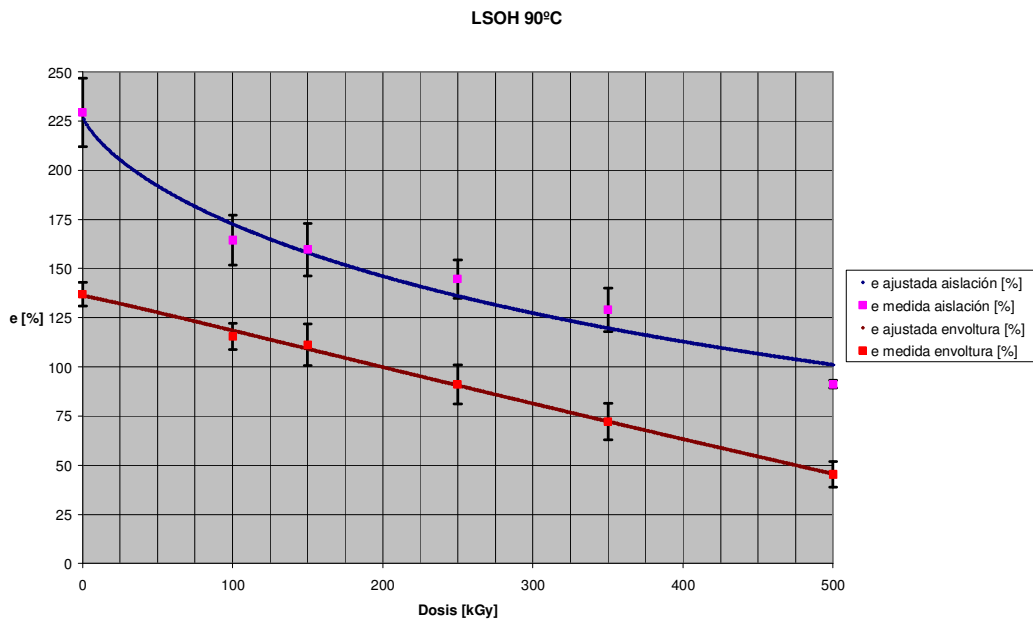


Figura 40: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material LSOH 90 aislación y LSOH 90 envoltura. Para material de la aislación en cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada. Para material de la envoltura en cuadrado rojo el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua roja la curva ajustada

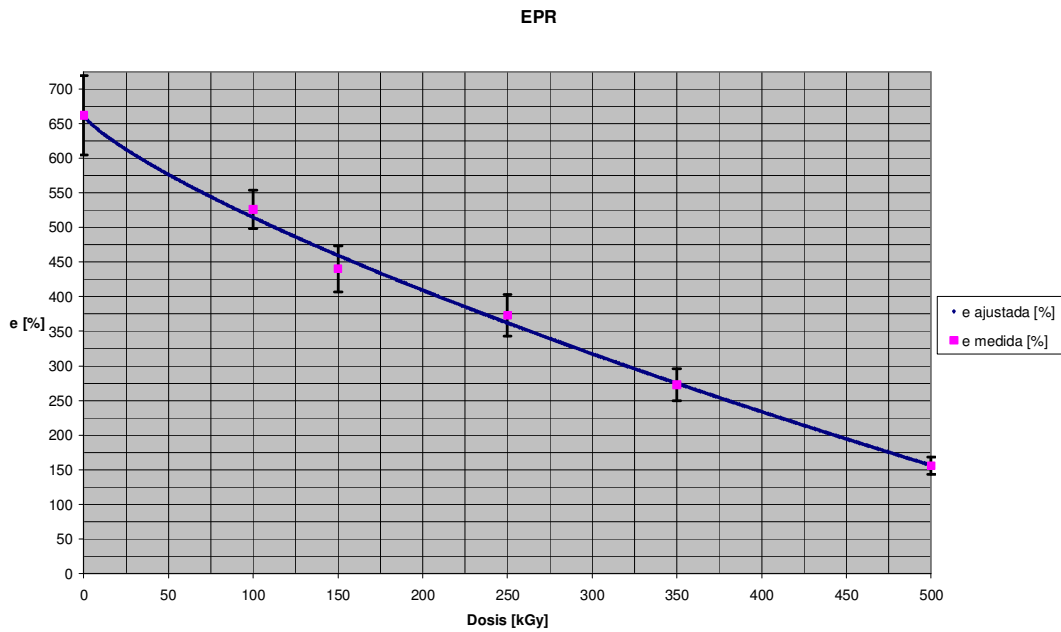


Figura 41: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material EPR. En cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada

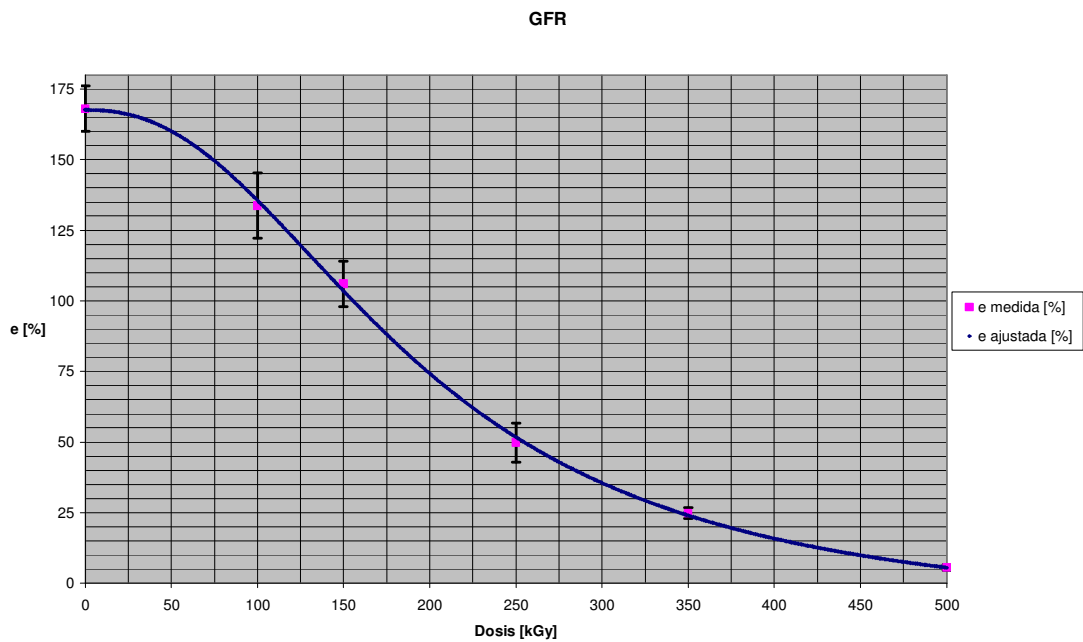


Figura 42: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material GFR. En cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada

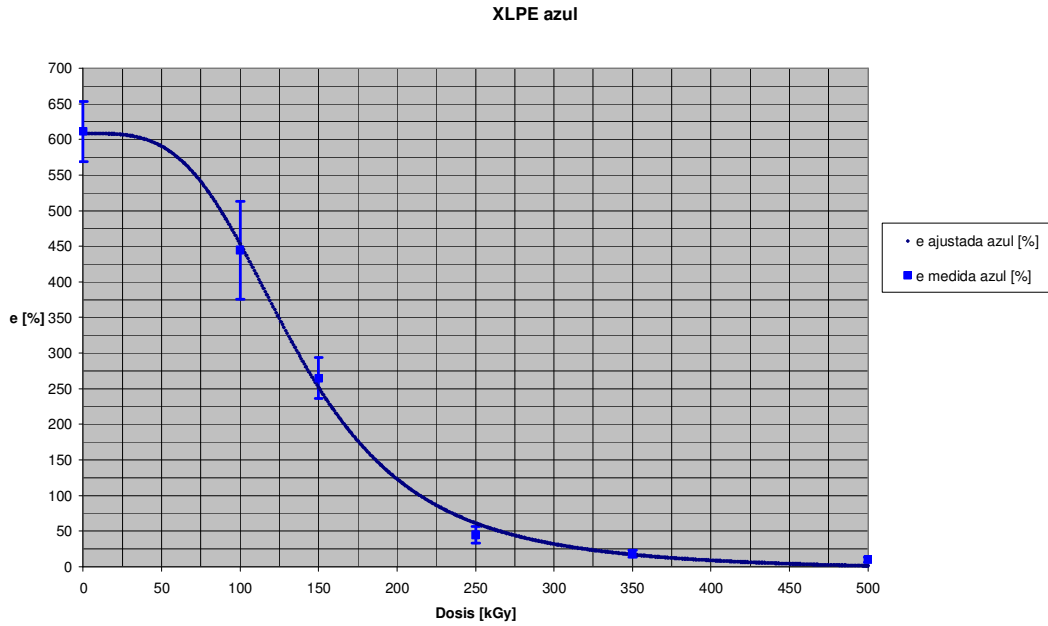


Figura 43: *Elongación a la rotura en función de dosis total absorbida para material XLPE azul. En cuadrado el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua la curva ajustada*

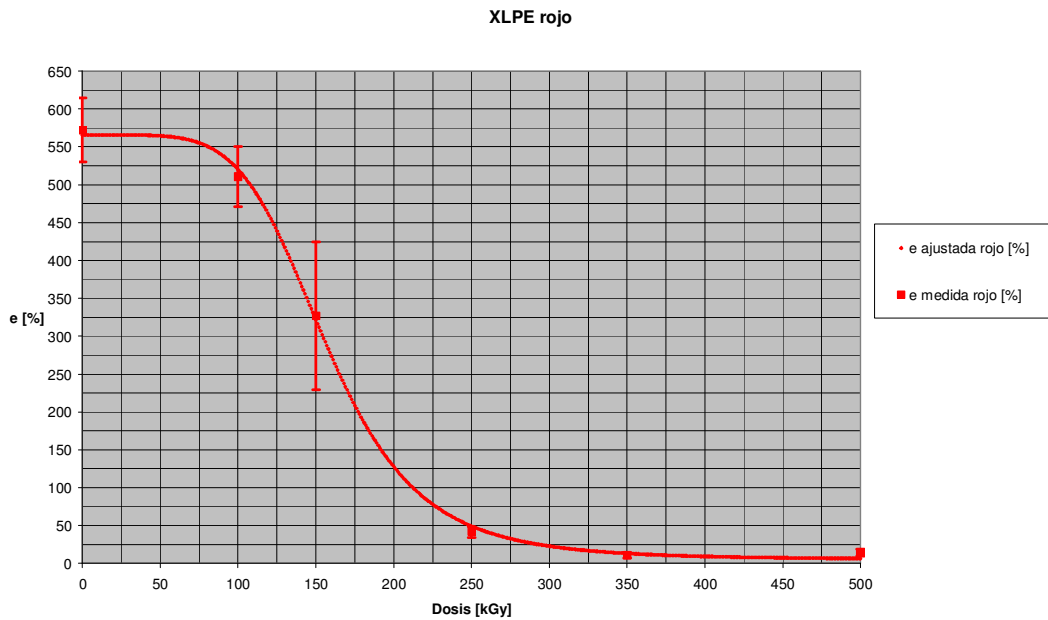


Figura 44: *Elongación a la rotura en función de dosis total absorbida para material XLPE rojo. En cuadrado el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua la curva ajustada*

XLPE marrón

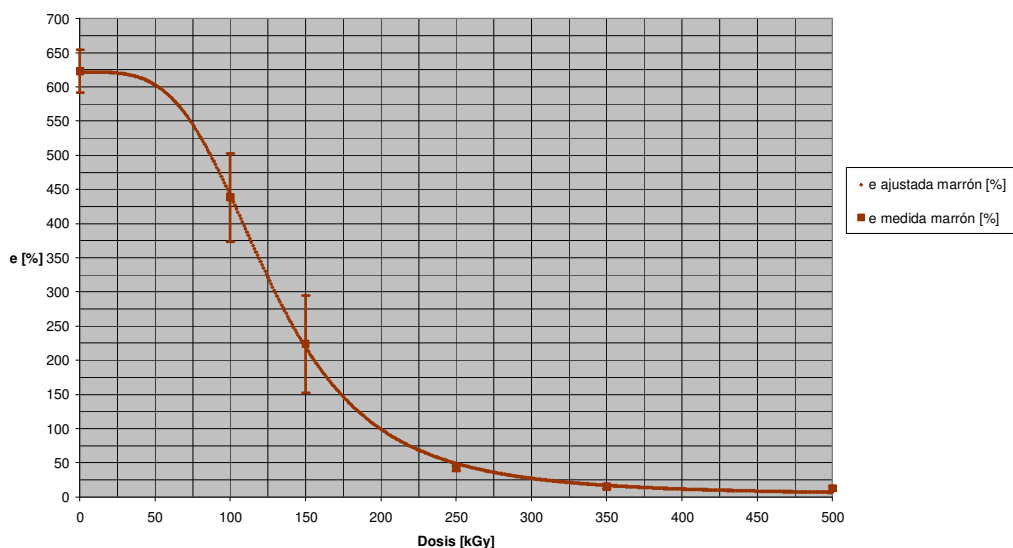


Figura 45: Elongación a la rotura en función de dosis total absorbida para material XLPE marrón. En cuadrado el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua la curva ajustada

XLPE negro

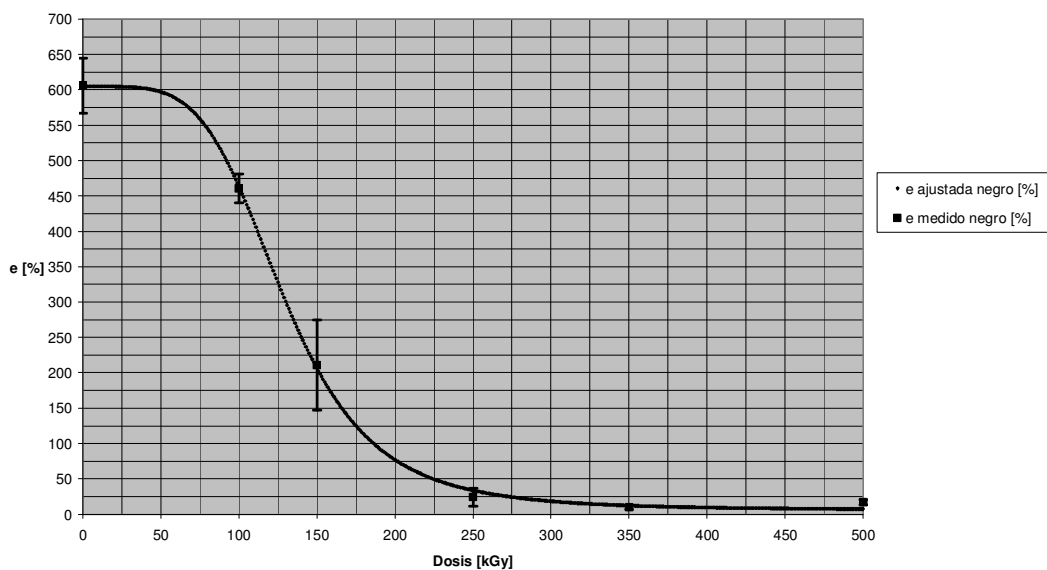


Figura 46: Elongación a la rotura en función de dosis total absorbida para material XLPE negro. En cuadrado el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua la curva ajustada

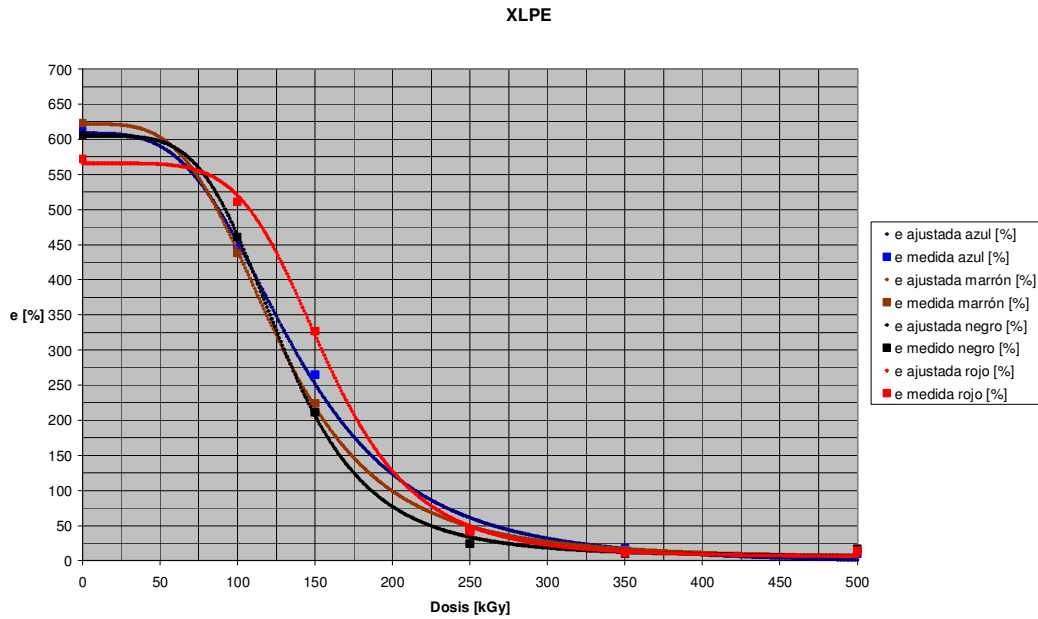


Figura 47: Elongación a la rotura en función de la dosis total absorbida para material XLPE, para los cuatro colores. En cuadrado el valor promedio medido y en línea continua azul la curva ajustada, el color del cuadrado y la línea continua coinciden con color de la aislación correspondiente. Las barras de error fueron omitidas para mayor claridad.

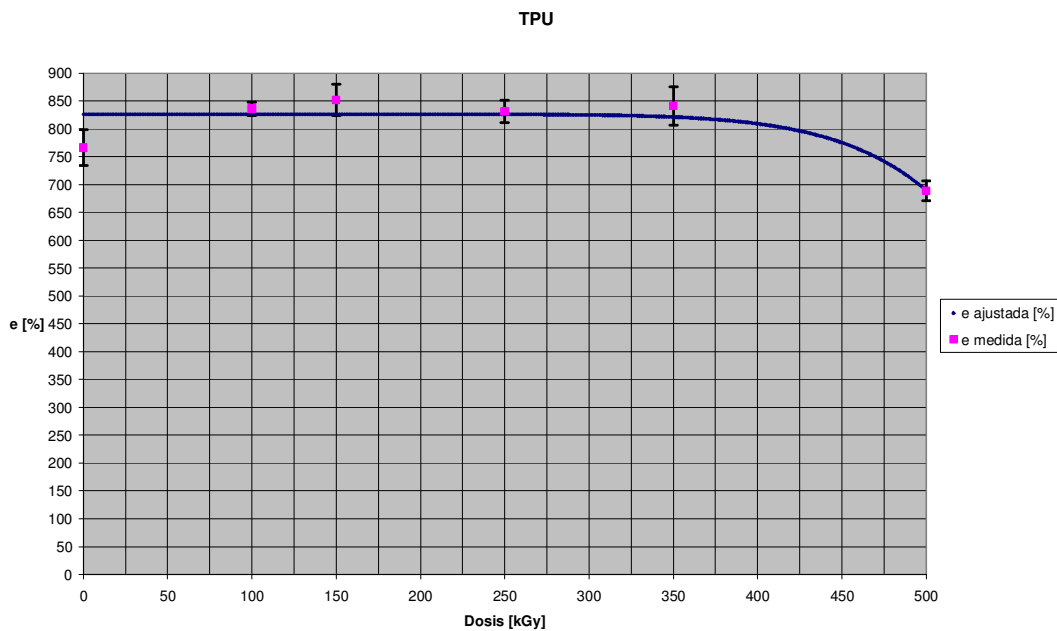


Figura 48: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material TPU. En cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada

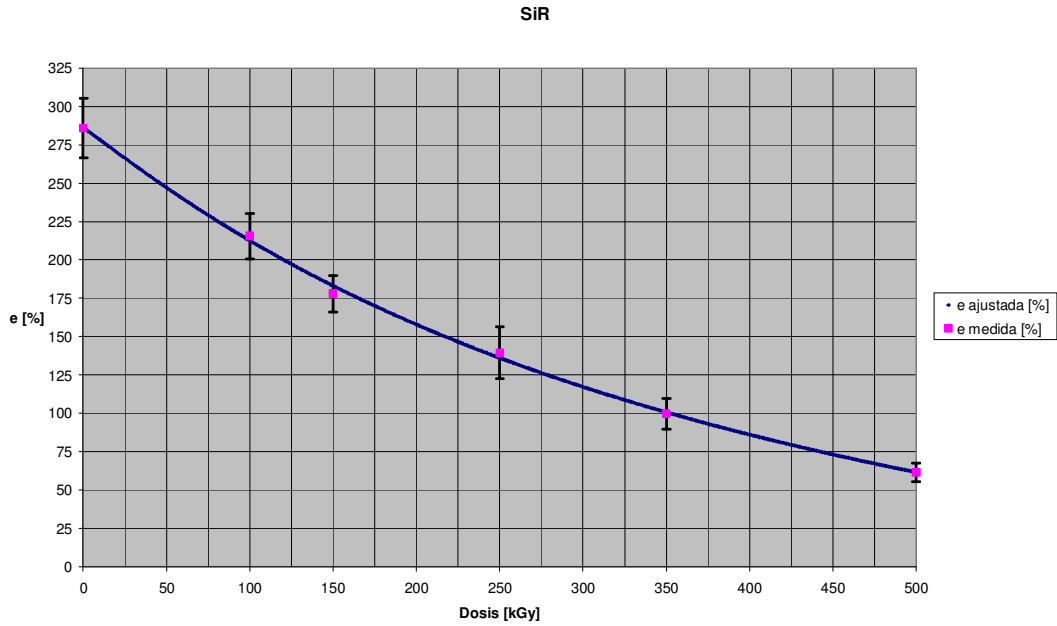


Figura 49: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material SiR nacional. En cuadrado fucsia el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada

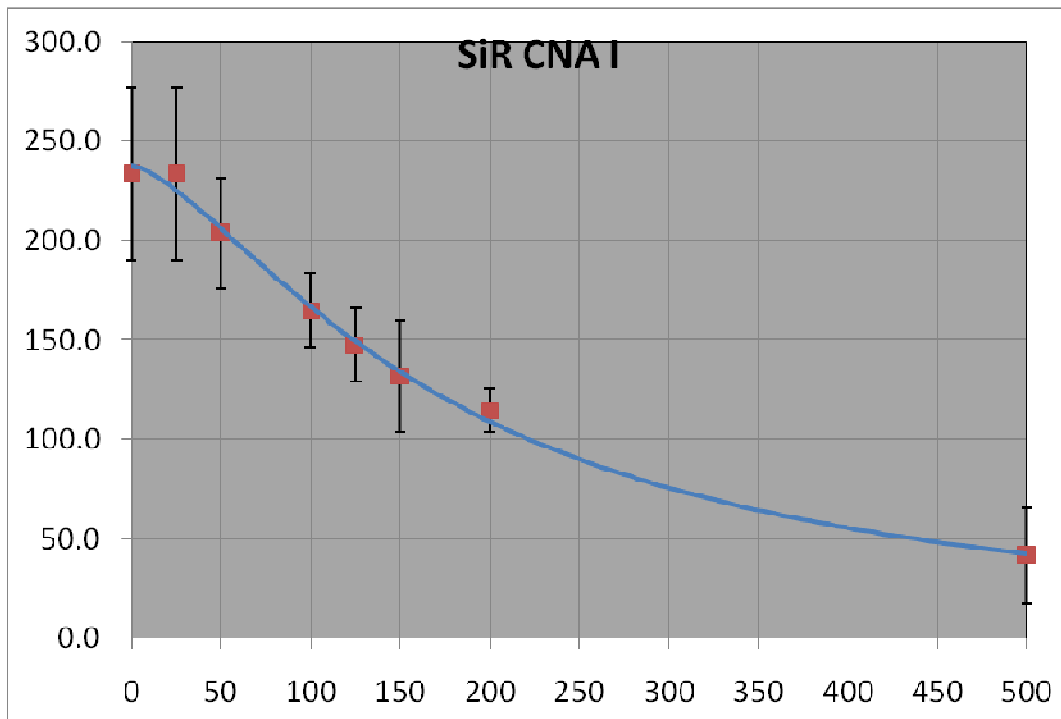


Figura 50: Elongación a la rotura en función de la dosis total para material SiR CNA I. En cuadrado rojo el valor promedio medido con su correspondiente barra de error y en línea continua azul la curva ajustada

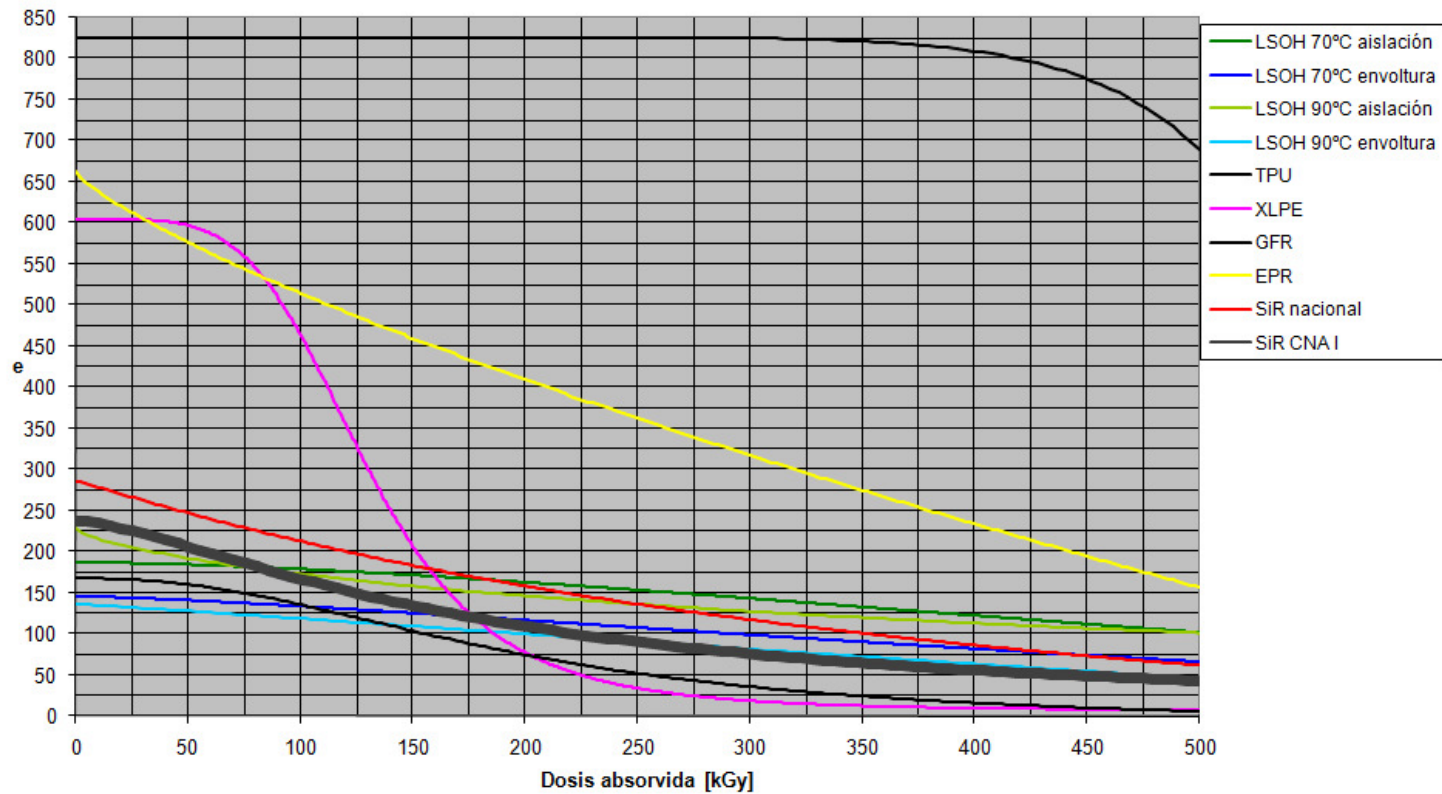


Figura 51: *Elongación a la rotura en función de la dosis total para todos los materiales. Para el caso de XLPE se tomo una curva promedio de los materiales de distinto color. Se destaca en línea gruesa la evolución de la elongación del material SiR CNA I*

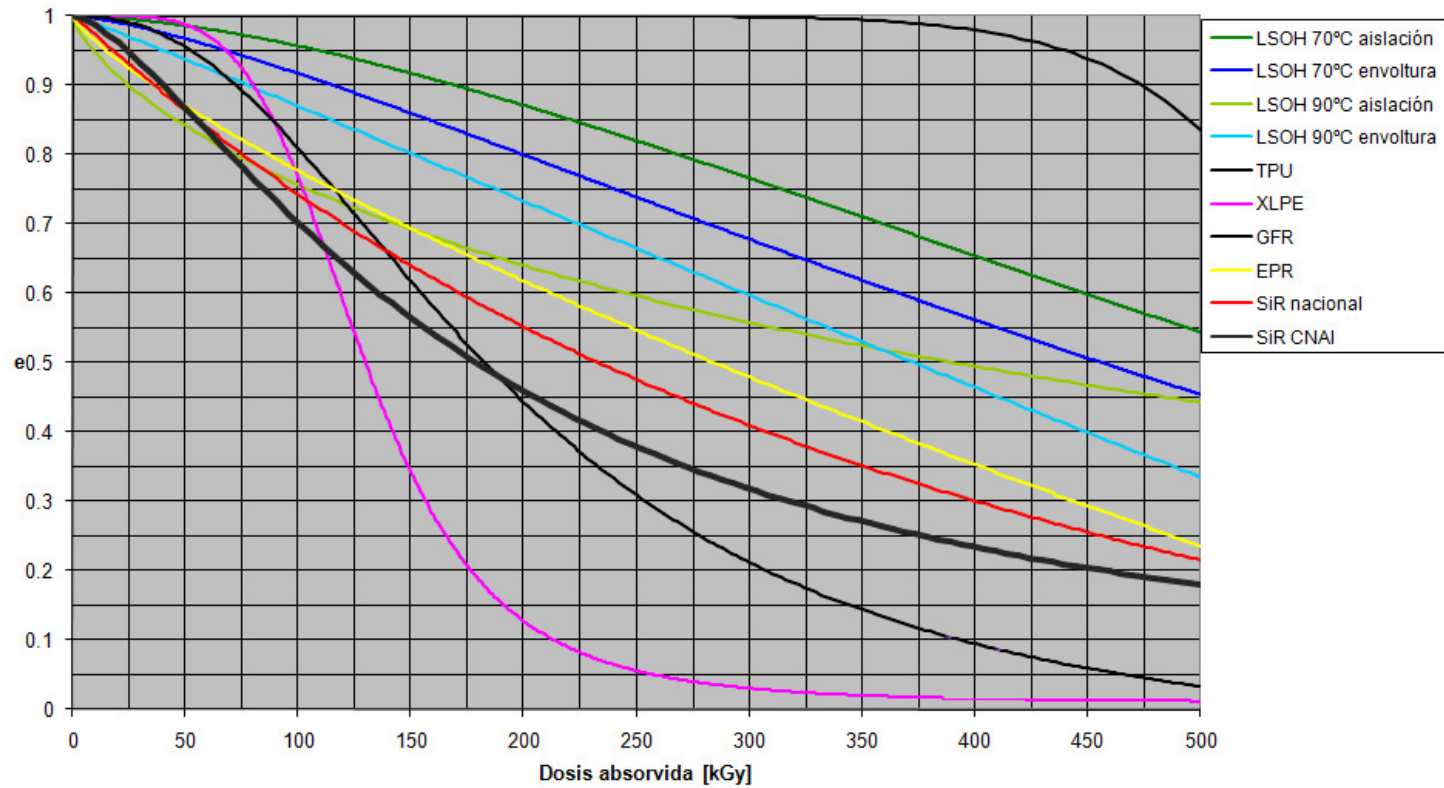


Figura 52: *Elongación a la rotura relativa en función de la dosis total para todos los materiales. Para el caso de XLPE se tomo una curva promedio de los materiales de distinto color. Se destaca en línea gruesa la evolución de la elongación a la rotura relativa del material SiR CNAI*

Para el material LSOH 90 envoltura se estudió, además, la variación de módulo tensil con la dosis absorbida. Los módulos tensiles se calcularon a partir de los ensayos de tracción. Se calculó la pendiente de la regresión lineal correspondiente a los primeros estadios de deformación de las muestras, Figura 53

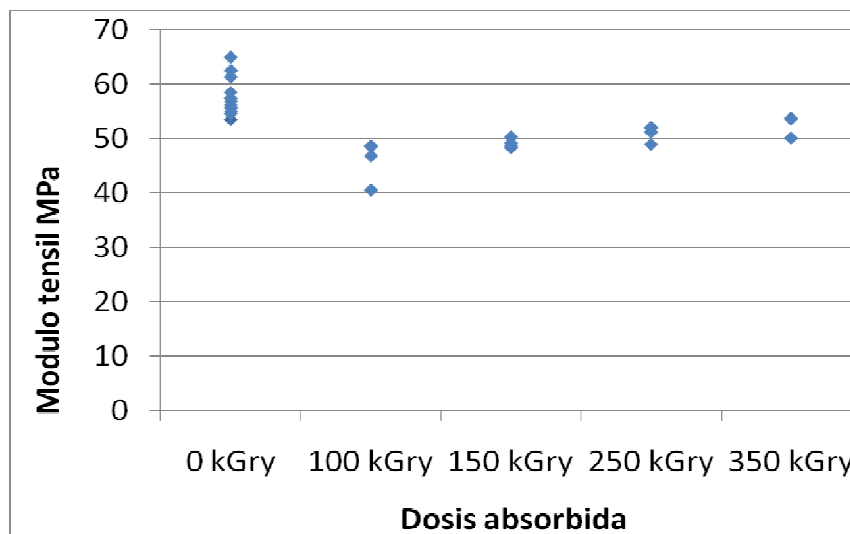


Figura 53: Evolución de módulo tensil con la dosis para LSOH 90 envoltura. En eje de ordenadas módulo tensil en MPa, en eje de abscisas dosis absorbida. En rombos azules los valores calculados. Diez valores para condiciones iniciales y 5 valores por cada condición de envejecimiento acelerado.

d. Análisis de resultados

Los resultados de **nanoindenter** realizados (Figura 14 a Figura 21) mostraron una dispersión del valor del módulo elástico a lo largo del espesor sin ninguna tendencia. Estos resultados indican que la degradación alcanzada, dadas las condiciones de envejecimiento, fue homogénea.

En cuanto a los resultados de los ensayos de **FTIR** en términos generales no mostraron tendencias significativas con el envejecimiento para ser considerados como una posible técnica de monitoreo. A continuación se analizan los resultados por cada tipo de material

LSOH 70 aislación

Se observó la formación y desaparición de múltiples picos al aumentar la dosis de 0kGy a 100kGy.(Figura 22 y Figura 23) No se observaron cambios significativos en el espectro de absorbancia para dosis mayores a 100kGy

LSOH 70 envoltura

Se observó la aparición y desaparición de una gran variedad de picos como efecto de la radiación gamma Figura 24. No se observaron cambios significativos en el espectro de absorbancia para dosis mayores a 150kGy. Si bien la aparición de dichos picos mostraría un posible indicador el mismo

aparece en estadios muy tempranos, cuando no hay un nivel de degradación relevante, y permanece constante a lo largo de las dosis absorbidas.

LSOH 90 aislación

No se observó la formación ni desaparición de picos al aumentar la dosis de radiación Gamma Figura 25.

LSOH 90 envoltura

No se detectaron cambios en el espectro de absorbancia para dosis mayores a 150kGy Figura 26. Se identificó la formación y desaparición de picos para distintas dosis dentro del intervalo (1000 – 1250)cm⁻¹

EPR

Se observaron todos los picos característicos del EPR. En 999,8 cm⁻¹ y 1032,2 cm⁻¹ se pueden observar dos picos no esperados para dicho material (Figura 27). Puede deberse a la presencia de uniones de sílice (posiblemente debido a un agente de entrecruzamiento o carga mineral).

Se observó corrimiento y deterioro de los picos de los picos 999,8 cm⁻¹ y 1032,2 cm⁻¹ a partir de 1 kGy (Figura 28). También se observó degradación de picos 1462,0 cm⁻¹ y 1456,1 cm⁻¹ en el intervalo (1440 – 1500) cm⁻¹. En ambos casos, estos deterioros y corrimientos fueron atribuidos a la irradiación de las muestras.

Según bibliografía consultada [Ref 15], se esperaba que aparecieran picos debidos a la formación de uniones carbono – oxígeno y carbono – hidroxilo producto de la oxidación del material durante la irradiación del mismo. Sin embargo, estos picos no fueron observados.

GFR

Se observó en general la desaparición y formación de picos en el rango de número de onda (875 – 1325) cm⁻¹ sin tendencia, Figura 29.

XLPE azul

No se registraron formaciones de picos nuevos. Es posible que pequeños cambios producidos por el efecto de la radiación hayan sido solapados por el ruido de las mediciones, Figura 30

XLPE rojo

No se detectó la formación ni desaparición de picos al aumentar la dosis de radiación recibida por las muestras. Figura 31

XLPE marrón

Se descartaron los resultados obtenidos para las muestras de 1 y 20 KGy debido a la aparición de un pico (2961,9 cm⁻¹) que no es característico de XLPE. La aparición de estos picos puede deberse a ruido producido por la presencia de la cinta adhesiva usada para contener las muestras. No se detectaron cambios significativos en el espectro de absorbancia al aumentar la dosis, Figura 32 y Figura 33.

XLPE negro.

No se detectaron cambios significativos debidos al efecto de la radiación gamma en las muestras (Figura 34 y Figura 35). Las muestras de 0kGy y 20kGy debieron ser descartadas debido al exceso de ruido.

Adicionalmente, los picos que se encuentran en el rango 1400 cm^{-1} a 1480 cm^{-1} no pudieron ser bien determinados. Los picos que pueden observarse entre 1000 cm^{-1} y 1200 cm^{-1} aparecen cuando el polietileno es entrecruzado con silicio, que es el caso para este material.

TPU.

Se hallaron todos los picos característicos del TPU en el espectro de absorbancia de TPU sin irradiar. Se detectó un pico no esperado en 1014 cm^{-1} , probablemente asociado a la presencia de silicio o cloro. Al progresar el envejecimiento del TPU no se observaron cambios en el espectro de absorbancia obtenido por FTIR, Figura 36.

SiR nacional.

El espectro contiene, como era esperado, los picos característicos de la goma siliconada. No se detectó la aparición o desaparición de picos al aumentar la radiación. La aparición del pico 1558 cm^{-1} es ruido producido por la presencia de humedad Figura 37 y Figura 38

Finalmente, los ensayos de **Elongacion de Tracción** fueron realizados con éxito, determinándose los distintos valores de **Elongación a la Rotura**. Dicho parámetro mostró en todos los casos seguir perfectamente la evolución de la degradación (Figura 39 - Figura 50). Fue posible ajustar la evolución de la elongación a la rotura con la dosis con curvas de ajuste de bibliografía con un muy buen acuerdo para todos los materiales.

Al analizar la respuesta del conjunto de los materiales (Figura 51) se ve que, salvo el XLPE, todos los materiales tienen una caída suave, lo cual los hace prometedores para la ejecución de programas de gestión de envejecimiento. Por otra parte se observa que todos los materiales salvo el XLPE y el GFR llegan al final del envejecimiento con valores absolutos de elongación a la rotura superiores a los del material SiR CNAI. Al observar el gráfico normalizado, Figura 52, se puede apreciar que además del XLPE el material GFR tiene una cinética de caída de elongación a la rotura muy marcada.

Al comparar la respuesta de todos los materiales con el SiR CNAI (Figura 52), de experiencia probada en campo, se ve que el material SiR nacional, presenta una cinética totalmente análoga al material de referencia. Los materiales LSOH 70 aislación, LSOH 70 envoltura, LSOH 90 envoltura y EPR tienen evoluciones muy similares entre sí y satisfactorias al compararlos con el material SiR CNAI.

Para el caso del material LSOH 90 aislación se observa una caída más pronunciada al principio y luego un decrecimiento en la velocidad de degradación.

Finalmente el material TPU confirmó la excelente resistencia a la radiación del Poliuretano. Para este caso, una dosis de 500kGy no parece ser suficiente para generar un nivel de degradación apreciable a través de los ensayos de envejecimiento acelerado.

En cuanto a la evolución del módulo tensil con la dosis absorbida para el material LSOH 90 envoltura se puede ver (Figura 53) una gran dispersión de valores iniciales y una leve tendencia con la dosis absorbida. Esta tendencia es de aumento de módulo, es decir rigidización del material; si bien el solapamiento de los valores es marcado los valores medios mostrarían un aumento a partir de los 100 kGy en adelante.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran un futuro prometedor para hallar alternativas nacionales para el reemplazo de cables en centrales nucleares. Si bien sólo se realizaron ensayos de envejecimiento acelerado por radiación, materiales tales como LSOH 70 aislación, LSOH 70 envoltura, LSOH 90 aislación y LSOH 90 envoltura muestran ser prometedores debido a su probada resistencia a la degradación térmica.

Es recomendable para estos materiales realizar envejecimientos acelerados térmicos de forma secuencial o simultánea con el envejecimiento por radiación para tener una mejor caracterización de la degradación de estos materiales.

En cuanto al material LSOH 90 envoltura, parece existir una cierta tendencia del módulo tensil con el envejecimiento, lo cual podría hacer a los cables recubiertos con dicho material, candidatos a la aplicación de la técnica de módulo de indenter [Ref 1, Ref 8, Ref 12] de aplicación en centrales argentinas [Ref 9].

AGRADECIMIENTOS

A la CNEA, especialmente a la Gerencia de coordinación de proyectos CNEA-NASA y al instituto Dan Beninson (CNEA-UNSAM) por permitir que lleve a cabo esta especialización.

A la Dra Ana Fortis, directora de este trabajo, por su tiempo y dedicación en este trabajo.

Al personal de Marlew, especialmente al Ingeniero Nestor Marchi, y al personal de NA-SA, especialmente al Ingeniero Mario Sabransky, por el acceso a tan valiosas muestras.

Al personal de dosimetría, especialmente a la Dra Eva Pawlak, y de la Planta de Irradiación Semi Industrial, especialmente a Victor Raverta, ambos del Centro Atómico Ezeiza por su colaboración para las irradiaciones.

A la Dra Cecilia Fuertes por su colaboración en las mediciones de nanoindentación.

A la Dra Mariela del Grosso por su su colaboración en las mediciones de FTIR.

Finalmente a mi esposa por su ayuda y apoyo incondicional sin la cual este trabajo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

Ref 1: IAEA, 2000. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment and instrumentation cables, IAEA-TECDOC-1188, IAEA Vienna, December 2000

Ref 2: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 323-2003, IEEE, New York (2003)

Ref 3: NUREG-1801, Vol. 1, Rev. 1 Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report. Summary. Division of Regulatory Improvement Programs Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555-0001. September 2005

Ref 4: NUREG-1801, Vol. 2, Rev. 1 Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report. Tabulation of Results. Division of Regulatory Improvement Programs Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555-0001. September 2005

Ref 5: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard for Qualification Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 383-2003, IEEE, New York (2003).

Ref 6: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Nuclear Power Plants/Electrical Equipment of the Safety System — Qualification, Rep. IEC 60780, 2nd ed., IEC, Geneva (1998).

Ref 7: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing, Safety Reports Series No. 3, IAEA, Vienna (1998).

Ref 8: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants, NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.6, IAEA, Viena (2012)

Ref 9: Reunión anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Programa de gestión de envejecimiento de cables para la Central Nuclear Atucha II (CNA II), Zorrilla J., Antonaccio E., Luraschi C., Simionato H., Nieto H. Buenos Aires (Diciembre de 2012)

Ref 10: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Guide for Designing Multistress Aging Tests of Electrical Insulation in-a Radiation Environment, IEEE Std 775-1993, IEEE, New York (1993)

Ref 11: SCC and Cable Ageing Project (SCAP) — Final Report, AEN/NEA (2010), www.oecd-nea.org

Ref 12: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION/ INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEC/ IEEE, Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety –Electrical equipment condition monitoring methods, Rep. IEC/IEEE 62583, 1st ed., Geneva (2012).

Ref 13: SANDIA REPORT, SAND2005-7331, Nuclear Energy Plant Optimization (NEPO) Final Report on Aging and Condition Monitoring of Low-Voltage Cable Materials, Kenneth T. Gillen, Roger A. Assink, Robert Bernstein.

Ref 14: JNES-SS-0903: The Final Report of The Project of “Assessment of Cable Aging for Nuclear Power Plants”. July 2009.

Ref 15: 1A. Rivaton , S. Cambon, J.-L. Gardette, “Radiochemical ageing of EPDM elastomers. 2. Identification and quantification of chemical changes in EPDM and EPR films c-irradiated under oxygen atmosphere”. Laboratoire de Photochimie Mole´culaire et Macromole´culaire, UMR CNRS 6505, Universite´ Blaise Pascal (Clermont-Ferrand), F-63177 Aubie`re Cedex, France, 2004