

MÉTODO ALTERNATIVO PARA CUANTIFICAR EL DETERIORO DEL PAPEL DE TRANSFORMADOR ENVEJECIDO EN ACEITE MINERAL

I.A. Carrascal^{1*}, J.A. Casado¹, S. Diego¹, I. Fernández², A. Ortíz², J. A. Sainz-Aja¹, C.F. Diego²

¹LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

* Persona de contacto: isidro.carrascal@unican.es

²Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria.
E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Av. Los Castros s/n, 39005 Santander, España

RESUMEN

En la mayoría de los transformadores eléctricos de potencia se emplea papel dieléctrico como componente sólido del sistema de aislamiento, entre los conductores de devanado, el espacio entre devanados y del devanado a tierra. Los transformadores bañados en aceite normalmente tienen un rango de temperatura de funcionamiento de 60-90 °C. Estas temperaturas de servicio pueden causar la degradación lenta, tanto del aceite, como, del aislamiento sólido durante la vida útil del transformador con pérdida de las propiedades mecánicas y eléctricas. En este sentido, se plantea en este trabajo la posibilidad de analizar la degradación del papel en base a la pérdida de sus propiedades mecánicas. Se realizará un envejecimiento acelerado del papel en aceite mineral para temperaturas de 110, 130 y 150 °C hasta tiempos en los que se garantiza una degradación total del papel, con el objetivo de obtener información sobre la cinética de los procesos de envejecimiento. Se analiza la evolución de las propiedades mecánicas y de los mecanismos de rotura del papel en función de la temperatura y del tiempo de envejecimiento y se comparan los resultados obtenidos con el método tradicional de análisis, basado en la medida del grado de polimerización (DP) del papel.

PALABRAS CLAVE: Papel, transformador, envejecimiento, deterioro, aceite.

ABSTRACT

In most industrial transformers paper is used as the main solid insulation between the winding conductors, the space between windings and the winding to ground. Electric oil transformers typically have an operating temperature range of 60-90 °C. These service temperatures can cause slow degradation of both, the oil and the insulating paper winding, during the life of the transformer with loss of mechanical and electrical properties. In this sense, this paper proposes the possibility of analysing paper degradation based on the loss of its mechanical properties. An accelerated thermal aging of the paper in mineral oil was carried out at temperatures of 110, 130 and 150 °C during different periods of time to obtain the complete degradation of the paper, in order to obtain information on the kinetics of the aging processes. The evolution of the mechanical properties and micro mechanisms of paper breakage is analysed as a function of temperature and aging time. Finally the results obtained are compared with the traditional method of degradation analysis, based on the degree of polymerisation (DP) measurement.

KEYWORDS: Paper, transformer, aging, deterioration, oil,

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente se han utilizado materiales de celulosa en el sistema de aislamiento de los transformadores, tanto por factores económicos como por la facilidad de fabricación. En los transformadores eléctricos de potencia bañados en aceite, el papel Kraft (90% de celulosa, lignina, 6-7% y 3-4% pentosanos) es el componente sólido del aislamiento. Un transformador bañado en aceite puede contener hasta 12 toneladas de

papel y 40 toneladas de aceite. Su rango de temperatura de funcionamiento está comprendido entre 60-90°C y puede llegar a alcanzar una vida útil en operación de hasta 40 años.

Los materiales aislantes basados en celulosa han demostrado tener propiedades físicas y químicas deseables para su uso como aislantes eléctricos pero se degradan con el paso del tiempo. Por lo tanto, la degradación de los materiales de celulosa es un factor

crítico que determina la vida de un transformador. Durante su operación, los componentes del sistema de aislamiento de un transformador sufren una degradación lenta con pérdida de sus propiedades mecánicas y eléctricas.

Mientras que el estado del aceite en un transformador eléctrico puede ser evaluado directamente por ser fácilmente accesible la extracción de una muestra, desafortunadamente no ocurre lo mismo con el papel aislante. Por esta razón, ciertos productos originados durante la degradación de la celulosa (compuestos furánicos, agua, CO₂, CO, etc.) y disueltos en el aceite, se pueden utilizar para evaluar indirectamente la condición del papel aislante. Pero este método es indirecto, y tiene la importante desventaja de que depende del conocimiento de la historia del transformador y sus componentes [1-2].

Es necesaria por lo tanto, una comprensión detallada de los mecanismos de degradación de la celulosa para la interpretación significativa de los datos de envejecimiento del aislante que pueda permitir predicciones de la vida restante de papel y dar una alerta temprana de fallo prematuro.

Estas predicciones de vida a partir de datos reales recogidos de los transformadores en servicio son complejas debido al gran número de variables operacionales que pueden conducir a una considerable dispersión en los resultados [3]. En vista de esto, se recurre a simulaciones de laboratorio con el fin de proporcionar un control estricto de las variables experimentales.

Una limitación de estos experimentos isotérmicos, sin embargo, es que necesitan muchos meses para producir resultados. Para limitar la duración de estos ensayos se utilizan métodos de envejecimiento acelerado en base a un calentamiento a temperaturas superiores a la de servicio para proporcionar una visión general y rápida del proceso químico asociado con el envejecimiento del papel [4].

El método tradicional para valorar el deterioro de la celulosa es la medida del grado de polimerización (DP) a través de la medida de la viscosidad. La rotura de los enlaces de las principales cadenas de la celulosa ocasionada por el deterioro, da como resultado una disminución en el peso molecular medio de las cadenas. Este hecho no solamente ocasiona variaciones en las propiedades físicas del papel, sino que también el papel acusa una merma en sus propiedades mecánicas [5].

En este trabajo se trata de correlacionar la variación en las propiedades físicas y mecánicas con objeto de definir el grado de deterioro acumulado en el papel y de esta forma poder predecir la vida útil restante del componente.

2. MATERIAL

En este trabajo se ha trabajado con un papel Kraft con las propiedades indicadas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades papel KRAFT

Propiedades	Ud.	Valor
Gramaje	g/m ²	149,3
Espesor de relleno/5 hojas	µm	198
Densidad aparente	kg/m ³	754
Contenido de humedad	%	6,3
Índice de tracción MD	Nm/g	108,4
Contenido de cenizas	%	<0,6
Conductividad extracto acuoso	mS/m	1,5
Rigidez dieléctrica seca en el aire	kV/mm	8,9

El papel se cortó en probetas de 250 mm de longitud y 15 mm de ancho. Se cortaron probetas en dirección longitudinal, transversal y diagonal.

El aceite empleado para realizar el envejecimiento es un aceite de tipo mineral, ampliamente utilizado en los transformadores.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Envejecimiento del papel

Las probetas de papel se introducen en vasijas estancas de acero. El cierre se realiza por medio de una tapa con pernos, consiguiendo un cierre hermético gracias a unas juntas de caucho. La vasija tiene forma troncocónica con una capacidad de 1 litro y dos conexiones, una para la bomba de vacío y otra para el manómetro diferencial, (ver figura 1).



Figura 1. Vasija para envejecimiento en aceite.

Una vez cerradas las vasijas se conectan a una bomba de vacío hasta alcanzar, aproximadamente, 10 mbar. A continuación se introducen en una estufa a 100 °C durante 24 horas para proceder a su secado.

Tras el secado del papel se introducen 750 ml de aceite mineral en la vasija. Antes de envejecer las probetas, se sustituye el aire del interior de la vasija por nitrógeno para crear una atmosfera inerte que evite la entrada de aire a su interior. A continuación se realiza el envejecimiento a diferentes temperaturas: 110. 130 y

150 °C, sacando las probetas periódicamente para analizar sus propiedades. Las probetas se almacenan en recipientes plásticos herméticos para evitar que la humedad del aire contamine las muestras.

Finalizado el envejecimiento, las probetas se someten a un proceso de lavado con hexano para eliminar el aceite impregnado antes de proceder a su caracterización.

3.2. Caracterización tradicional del deterioro.

La determinación del grado de polimerización se realiza de acuerdo a ASTM D4243 [6] y UNE-EN 60450:2005/A1:2007 [7] poniendo en contacto el papel aislante, troceado hasta un tamaño lo suficientemente pequeño, con agua destilada e hidróxido de Cuen (solución acuosa comercial de hidróxido de bis (etilendiamina) cobre (II) 1 M) a partes iguales. Posteriormente tras la disolución del papel en la solución preparada se procede a determinar su viscosidad específica, a partir de este resultado se deduce la viscosidad intrínseca de la solución, y a partir de ésta se obtiene el grado de polimerización. Para ello es necesario conocer además la humedad de la muestra, ya que se requiere su peso seco.

3.3. Caracterización a tracción del papel

Para los ensayos de tracción se utilizó una máquina universal de ensayos servohidráulica con una célula de carga de ± 1 kN de capacidad, un actuador de ± 50 mm de recorrido y equipada con mordaza plana neumática. Los extremos de la probeta se protegieron con papel adhesivo para evitar que la mordaza pudiera ocasionar algún daño sobre el papel. La longitud base para la medida de las deformaciones se ajustó a 180 mm y la velocidad de ensayo se fijó en 20 mm/min hasta que se produce la rotura de la probeta [8-9]. Los parámetros obtenidos en el ensayo fueron el módulo de elasticidad, E , el límite elástico, σ_y , la tensión de rotura, σ_R , la deformación bajo carga máxima, ε_{cm} , y la energía consumida en rotura por unidad de volumen del material, E_R .

3.4. Análisis fractográfico.

Por último, las superficies de rotura de las muestras ensayadas a tracción fueron analizadas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca Carl Zeiss, modelo EVO MA15 con objeto de analizar el tipo de fractura en función del grado de deterioro de la muestra.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Modelo de envejecimiento del papel

En el gráfico de la figura 2 se muestra la evolución del grado de polimerización, DP, en función del tiempo de envejecimiento y de la temperatura a la que se realiza

dicho envejecimiento. Se puede comprobar como el DP disminuye con el tiempo y esta disminución se hace más acusada cuando se aumenta la T^a de envejecimiento.

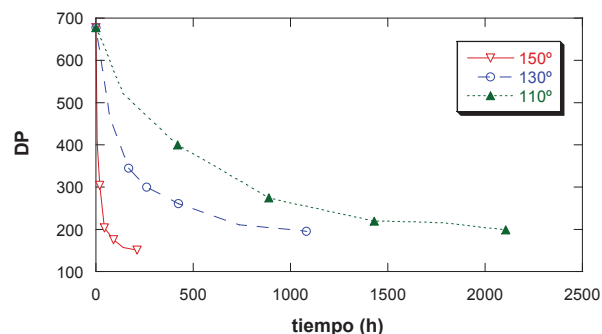


Figura 2. Evolución del DP en función del t y la T^a

Con el objeto de definir un modelo de deterioro del papel en base al $DP=f(t,T)$ se define el parámetro de daño, D , en base a la expresión (1),

$$D_i = 1 - \frac{DP_i}{DP_0} \quad (1)$$

Donde D_i , se puede obtener a partir del valor DP_i en cualquier situación de t y T^a y el DP_0 , que es el valor que presenta el DP del papel original no sometido a ningún envejecimiento ($DP_0 = 678$). De esta forma, el papel sin envejecer presentará un daño nulo, $D = 0$. En la figura 3 se representa la evolución del parámetro daño, D , con el t para diferentes condiciones de T^a de envejecimiento. En esta misma figura se comprueba la buena correlación entre los datos experimentales y el ajuste realizado según la expresión (2).

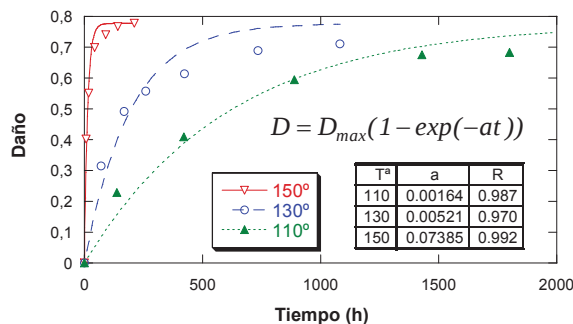


Figura 3. Evolución del daño, D , en función del t y la T^a

$$D = D_{max}(1 - \exp(-at)) \quad (2)$$

Donde a es una constante que depende de la T^a de envejecimiento y D_{max} es el máximo valor alcanzado experimentalmente por el daño, $D_{max} = 0,777$. La constante a se puede expresar por medio de una ley exponencial según se indica en la ecuación (3) en función de la T^a de envejecimiento.

$$a = 3,626 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(0.0952T) \quad (3)$$

Y, por último, el grado de polimerización se puede expresar por medio de la expresión (4) en función del tiempo y de la T^a de envejecimiento.

$$DP_i = DP_0(1 - D_{max}(1 - \exp(-at))) \quad (4)$$

El gráfico de la figura 4 compara los valores experimentales con los obtenidos por el modelo de comportamiento para las T^a en estudio, así como el comportamiento teórico para otras temperatura, incluyendo las típicas de funcionamiento de los transformadores.

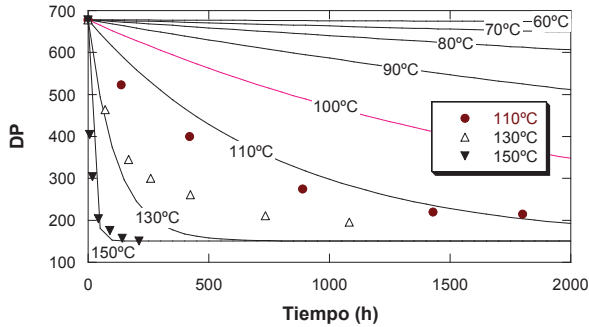


Figura 4. Comparativa del modelo de comportamiento de DP y los valores experimentales.

Frecuentemente se usa un valor del grado de polimerización crítico $DP_c = 200$ como criterio de final de vida [5]. A partir de la expresión (5), si se introduce como D_i el DP_c se obtiene el tiempo de vida estimado en función de la temperatura de funcionamiento del transformador, Figura 5. Se puede comprobar como para una T^a de 60 °C, condiciones normales de funcionamiento, el tiempo de vida estimado es de unos 25 años y como al incrementarse la T^a de envejecimiento, los tiempo disminuyen de forma logarítmica.

$$t_i = -\frac{1}{a} \cdot \ln\left(1 - \frac{D_i}{D_{max}}\right) \quad (5)$$

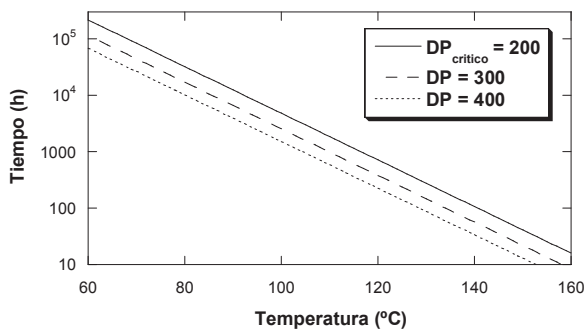


Figura 5. Tiempo estimado de vida en función de la T^a .

4.2 Método alternativo para evaluar el grado de deterioro del papel.

Al analizar el comportamiento mecánico del papel original en función de la orientación, en la figura 6, se puede comprobar una fuerte anisotropía, duplicando la resistencia en rotura en sentido longitudinal respecto al transversal, mientras que las deformaciones disminuyen

a la mitad. La diagonal alcanza valores intermedios y se descarta para el resto del estudio.

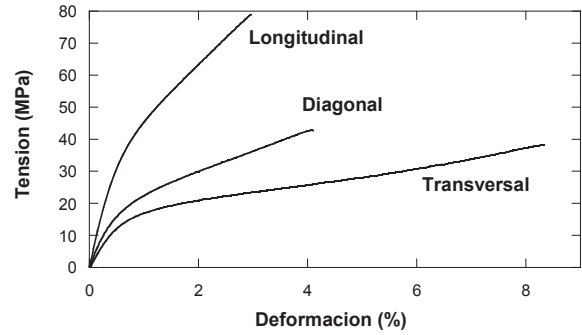


Figura 6. Anisotropía del papel en estudio.

La gráfica de la figura 7 muestra la evolución de las curvas de tracción obtenidas para diferentes tiempos de envejecimiento y una T^a de envejecimiento de 150 °C.

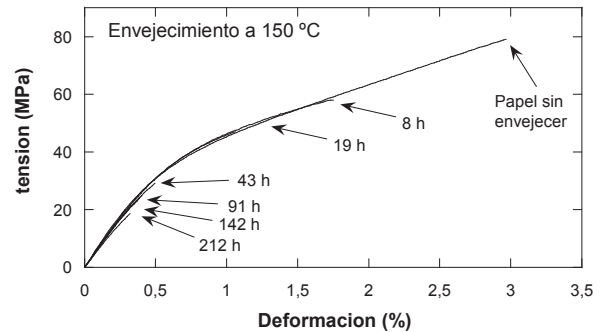


Figura 7. Influencia del t de envejecimiento en tracción.

En esta última figura se puede comprobar que las curvas son prácticamente coincidentes y que se ha tenido que indicar sobre el gráfico el punto de rotura para poder distinguirlas. A la vista de los resultados se puede observar que el módulo de elasticidad, apenas puede aportar información sobre el grado de deterioro, ya que prácticamente coincide en todas las curvas y solamente en aquellos estados de mucho deterioro muestra un ligero descenso. En cuanto al límite elástico, en más de la mitad de las etapas analizadas coincide con la tensión de rotura debido a la fragilidad de las muestras más deterioradas. Serán los parámetros de tensión de rotura y deformación bajo carga máxima los que dependen claramente del grado de deterioro.

La figura 8 muestra la clara evolución de estos dos parámetros con el tiempo de envejecimiento para las tres T^a de envejecimiento analizadas. Si los dos parámetros se ven afectados en el mismo sentido, la energía consumida en la rotura, E_R , combinación de ambos, presenta una influencia más clara, como puede verse en la figura 9. En estas dos últimas figuras se puede comprobar un rápido descenso lineal de las propiedades y una posterior estabilización de las mismas pero con valores relativamente pobres. Además, la pérdida de propiedades se observan de igual forma, tanto en las probetas longitudinales, como en las transversales

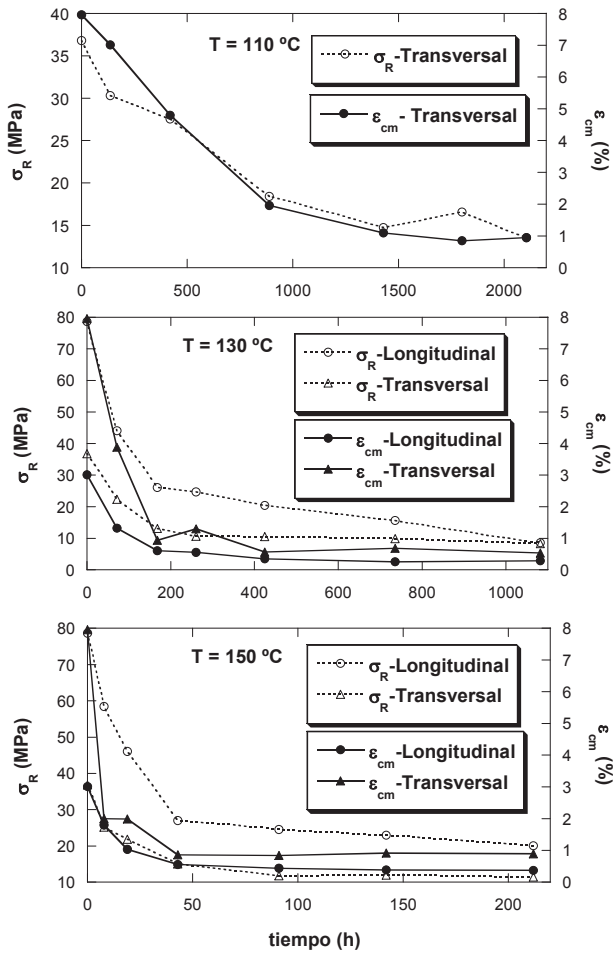


Figura 8. σ_R y ϵ_{cm} en función del t de envejecimiento.

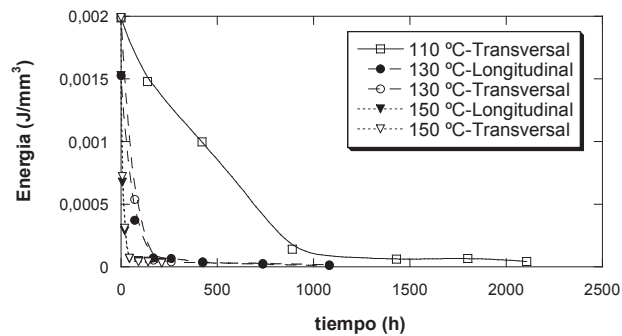


Figura 9. E_R en función del t de envejecimiento.

Se comprueba a partir de las dos últimas figuras que los tiempos de envejecimiento crítico, t_c , para los que se producen la máxima pérdida de propiedades mecánicas es de 30, 175 y 1000 horas para las T^a de envejecimiento de 150, 130 y 110 °C, respectivamente. En la gráfica de la figura 10 se representan estos t_c sobre la figura 5 que representaba el tiempo necesario para obtener el $DP_c = 200$ y se puede comprobar que antes de alcanzar el DP_c , en torno a un DP de 300 las propiedades mecánicas ya son mínimas.

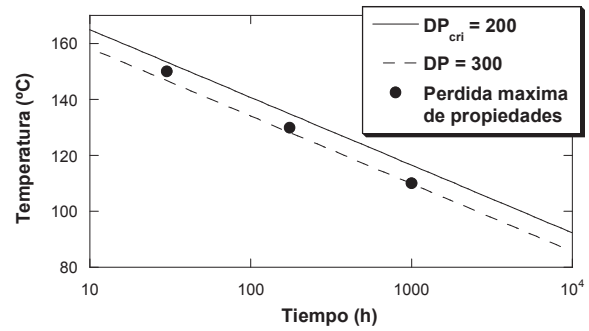


Figura 10. Comparativa entre t_c y DP_c .

En las gráficas de la figura 11 se muestra la correlación existente entre el grado de polimerización y las tres variables obtenidas en los ensayos de tracción, σ_R , ϵ_{cm} y E_R . Se puede comprobar la existencia de una relación lineal entre dichos parámetros y DP hasta el valor cercano a 300 y a partir de este deterioro las propiedades mecánicas apenas se modifican.

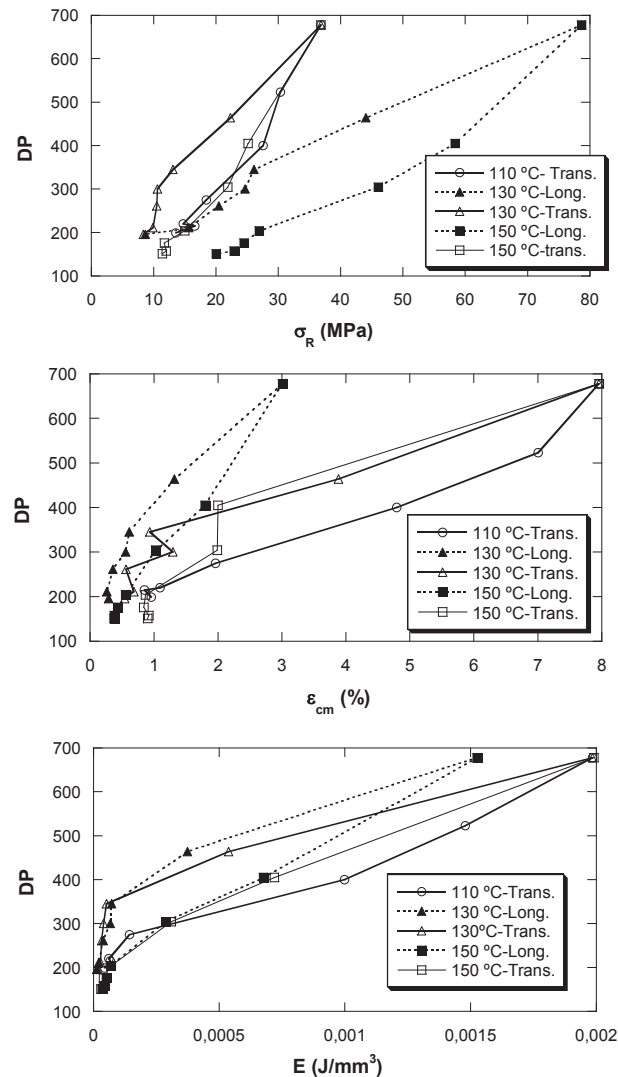


Figura 11. Relación DP y parámetros tracción.

4.3 Análisis fractográfico

En la fractografía de la figura 12 se puede comprobar la aparición, en la sección de rotura, de las fibras de celulosa totalmente estiradas y rotas tras haber sufrido una importante deformación. Sin embargo, en el momento en que el papel es envejecido esta deformación se va reduciendo, incluso a las 8 h (figura 13). Y ya tras un tiempo considerable de envejecimiento, con DP cercanos a 200, la rotura es totalmente frágil (figura 14), no apreciándose deformación alguna en las fibras. Esto coincide con el comportamiento macroscópico mostrado en los ensayos de tracción.

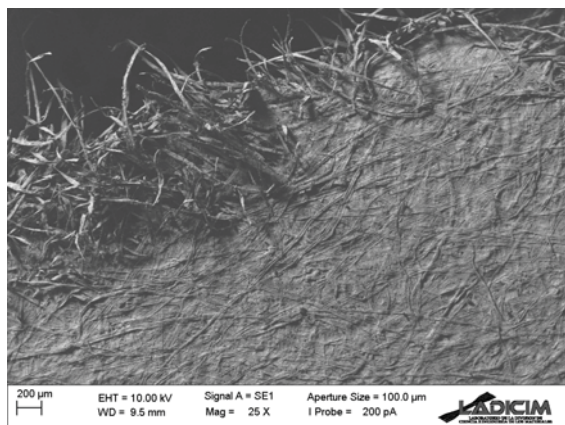


Figura 12. Sección de rotura del papel original.

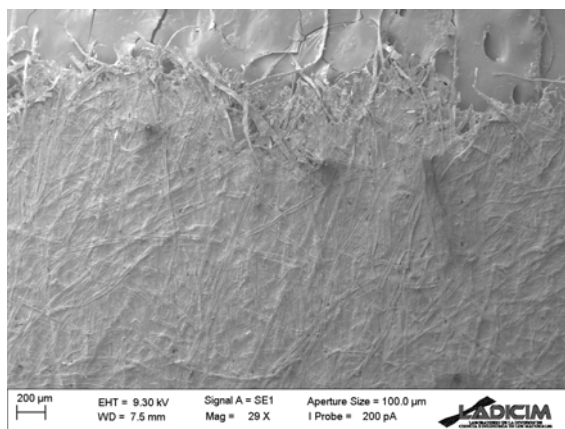


Figura 13. Sección de rotura tras 8 h a 150 °C.

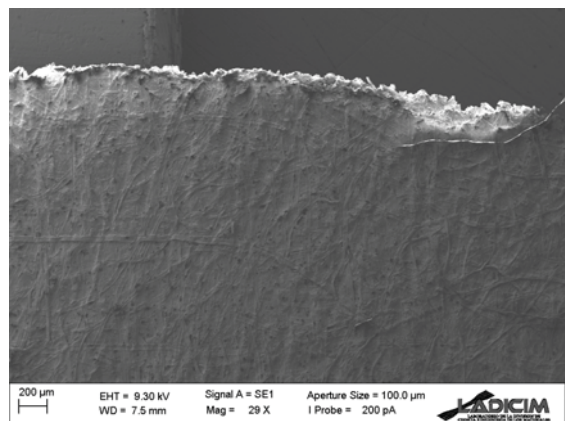


Figura 14. Sección de rotura tras 200 h a 150 °C.

CONCLUSIONES

Se define un modelo de comportamiento que permite predecir el tiempo de vida hasta rotura del papel en función del tiempo y la T^a del aceite donde se envejece.

Por otro lado se ha analizado la pérdida de propiedades mecánicas a medida que progresa el deterioro del papel comprobando que antes de alcanzar las condiciones críticas establecidas para el DP las propiedades mecánicas del papel ya son mínimas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida para la realización de este trabajo al Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación en el marco del acuerdo de subvención DPI2013-43897-P, financiado por el Gobierno de España.

REFERENCIAS

- [1] S. Levchik, J. Scheirs, G. Camino, W. Tumiatti, M. Avidano. Depolymerization processes in the thermal degradation of cellulosic paper insulation in electrical Transformers, *Polymer Degradation and Stability*, 61, 507-511, 1997.
- [2] D. J. T. Hill, T. T. Le, M. Darveniza, T. Saha. A study of degradation of cellulosic insulation materials in a power transformer, part 1. Molecular weight study of cellulose insulation paper. *Polymer Degradation and Stability*, 48, 79-87, 1995.
- [3] R. Madavan, Sujatha Balaraman. Failure analysis of transformer liquid–solid insulation system under selective environmental conditions using Weibull statics method, *Engineering Failure Analysis*, 65, 26-38, 2016.
- [4] R. Murugan, R. Ramasamy. Failure analysis of power transformation for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*, 55, 182-192, 2015.
- [5] L. Lundgaard, D. Allan, I. A. Höhle, R. Clavreul, M. O. Dahlund, H.P. Gasser, R. Heywood, C. Krause, M. C. Lessard, T. K. Saha, V. Sokolov, A. Pablo. Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers. *Cigré Brochure* 323, D1.01.10, 2007.
- [6] ASTM D4243-99 (Reapproved 2009) Standard test method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers and Boards.
- [7] UNE-EN 60450:2005 y 60450:2005/A1:2007. Medida del grado de polimerización medio viscosímetro de los materiales aislantes celulósicos nuevos y envejecidos para uso eléctrico.
- [8] UNE-EN ISO 1924-2: 2009. Papel y cartón. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 2: Método con gradiente de alargamiento constante (20 mm/min).
- [9] IEC 60641-2. Second edition. 2004-06. Pressboard and presspaper for electrical purposes – Part 2: Methods of tests.