

---

# *Viabilidad del reaprovechamiento de residuos de PVC provenientes de cables eléctricos: propiedades mecánicas*

**E. Franco-Urquiza\*, M.LI. Maspoch**  
Centre Català del Plàstic. Universitat Politècnica de Catalunya.  
C/Colom 114, 08222 Terrassa, España

---

*Feasibility of reusing waste PVC from electric cables: mechanical properties*

*Viabilitat del reaprofitament de residus de PVC provinents de cables elèctrics: propietats mecàniques*

*Recibido: 4 de diciembre de 2013; revisado: 27 de enero de 2014; aceptado: 29 de enero de 2014*

## **RESUMEN**

En este trabajo se han evaluado las propiedades mecánicas de desechos de cloruro de polivinilo (PVC) provenientes de cables eléctricos. El residuo contenía 60% de PVC, 30% de polietileno, 7% de goma y 3% de fracción metálica. La fracción metálica fue separada de forma manual. La recuperación de PVC se realizó mediante el método de flotación. Se prepararon 6 mezclas de PVC con residuo (R). El PVC y las mezclas se ensayaron a tracción, obteniendo una reducción de la resistencia y la ductilidad al incrementar el contenido de residuo. Esta reducción en las propiedades mecánicas se halla relacionada con la heterogeneidad de los componentes de la mezcla.

**Palabras clave:** Cloruro de polivinilo; propiedades mecánicas; reciclado mecánico de PVC.

## **SUMMARY**

In this work, the mechanical properties of poly-vinyl chloride (PVC) from waste electrical wires were evaluated. The waste was composed of 60 wt% PVC, 30 wt% PE, 7 wt% rubber and 3 wt% metallic fraction. The metal was removed manually. PVC was recovered using flotation method. Six PVC/waste blends were prepared. Tensile tests were performed on PVC and blends. Both strength and ductility were reduced as the waste content increased. The reduction in mechanical properties was caused by several heterogeneities present in the blends.

**Keywords:** poly-vinyl chloride, mechanical properties, mechanical recycling of PVC

## **RESUM**

En aquest treball s'han avaluat les propietats mecàniques de deixalles de clorur de polivinil (PVC) provinents de cables elèctrics. El residu contenia 60% de PVC, 30% de polietilè, 7% de goma i 3% de fracció metàl·lica. La fracció metàl·lica va ser separada manualment. La recuperació de PVC es va realitzar mitjançant el mètode de flotació. Es van preparar 6 mesclades de PVC amb residu (R). El PVC i les mesclades es van assajar a tracció, obtenint una reducció de la resistència i la ductilitat en incrementar el contingut de residu. Aquesta reducció en les propietats mecàniques es troba relacionada amb l'heterogeneïtat dels components de la mescla.

**Mots clau:** Clorur de polivinil; propietats mecàniques; reciclatge mecànic de PVC.

---

\*Autor para la correspondencia: edgar.adrian.franco@upc.edu

## 1. INTRODUCCIÓN

El PVC es un material que posee una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Sus componentes provienen de la sal (57%) y del petróleo o gas natural (43%) principalmente, lo que le convierte en uno de los materiales poliméricos menos dependiente de combustibles fósiles<sup>1-3</sup>. Dentro de las características generales del PVC se pueden destacar tanto su elevada resistencia y baja densidad (aproximadamente 1.4 g/cm<sup>3</sup>) como su versatilidad en diversas aplicaciones gracias al uso de aditivos que le confieren rigidez o flexibilidad. Otra característica a resaltar es que el PVC es estable e inerte, por lo que se utiliza en productos sanitarios y tuberías de agua potable. También, el PVC destaca por sus propiedades ignífugas, y es ampliamente utilizado como aislante eléctrico. Su bajo coste y elevada rentabilidad, combinado con la amplia gama de productos que pueden ser obtenidos a partir de diferentes técnicas y condiciones de procesamiento hacen que el PVC se convierta en uno de los termoplásticos mayormente utilizados<sup>1,2</sup>. De hecho, el consumo de PVC ha llegado a superar los 35 millones de toneladas al año<sup>1,3-6</sup>. No obstante, esta enorme producción de PVC ha traído como consecuencia una gran expansión de residuos, por lo que su reciclaje ha adquirido una creciente importancia en la industria transformadora del plástico.

Hasta hace unos años, los desechos de PVC eran enviados a los vertederos. No obstante, esta alternativa ha comenzado a ser cada vez menos viable debido a la disminución de las áreas disponibles y del coste que genera. Otra alternativa es la incineración, la cual se lleva cabo junto con otros residuos sólidos urbanos. Esta última vía ha sido tema de controversia, ya que mientras algunos estudios señalan que la combustión de residuos de PVC no conlleva daños al medio ambiente, otros estudios indican que no siempre se puede controlar las emisiones, incrementando la posibilidad de riesgos ambientales asociados con el cloruro de hidrógeno<sup>2,7-9</sup>.

A pesar de que en la actualidad existen numerosos métodos y técnicas para el reciclado de plásticos, algunas de éstas técnicas de reciclaje no llegan a ser del todo favorables para el reciclado de PVC, debido principalmente a la presencia del cloro en su estructura<sup>7</sup>. En particular, el vertido y el compostaje no son los métodos más adecuados debido a los riesgos que podría suponer la degradación oxidativa del PVC para el medio ambiente<sup>3</sup>. La incineración y la pirolisis también pueden llegar a ser contraproducentes a causa de las grandes cantidades de cloruro de hidrógeno y otros productos tóxicos que se liberan durante la calcinación del PVC<sup>10</sup>. Por lo anterior, los métodos de reciclado químico y mecánico son lo que han dado hasta el momento los mejores resultados<sup>1</sup>.

El método de reciclado químico se basa en la descomposición del material para obtener monómeros con los cuales, a partir de un proceso de polimerización, se obtienen nuevos materiales y/o productos<sup>7,10-12</sup>.

El método de reciclado mecánico es un proceso físico que, por lo general, se lleva a cabo cuando se conoce la formulación del material (generalmente en un proceso petroquímico), y cuando se conoce la procedencia de los residuos sólidos urbanos (materiales post-consumo), muy importante en el caso del PVC.

Los procesos convencionales de reciclado mecánico implican la limpieza, la separación, la molienda y la transformación, y no conllevan ningún cambio en la composición

química del material. En el caso que se conozca la formulación del material, las etapas de limpieza y separación no suelen ser necesarias.

El volumen de los residuos de PVC a reciclar, la calidad y el costo de la ordenación y separación de los materiales, son algunos de los factores más importantes que determinan el costo final del PVC reciclado mecánicamente. Es sabido que la falta de homogeneidad, debido a la presencia de otros materiales termoplásticos y aditivos que contienen los residuos de PVC, es uno de los problemas a considerar dentro del reciclado mecánico, ya que da lugar a un material difícil de procesar y con fases no miscibles que conllevan complicaciones ya sea al momento del re-procesado o bien durante el proceso de transformación. Por lo anterior, surge la idea de realizar un trabajo de investigación cuyo objetivo general sea analizar el reaprovechamiento del reciclaje mecánico del PVC, utilizando como residuo material procedente de cables eléctricos. El objetivo particular del presente trabajo es evaluar la viabilidad de reciclaje del PVC para la fabricación de nuevos productos, en función de las propiedades mecánicas obtenidas a tracción.

## 2. MATERIALES

En este trabajo se utilizó el PVC comercial BENVIC® EPA-0100900AA, suministrado por Solvay Benvic, el cual es un PVC plastificado con una densidad de 1.38 g/cm<sup>3</sup>, una tensión a la rotura de 10 MPa y una deformación a la rotura de 225 %. Para las mezclas se utilizó un residuo (R) proveniente de cables eléctricos, el cual fue suministrado por una empresa autorizada de gestión de residuos de cable eléctrico con sede en Catalunya, España. Según esta empresa, la composición en peso de éste residuo puede llegar a ser de: 60% PVC, 30% polietileno, 7% goma y 3% fracción metálica.

## 3. MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los cables eléctricos se constituyen básicamente de un alma conductora (alambre de cobre o aluminio) y un aislante (mezcla de PVC, polietileno y elastómeros). Durante el proceso de reciclado, lo primero que se retira es el material conductor debido a su valor comercial. No obstante, siempre quedan restos de metal que deben ser eliminados del residuo previo al reciclado.

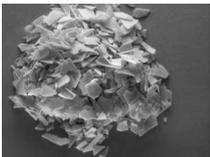
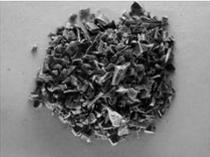
### 3.1. Preparación de las muestras

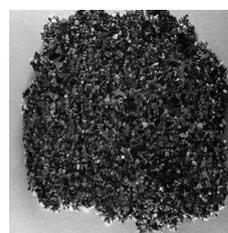
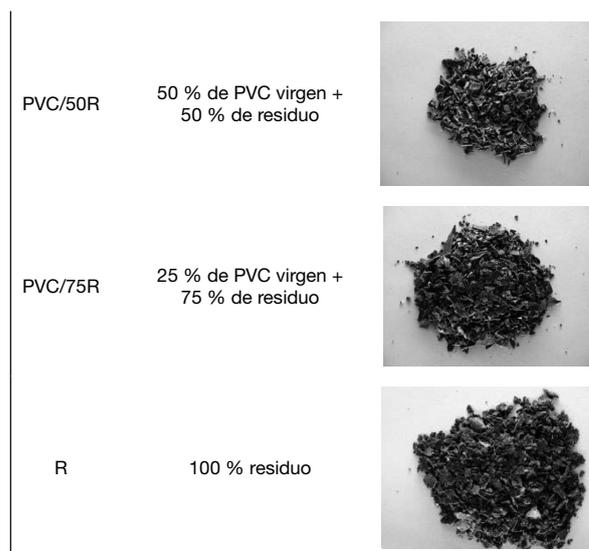
En este trabajo, la separación de la fracción metálica contenida en el residuo se llevó a cabo de forma manual, por lotes de aproximadamente 100 gr. Una vez retirado el metal, la recuperación de PVC se realizó mediante el método de separación por diferencia de densidades (conocido también como proceso de selección por flotación). Para ello, el residuo libre de metal se colocó dentro de un vaso de precipitado y se utilizó agua ( $\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$ ) como medio de suspensión. Posteriormente, el residuo de PVC recuperado se colocó dentro de una estufa con circulación forzada de aire (J.P. Selecta®) a 80°C durante 24 h.

Las mezclas PVC/R se realizaron en una mezcladora de rodillos contrarotantes IQAP-LAP modelo RL-110. La temperatura de los rodillos fue de 210°C, y tanto la velocidad como la distancia entre los rodillos tuvieron que ser mo-

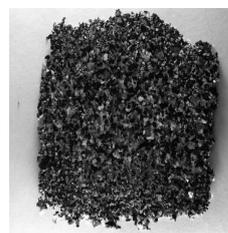
dificadas a conveniencia. A pesar de que la mezcladora de rodillos no proporciona un elevado grado de mezclado, es bastante eficaz para intentar evitar la degradación del PVC, el cual puede liberar ácido clorhídrico durante su descomposición. El procedimiento de mezclado es bastante simple, primero se coloca la mezcla PVC/R sobre los rodillos atemperados, haciéndola pasar poco a poco, y se aumenta la distancia entre los rodillos con la finalidad de obtener una película cada vez más gruesa. Posteriormente, la película obtenida se tritura para poder transformar el material. Es importante resaltar que el mismo procedimiento se aplicó al PVC virgen para poder comparar el efecto del contenido de residuo bajo un mismo tratamiento de mezclado. La **Tabla 1** muestra la nomenclatura y composición de los materiales analizados en este trabajo. Tanto el PVC como las mezclas PVC/R fueron transformadas mediante el proceso de compresión, utilizando una prensa de platos calientes IQAP-LAP modelo PL-15. Es importante resaltar que la preparación de placas, con un espesor homogéneo y una buena calidad superficial, conllevó un gran esfuerzo. En un principio se pensó en preparar placas sin hacer pasar el material a través de la mezcladora de rodillos. Así, utilizando solamente el residuo, al aplicar una temperatura de 210 °C y 11 bares de presión durante 1 minuto, se obtuvo una placa de 4 mm de espesor con muy poca homogeneidad y una gran cantidad de material no fundido (**Figura 2a**). La calidad de las placas no presentó variaciones significativas al aumentar la presión de compresión a 15 bares y la temperatura hasta 250°C, tal como se puede apreciar en la **Figura 2**.

**Tabla 1.** Nomenclatura, composición nominal y apariencia física de los materiales empelados

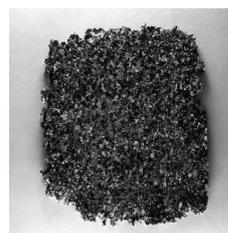
Nomenclatura	Composición nominal en peso	Apariencia de la mezcla triturada
PVC	100 % PVC	
PVC/7R	93 % de PVC virgen + 7,5 % de residuo	
PVC/15R	85 % de PVC virgen + 15 % de residuo	
PVC/25R	75 % de PVC virgen + 25 % de residuo	



a)



b)



c)

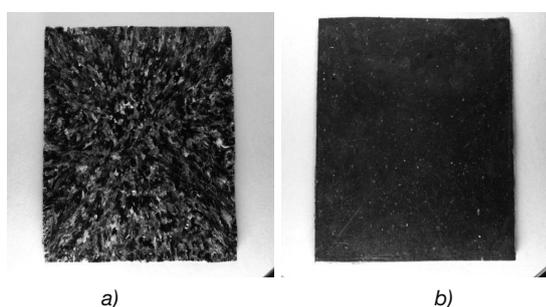
**Figura 2.** Fotografías correspondientes a las placas de 100 % residuo, obtenidas mediante el método de compresión: a) compresión bajo las condiciones expuestas en métodos experimentales, b) compresión aumentando la temperatura (250°C) y c) compresión incrementando la temperatura (250°C) y la presión (15bares).

Debido a los resultados obtenidos, se decidió realizar dos pasos de compresión. Así, a la placa de la **Figura 2a**, se le aplicó nuevamente el proceso de compresión (bajo las mismas condiciones de presión y temperatura) pero utilizando ahora un marco de 1 mm de espesor, el resultado puede apreciarse claramente en la **Figura 3a**. A pesar de que ésta placa presentó una sustancial mejora superficial,

el material presentó poca adherencia entre sí, con lo cual la placa se rompía fácilmente sólo con ser doblada con las propias manos.

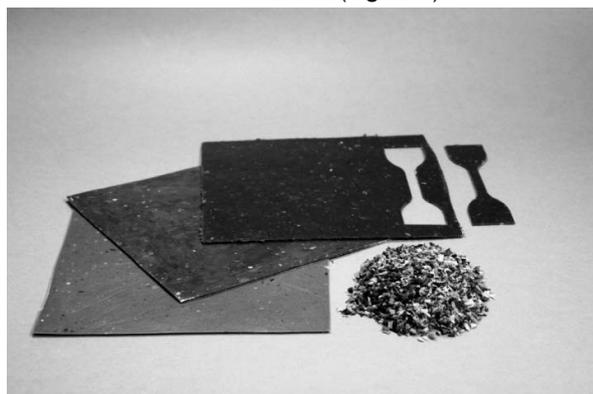
En base a lo anterior, se decidió pasar el residuo por la mezcladora de rodillos IQAP-LAP, y realizar dos pasos de compresión. De esta forma, el material ya mezclado y triturado se comprimió dos veces a una temperatura de 210 °C y una presión aplicada de 11 bares durante 1 min, obteniéndose finalmente una placa homogénea. El cambio visual es bastante notorio según se puede apreciar en la **Figura 3b**.

Este mismo procedimiento se aplicó tanto al PVC como a las mezclas PVC/R utilizando las concentraciones de residuo presentadas en la **Tabla 1**. Visualmente, las placas correspondientes a las mezclas PVC/R variaron de tonalidad en función del contenido de residuo, según se aprecia en la **Figura 4**.



**Figura 3.** Fotografías correspondientes a las placas de 100 % residuo obtenidas mediante: a) mezclado manual y comprimida dos veces, y b) previamente mezclado mediante rodillos y comprimida dos veces.

A partir de las placas obtenidas se troquelaron probetas halterio tipo IV, utilizando una troqueladora CEAST modelo 6051. Las probetas fueron utilizadas para la caracterización mecánica de los materiales (**Figura 4**).



**Figura 4.** Fotografía correspondiente a la evolución de la tonalidad del color en las placas conforme se aumenta el contenido de residuo. Se aprecia también una probeta de tracción troquelada directamente de una de las placas.

### 3.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante ensayos a tracción uniaxial (siguiendo lo establecido por la norma ISO 527), utilizando una máquina de ensayos universal modelo Galdabini Sun 2500, equipada con una célula de carga de 5kN y un videoextensómetro Mintron OS-65D. Las probetas se ensayaron a una velocidad de separación de mordazas de 10 mm/min y temperatura

ambiente ( $22 \pm 1^\circ\text{C}$ ), y se obtuvieron las correspondientes curvas esfuerzo vs deformación. A partir de dichas curvas se determinó el esfuerzo máximo ( $\sigma_m$ ) y la deformación a rotura ( $\epsilon_p$ ). Los valores presentados en este trabajo corresponden al promedio de al menos 8 ensayos válidos.

La observación de la superficie de rotura se realizó en una lupa microscópica modelo Carton.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Obtención de residuo

La selección por flotación permitió determinar la cantidad en peso de dos porciones de mezclas: una fracción ligera (en su mayoría compuesta de polietileno y goma, con densidades inferiores a la del agua), y una fracción pesada (no flotante) que correspondió mayoritariamente al PVC. La **Tabla 2** muestra los resultados de separación obtenidos. Según los resultados presentados en la **Tabla 2**, el residuo contenía aproximadamente un 77 % en peso de PVC.

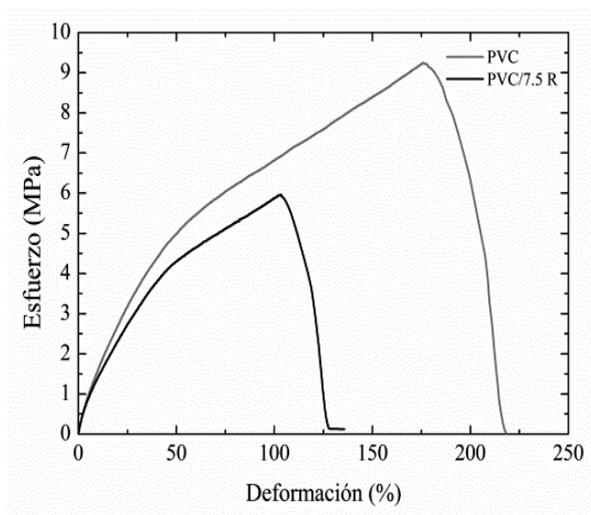
**Tabla 2.** Composición promedio del residuo mediante separación por flotación

Muestra (100 g)	Fracción ligera (gr)	Fracción pesada (gr)
1	23.7	76
2	25.5	74.2
3	22.8	76.9
4	18.4	79.4
5	23	76.7
Contenido (%)	<b>23 ± 0.03</b>	<b>77 ± 0.02</b>

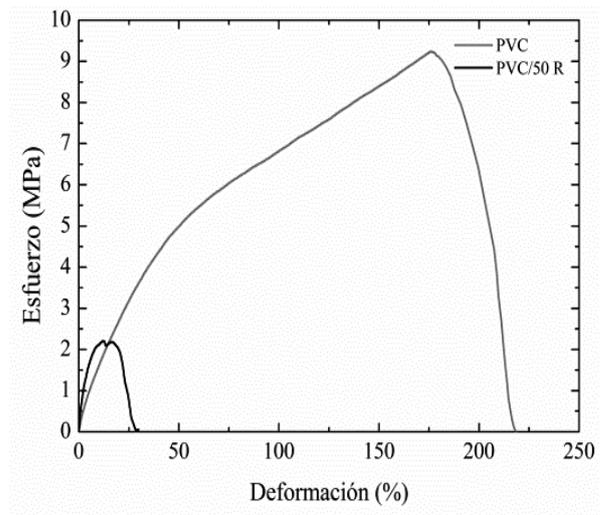
### 3.2 Propiedades mecánicas

La **Figura 5** muestra las curvas esfuerzo vs deformación correspondientes al PVC, al residuo y a las mezclas PVC/R.

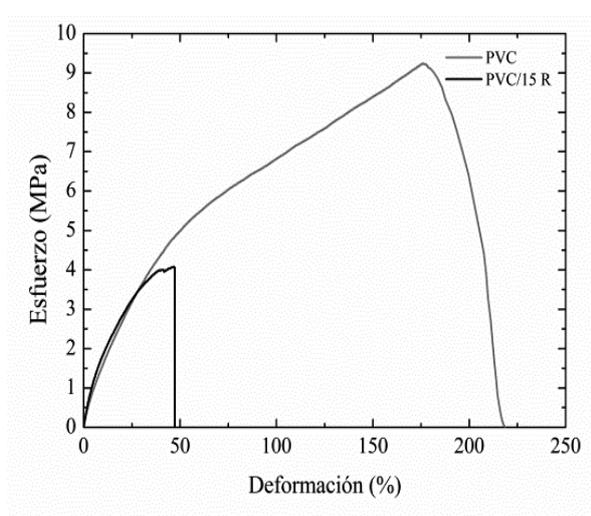
Todos los materiales ensayados rompieron de manera similar, sin evidenciar un claro punto de fluencia y alcanzando un valor de tensión máximo previo a la rotura. Físicamente, las probetas no presentaron una deformación localizada o cuello, estirándose homogéneamente hasta la rotura. La diferencia mayor se puede apreciar en la **Figura 5f**, donde el área bajo la curva del residuo disminuye drásticamente en comparación con la del PVC.



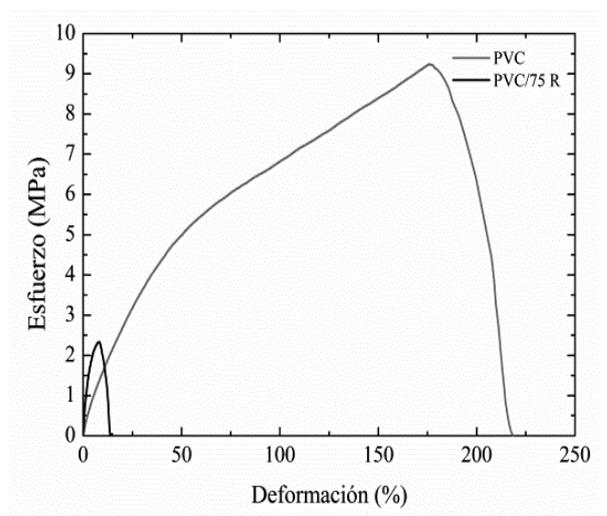
a)



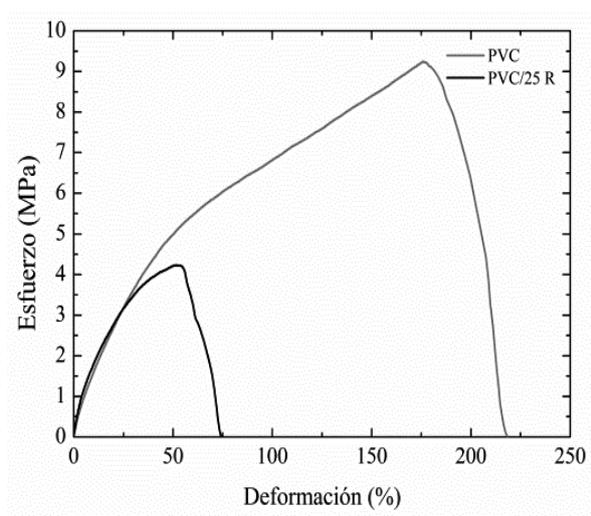
d)



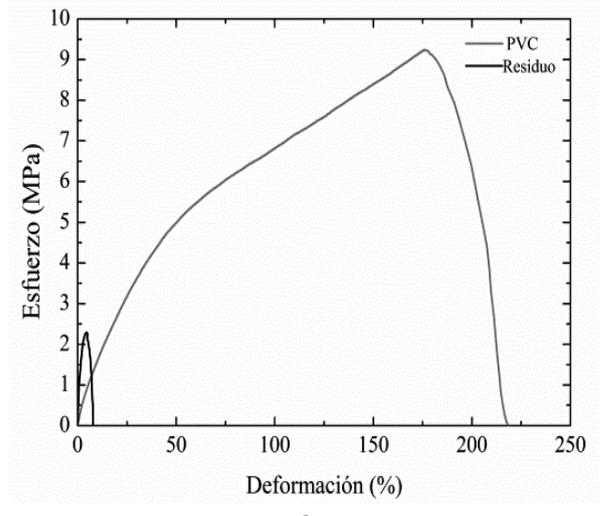
b)



e)



c)



f)

**Figura 5.** Curvas esfuerzo vs deformación representativas de: a) PVC/7.5R, b) PVC/15R, c) PVC/25R, d) PVC/50R, e) PVC/75R y f) PVC y 100 % residuo.

La **Tabla 3** presenta los parámetros mecánicos ( $\sigma_{\text{máx}}$  y  $\epsilon_b$ ) obtenidos a partir de las curvas esfuerzo vs deformación.

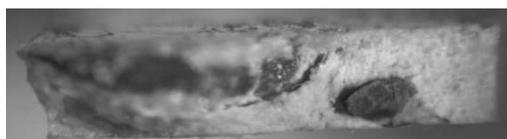
**Tabla 3.** Parámetros mecánicos obtenidos en función del contenido de residuo

Contenido de residuo (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	9.23 ± 1.03	268.4 ± 55.25
7.5	5.91 ± 0.73	155.4 ± 30.06
15	4.02 ± 0.35	85.32 ± 21.13
25	4.07 ± 0.57	77.21 ± 23.74
50	2.36 ± 0.35	28.78 ± 8.41
75	2.43 ± 0.096	14.4 ± 1.35
100	2.51 ± 0.33	7.27 ± 1.55

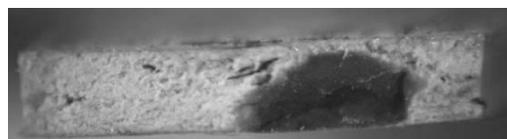
Tal como cabría de esperar, la tensión máxima y la deformación disminuyen drásticamente al incrementar el contenido de residuo. Lo anterior se podría atribuir principalmente a la heterogeneidad que presenta el residuo, con tamaños diversos de partículas no fundidas, tal como se puede apreciar en las imágenes correspondientes a la superficie de rotura de las probetas de tracción mostradas en la **Figura 6**.



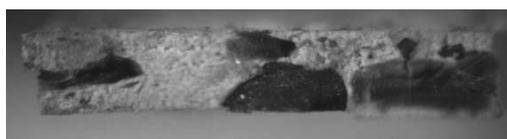
a)



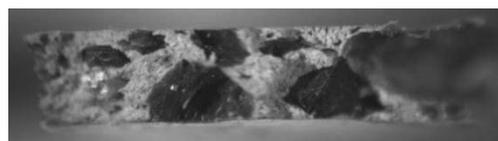
b)



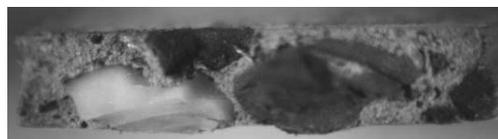
c)



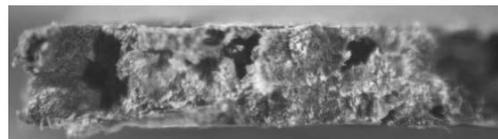
e)



e)



f)



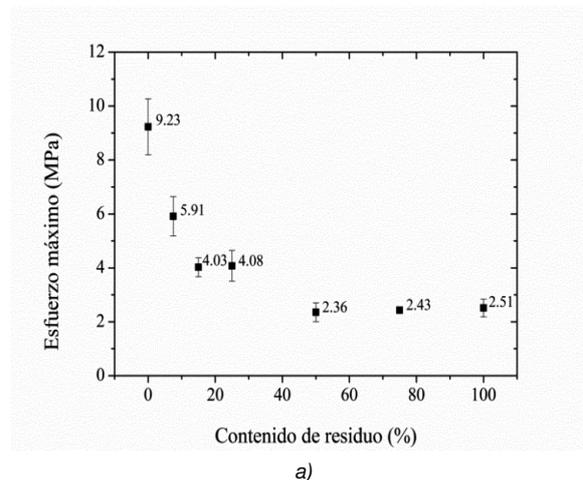
g)

**Figura 6.** Fotografías correspondientes a la superficie de rotura del: a) PVC, b) PVC/7.5R, c) PVC/15R, d) PVC/25R, e) PVC/50R, f) PVC/75R y g) 100 % residuo.

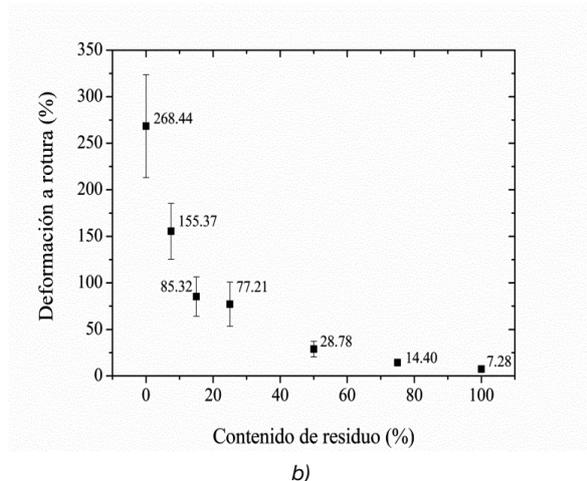
EL PVC muestra una superficie de rotura muy homogénea y aparentemente sin cavitaciones (**Figura 6a**), mientras que la superficie de rotura de las mezclas PVC/R (**Figura 6b-g**) presentaron cavitaciones y varias partículas no fundidas de diversos tamaños. En la **Figura 6**, se puede apreciar que al aumentar el contenido de residuo, el número de partículas sin fundir aumenta notoriamente. En base a lo anterior, es posible asumir que éstas partículas no se encuentran completamente adheridas al PVC, con lo cual la resistencia disminuye, favoreciendo la rotura prematura del material, justificando así el bajo valor de resistencia y ductilidad obtenidos en las mezclas PVC/R.

La presencia de material no fundido podría deberse a que la mezcladora de rodillos no proporciona un adecuado mezclado del material. Además, durante la compresión, parte del material no llega a fluir completamente debido a la heterogeneidad del material, ya que al ser material reciclado, resulta muy difícil controlar la procedencia y composición exacta del residuo.

La **Figura 7** muestra la evolución de los parámetros mecánicos ( $\sigma_{\text{máx}}$  y  $\epsilon_b$ ) obtenidos respecto al contenido de residuo.



a)



**Figura 7.** Efecto del contenido de residuo sobre: a) el esfuerzo máximo y b) la deformación a rotura.

Tal como se ha mencionado, al añadir el residuo al PVC, la resistencia disminuye. No obstante esta reducción no llega a ser continua, tal como se puede apreciar en la **Figura 7a**. Con un 7.5 % de residuo, la resistencia llega a disminuir aproximadamente un 36 %, mientras que con un contenido de residuo comprendido entre un 15-25 % en peso, la resistencia máxima disminuye hasta un 57 %; y finalmente, a partir de un 50 % de residuo, la resistencia disminuye un 74 % respecto a la del PVC.

A diferencia de lo observado en las tendencias obtenidas para el esfuerzo máximo, la deformación a rotura de las mezclas PVC/R tiende a disminuir continuamente al aumentar el contenido de residuo (**Figura 7b**). Así, con un 7% de contenido de residuo, la deformación disminuye un 42% respecto al PVC y hasta un 97% utilizando sólo residuo.

Es importante resaltar que al aumentar el contenido de residuo, la desviación estándar obtenida se reduce considerablemente debido a la poca dispersión de los resultados, lo cual se ha atribuido a la heterogeneidad del mezclado, ya que al aumentar el contenido de residuo se incrementa también el número de partículas no fundidas, las cuales impiden que el material alcance los valores de esfuerzo y deformación esperados.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el comportamiento mecánico de mezclas de PVC con el residuo proveniente de cables eléctricos.

La separación por flotación reveló que el residuo contenía aproximadamente un porcentaje promedio del 77 % en peso de PVC.

El residuo y las mezclas PVC/R necesitaron de dos pasos de moldeo por compresión para obtener placas con un espesor homogéneo y una buena calidad superficial. El PVC también fue sometido al mismo proceso de compresión para comparar adecuadamente los resultados.

El comportamiento mecánico mostró que tanto la resistencia como la ductilidad disminuyen al aumentar el contenido de residuo, y se atribuyó a la heterogeneidad de las mezclas y a la presencia de partículas no fundidas.

Los resultados experimentales obtenidos señalan que las mezclas de PVC/R poseen un rendimiento muy limitado en aplicaciones donde el material esté sometido a esfuerzos o cargas bajo tracción.

A pesar del pobre rendimiento mecánico obtenido, los autores consideran este trabajo un primer paso en la mejora de las propiedades mecánicas de mezclas PVC/R, y se encuentran aplicando nuevas rutas de mejora, dentro de las cuales se podrían destacar el uso de extrusoras que permitan obtener un adecuado mezclado de los materiales o bien, reducir y homogeneizar el tamaño del residuo a través de tamices.

#### 5. REFERENCIAS

1. D. Braun, *Journal of Vinyl and Additive Technology* **7**, (4), 168-176 (2001).
2. B. A. Hegberg, W. H. Hallenbeck, and G. R. Brenni-man, *Resources, Conservation and Recycling* **9**, (1-2), 89-107 (1993).
3. N. Yarahmadi, I. Jakubowicz, and L. Martinsson, *Polymer Degradation and Stability* **79**, (3), 439-448 (2003).
4. D. Garcia, R. Balart, J. E. Crespo, and J. Lopez, *Journal of Applied Polymer Science* **101**, (4), 2464-2471 (2006).
5. M. Sadat-Shojai, and G.-R. Bakhshandeh, *Polymer Degradation and Stability* **96**, (4), 404-415
6. M. Wenguan, and F. P. L. Mantia, *Journal of Applied Polymer Science* **59**, (5), 759-767 (1996).
7. F. Burat, A. Güney, and M. Olgaç Kangal, *Waste Management* **29**, (6), 1807-1813 (2009).
8. A. S. Ditta, A. J. Wilkinson, G. M. McNally, and W. R. Murphy, *Journal of Vinyl and Additive Technology* **10**, (4), 174-178 (2004).
9. V. Matthews, *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications* **19**, (4), 197-204 (1993).
10. M. K. Patel, E. Jochem, P. Radgen, and E. Worrell, *Resources, Conservation and Recycling* **24**, (3-4), 191-215 (1998).
11. J. C. Arnold, and B. Maund, *Polymer Engineering & Science* **39**, (7), 1234-1241 (1999).
12. F. P. La Mantia, *Polymer Degradation and Stability* **37**, (2), 145-148 (1992).