

CAPÍTULO 7





ENSAYOS MECÁNICOS

Los materiales utilizados para preparar las probetas fueron seleccionados de tal manera que representen los distintos tipos de PET que se puedan encontrar. Debido a las pequeñas cantidades utilizadas se tuvo la oportunidad de separar de manera manual materia extraña como pequeños trozos de madera, papel, otros polímeros y metales ferrosos y no ferrosos.

Se han utilizado para el estudio cuatro tipos de materiales:

- a) PET original (botellas).
- b) RPET contaminado.
- c) RPET lavado.
- d) RPET lavado y secado.

Tabla 7.1 Tipos de materiales utilizados para los ensayos

Tipo	PET original (botellas)	PET contaminado
Probeta		
Tipo	PET lavado	PET lavado y secado
Probeta		

Equipos utilizados para los diversos análisis en el laboratorio de Resistencia de Materiales:

EXTRUSORA:

Relación L/D: 32:1

Capacidad: 1 Kg/h

CABEZAL:

Monofilamento

HORNO MUFLA:

Marca: Wild Barfield

Modelo: AJ 8123 P

Temperatura máxima de operación: 1000 °C

Kw: 36

Capacidad: 8000 cm³



Fig. 7.1 Horno mufla

MÁQUINA DE ENSAYOS

Marca: AMSLER

Tipo de ensayo: Tracción Horizontal

Calibrado y certificado



Fig. 7.2 Máquina de ensayos

Los ensayos físicos se realizaron bajo las condiciones de atmósfera controlada y mantenida a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Como el objetivo principal es verificar las propiedades mecánicas del material reciclado con el fin de determinar los parámetros óptimos para el proceso de extrusión del PET y el diseño y construcción de una máquina extrusora de PET, se preparó este material para poder realizar las experiencias para su evaluación. Para ello, se extruyó PET en forma de escamas, sometiendo el material a diferentes tiempos de exposición a condiciones de temperatura y diferentes velocidades de extrusión en el tornillo. En base al trabajo realizado, se seleccionaron diferentes temperaturas para obtener un mejor material, dependiendo del tipo de material original que ingresara por la tolva. Se prepararon numerosas muestras, para el caso de la extrusión se estiraron manualmente los filamentos de RPET o material reciclado de PET, que conforme salía de la extrusora, por el cabezal se recogían. El material dentro de la extrusora se mantuvo por varios intervalos de tiempo, determinados por la velocidad de giro del husillo o tornillo extrusor. De cada tipo de material original, se tomaron varias muestras.

7.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Este ensayo ha permitido obtener información sobre la capacidad del material para soportar la acción de cargas de cargas que varían lentamente, el ensayo se realiza alargando una probeta de geometría normalizada, con una longitud inicial L_0 , que se ha amarrado entre las mordazas de la máquina de tracción. Una de las mordazas de la máquina esta unida al cabezal móvil y se desplaza respecto a la otra con velocidad constante durante la realización del ensayo. Las máquinas de ensayo disponen de sistemas de medida, células de carga y extensómetros, que permiten registrar la fuerza aplicada y la deformación producida mientras las mordazas se están separando.



Fig. 7.3 Registro de los ensayos en papel milimetrado

Procedimiento

Para tomar mediciones de alargamiento, lo primero ha sido marcar el tramo de calibración. Las marcas se hacen rayando el material, estas marcas han de ser lo suficientemente grandes como para que no se borren el momento de las pruebas.

Antes de usar la máquina, se ha verificado su funcionamiento. Se comprobó el estado inicial de la máquina y se realizaron los ajustes necesarios.

Se colocó la probeta en los dispositivos de sujeción (mordazas), comprobando la correcta sujeción y posicionamiento.

Después que la probeta ha fallado, se ha retirado de la máquina de ensayo. Se tomaron las mediciones de los valores de alargamiento. Los extremos rotos de la probeta se juntaron, y se ha medido la distancia entre los puntos de referencia. También se midió el diámetro de la sección más pequeña

7.1.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (PET Y RPET)

Coincide con el valor máximo del esfuerzo y es la tensión que hay que aplicar para que se produzca la rotura de la probeta en las condiciones del ensayo. La deformación es uniforme, pero al alcanzar esta tensión comienza a desarrollarse un cuello en la probeta. La reducción localizada de sección hace que la tensión que actúa en esa sección crezca localmente lo que provoca un nuevo aumento del alargamiento en la zona del cuello con la consiguiente caída de la tensión nominal. Este proceso continúa hasta que la sección no es capaz de seguir deformándose y se produce la fractura.

7.1.2 ALARGAMIENTO PORCENTUAL (PET Y RPET)

Es la extensión que presenta la probeta tras el fallo. Esta propiedad es una medida indirecta de la ductilidad del material. Un alargamiento a la rotura elevado es una propiedad deseable porque los materiales con esta propiedad admiten deformaciones plásticas importantes, cuya observación, en muchas ocasiones, permite adoptar medidas correctoras con anterioridad a la fractura. Además, el alargamiento a la rotura es también un indicador de la capacidad del material para soportar cargas a la tracción.



Fig. 7.4 Probeta de RPET lavado y secado, comportamiento plástico del material

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas y gráficos obtenidos mediante los ensayos con los distintos tipos de material:

ENSAYOS MECÁNICOS (escala de 20 kg, 1 mm = 0.2 kg)

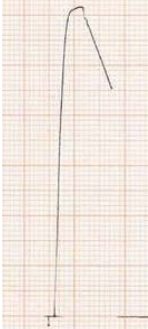
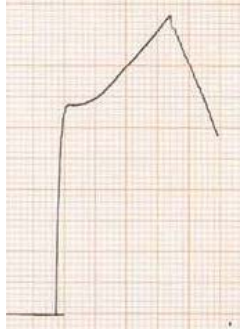
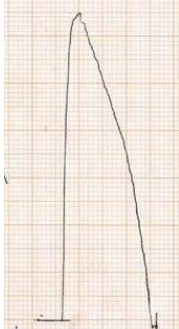

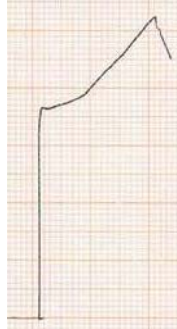
PRIMER GRUPO DE ENSAYOS

PET ORIGINAL – ENVASES

Tabla 7.2 Tabla de resultados con material de envases

No.	Largo [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Li [mm]	Lf [mm]	Alargamiento [%]	Carga máx. [mm]	Carga máx. [Kg]	Resistencia - tracción [Kg/cm ²]
1	3,38	0,32	1,082	34,40	36,46	5,988	62	12,4	1146,450
2	3,38	0,32	1,082	32,10	44,14	37,508	49	9,8	906,065
3	3,38	0,32	1,082	29,42	30,16	2,515	65	13,0	1201,923
4	3,38	0,32	1,082	31,70	34,16	7,760	64	12,8	1183,432
5	3,38	0,32	1,082	30,16	42,96	42,440	53	10,6	980,030

Tabla 7.3 Diagramas obtenidos en el ensayo

No.	1	2	3	4	5
Diagrama					

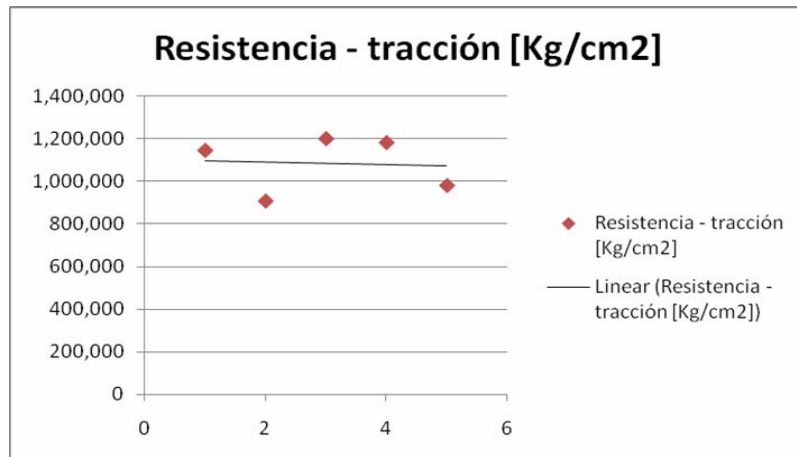


Fig. 7.5 Resistencia a la tracción de las probetas de envases con respecto al número de ensayo realizado

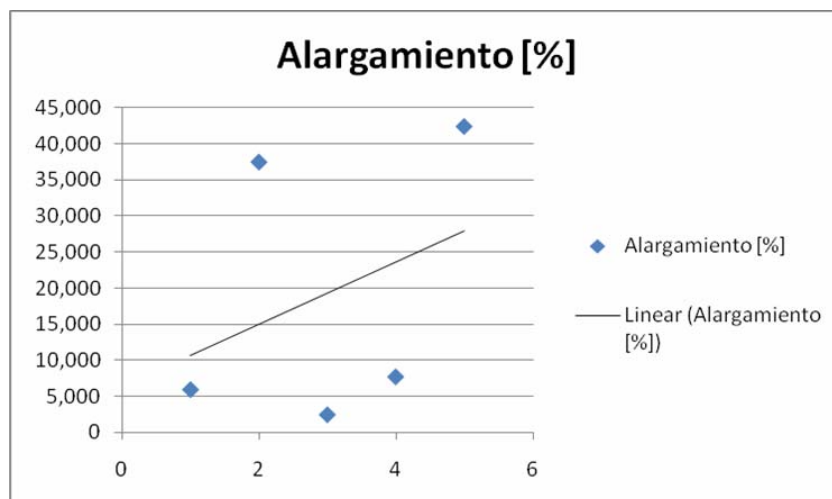


Fig. 7.6 Alargamiento porcentual de las probetas de envases con respecto al número de ensayo realizado

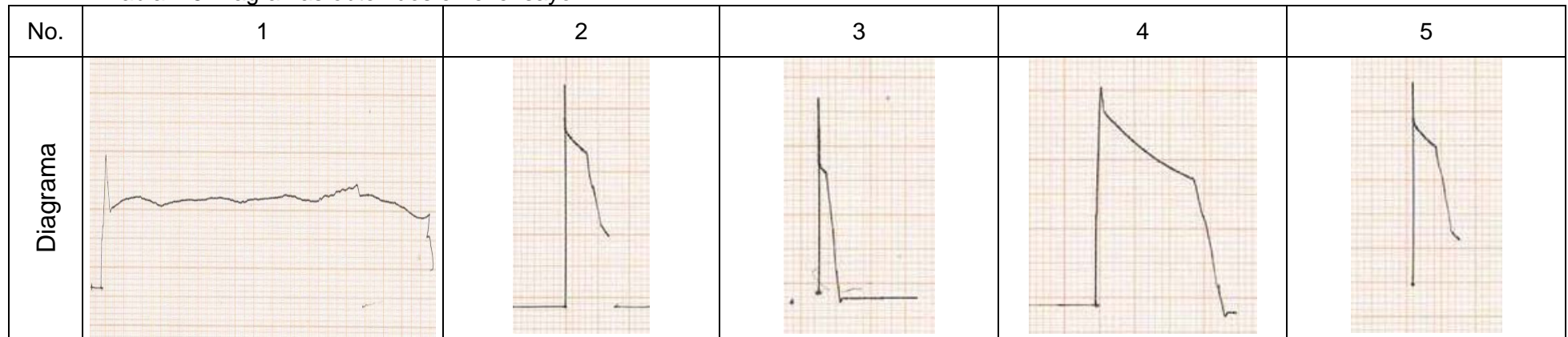
De todos los ensayos realizados, en éste tipo de material se evidencia la mayor resistencia a la tracción, llegando a obtener hasta 1201,923 [Kg/cm²], con cierta dispersión de datos en los diferentes ensayos, el rango de resistencia es de 906.065 a 1201,923 [Kg/cm²] y un alargamiento porcentual de rango 2,515% a 42,440%.

PET EXTRUIDO – ESCAMAS LAVADAS

Tabla 7.4 Tabla de resultados con escamas lavadas

No.	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Li [mm]	Lf [mm]	Alargamiento [%]	Carga max. [mm]	Carga máx. [Kg]	Resistencia - tracción [Kg/cm ²]
1	1,24	1,208	59,80	262,00	338,127	23	4,6	380,912
2	1,55	1,887	40,82	55,78	36,649	35	7,0	370,975
3	1,28	1,287	37,00	51,76	39,892	29	5,8	450,732
4	1,60	2,011	41,32	59,00	42,788	31	6,2	308,363
5	1,38	1,496	41,06	53,38	30,005	29	5,8	387,775

Tabla 7.5 Diagramas obtenidos en el ensayo



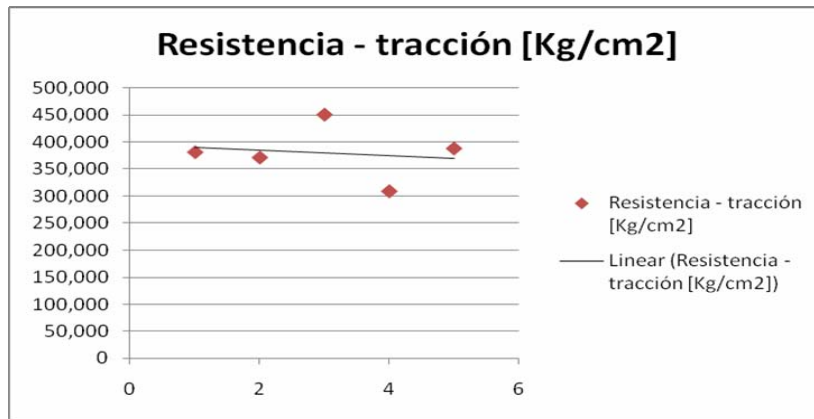


Fig. 7.7 Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado

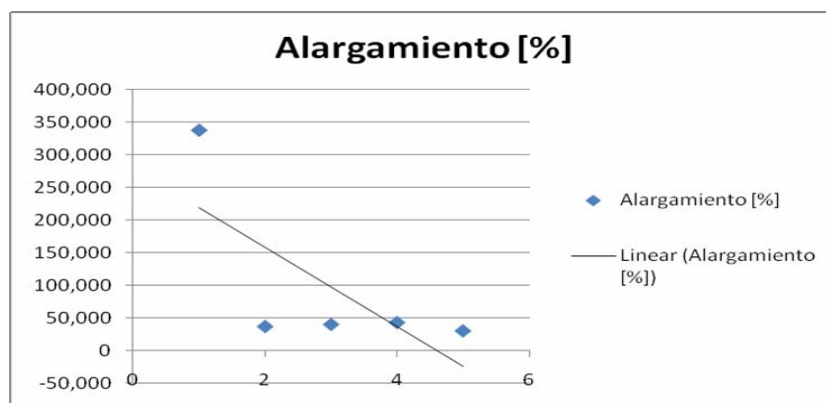


Fig. 7.8 Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado

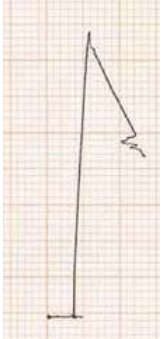
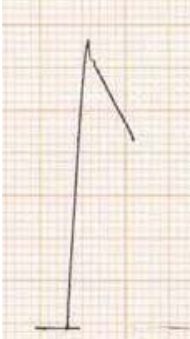

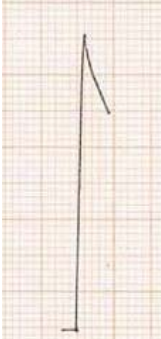

Con éste tipo de material la resistencia a la tracción es baja con respecto a los otros tipos de materiales, en un rango de 308,363 a 450,732 [Kg/cm2]; el alargamiento porcentual en un rango de 30,005 a 338,127%, es decir un gran alargamiento porcentual, los valores de alargamiento porcentual presentaron una gran dispersión.

PET EXTRUIDO – ESCAMAS CONTAMINADAS

Tabla 7.6 Tabla de resultados con escamas contaminadas

No.	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Li [mm]	Lf [mm]	Alargamiento [%]	Carga max. [mm]	Carga máx. [Kg]	Resistencia - tracción [Kg/cm ²]
1	1,54	1,863	56,76	57,58	1,445	40	8,0	429,496
2	1,40	1,539	50,50	52,68	4,317	34	6,8	441,736
3	1,58	1,961	48,58	48,84	0,535	41	8,2	418,225
4	1,58	1,961	62,32	62,42	0,160	41	8,2	418,225
5	1,22	1,169	50,20	50,36	0,319	12	2,4	205,306

Tabla 7.7 Diagramas obtenidos en el ensayo

No.	1	2	3	4	5
Diagrama					

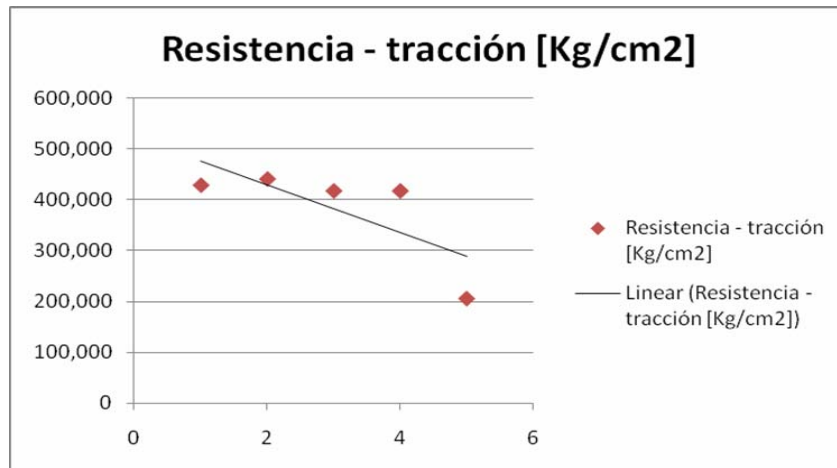


Fig. 7.9 Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas contaminadas con respecto al número de ensayo realizado

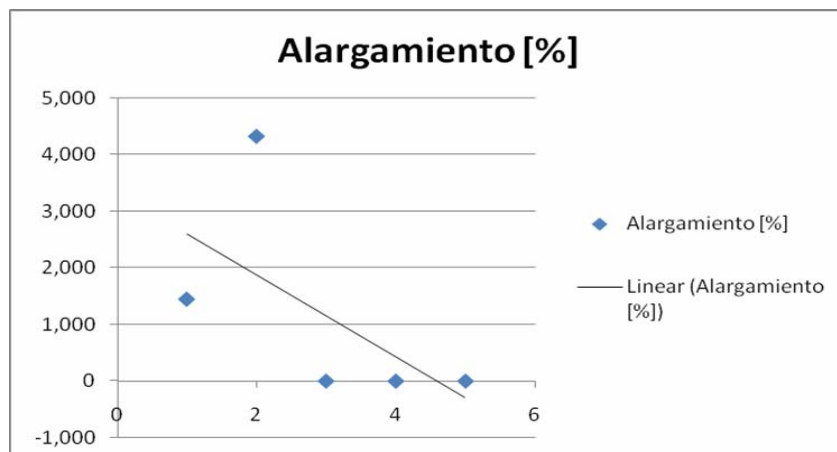


Fig. 7.10 Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas contaminadas con respecto al número de ensayo realizado

Con éste tipo de material la resistencia a la tracción es similar con respecto a los ensayos realizados con el PET lavado, en un rango de 205,306 a 441,736 [Kg/cm²]; el alargamiento porcentual es muy bajo en un rango de 0,160 a 4,317%, es decir un pobre alargamiento porcentual. Los valores de alargamiento porcentual presentaron una gran dispersión, mientras que los valores de resistencia a la tracción presentaron una menor dispersión.

SEGUNDO GRUPO DE ENSAYOS

PET EXTRUIDO – ESCAMAS LAVADAS

Tabla 7.8 Tabla de resultados con escamas lavadas (segundo grupo de ensayos)

No.	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Li [mm]	Lf [mm]	Alargamiento [%]	Carga máx. [mm]	Carga máx. [Kg]	Resistencia - tracción [Kg/cm ²]
1	1,34	1,410	49,32	64,48	30,738	28	5,6	397,090
2	1,50	1,767	55,96	66,78	19,335	31	6,2	350,848
3	1,42	1,584	48,24	60,60	25,622	31	6,2	391,494
4	1,36	1,453	61,86	70,00	13,159	22	4,4	302,890
5	1,32	1,368	63,58	75,24	18,339	25	5,0	365,369
6	1,40	1,539	67,02	81,32	21,337	30	6,0	389,767
7	1,28	1,287	65,54	82,36	25,664	30	6,0	466,274
8	1,36	1,453	64,54	79,06	22,498	31	6,2	426,800
9	0,98	0,754	69,54	77,40	11,303	22	4,4	583,325
10	1,68	2,217	62,38	73,00	17,025	30	6,0	270,672
11	1,40	1,539	69,94	97,40	39,262	27	5,4	350,790
12	1,32	1,368	59,28	71,82	21,154	27	5,4	394,599
13	1,28	1,287	67,84	76,34	12,529	28	5,6	435,189
14	1,40	1,539	73,98	177,94	140,524	23	4,6	298,822

Tabla 7.9 Diagramas obtenidos en el ensayo

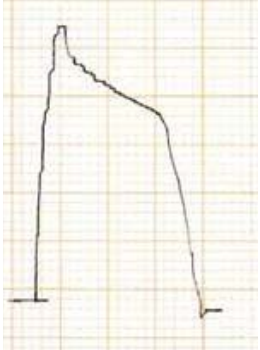
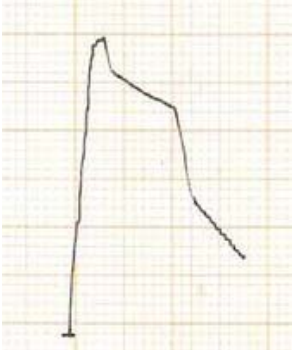
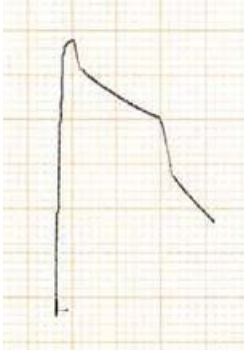



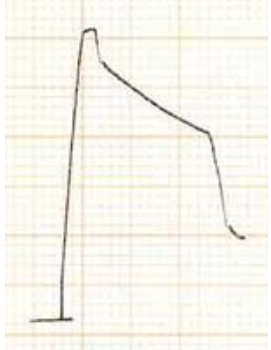
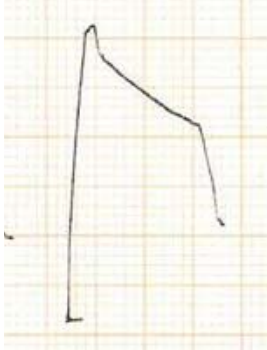


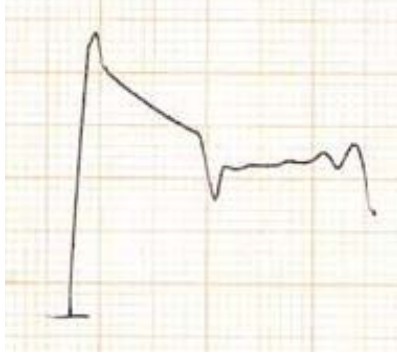

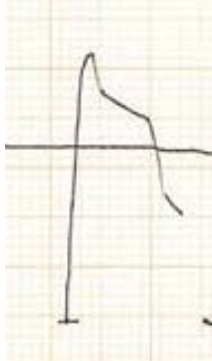

No.	1	2	3	4	5
Diagrama					
No.	6	7	8	9	10
Diagrama					

Tabla 7.9 Diagramas obtenidos en el ensayo (continuación)

No.	11	12	13	14
Diagrama				

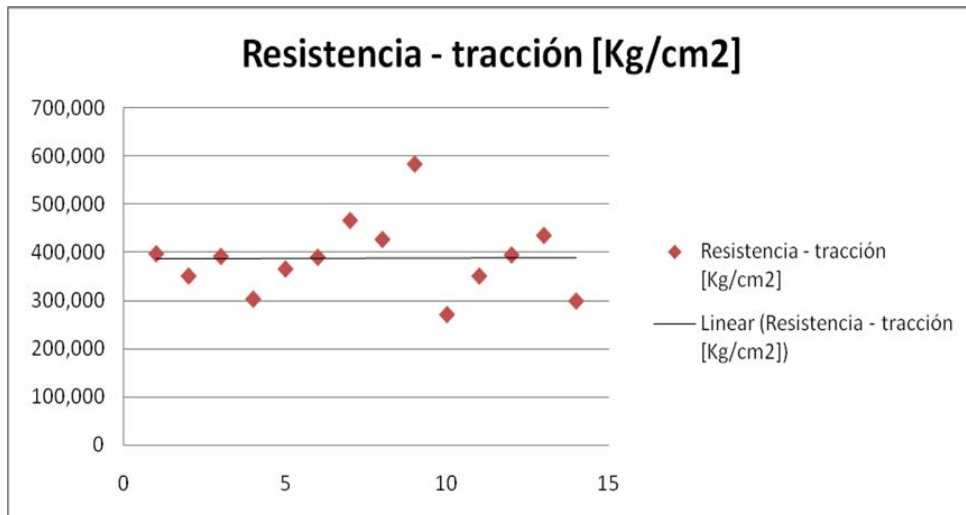


Fig. 7.11 Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado

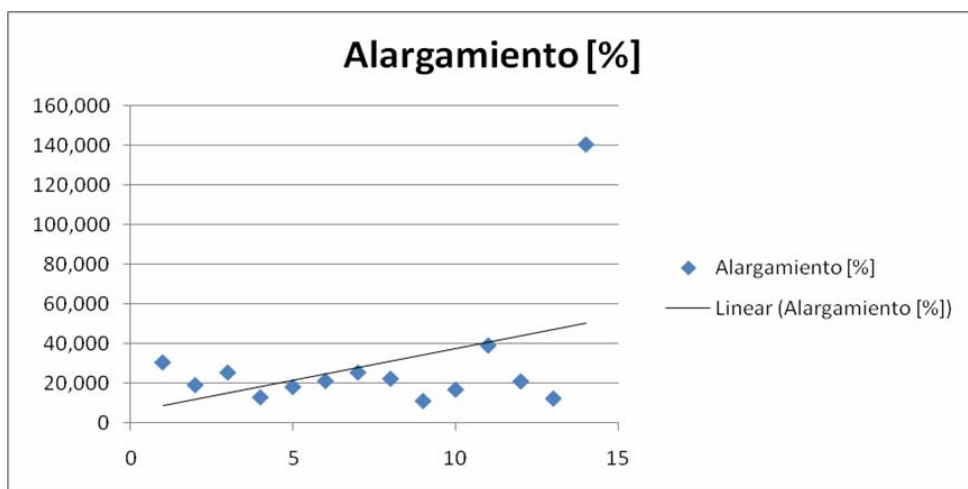


Fig. 7.12 Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado

Con éste tipo de material la resistencia a la tracción es similar con respecto a los ensayos realizados con el PET lavado de los primeros ensayos, la resistencia a la tracción está en un rango de 270,672 a 466,274 [Kg/cm²]; el alargamiento porcentual de igual manera es similar a los primeros ensayos con éste tipo de material en un rango de 11,303 a 140,524%, es decir, un buen alargamiento porcentual. Los valores de alargamiento porcentual presentaron poca dispersión al igual que los valores de resistencia a la tracción.

PET EXTRUIDO – ESCAMAS LAVADAS Y SECADAS

Tabla 7.10 Tabla de resultados con escamas lavadas y secadas

No.	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Li [mm]	Lf [mm]	Alargamiento [%]	Carga max. [mm]	Carga máx. [Kg]	Resistencia - tracción [Kg/cm ²]
1	1,52	1,815	65,84	209,00	217,436	58	11,6	639,265
2	1,72	2,324	75,04	95,94	27,852	55	11,0	473,419
3	1,68	2,217	68,28	147,18	115,554	60	12,0	541,343
4	1,48	1,720	68,62	94,94	38,356	47	9,4	546,405
5	1,86	2,717	65,28	90,96	39,338	58	11,6	426,916
6	1,48	1,720	89,72	210,00	134,062	44	8,8	511,528
7	1,54	1,863	116,82	247,00	111,436	34	6,8	365,071
8	1,68	2,217	79,14	96,48	21,911	39	7,8	351,873
9	1,44	1,629	91,90	183,00	99,129	49	9,8	601,743
10	0,88	0,608	137,56	260,00	89,008	14	2,8	460,366
11	1,68	2,217	71,70	92,78	29,400	53	10,6	478,187
12	1,20	1,131	86,22	206,00	138,924	29	5,8	512,833
13	1,40	1,539	82,80	248,00	199,517	34	6,8	441,736
14	1,06	0,882	105,16	281,00	167,212	23	4,6	521,262
15	1,60	2,011	79,70	156,32	96,136	41	8,2	407,835
16	1,22	1,169	90,40	140,48	55,398	27	5,4	461,939

Tabla 7.11 Diagramas obtenidos en el ensayo

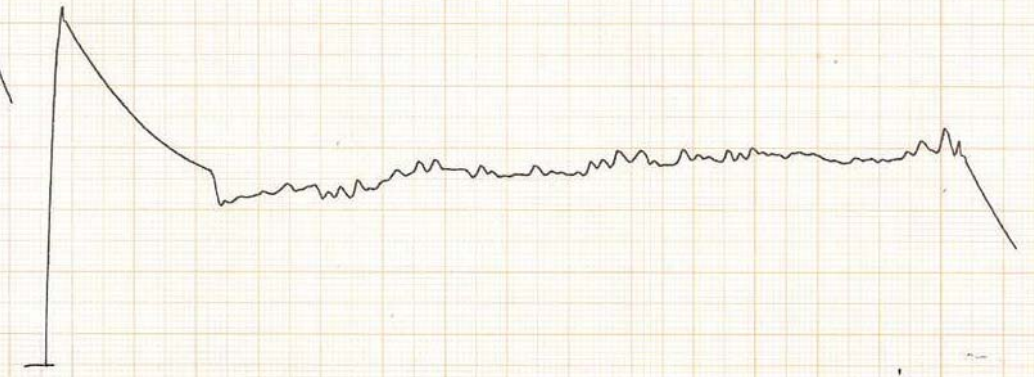
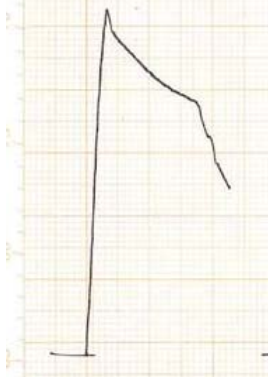
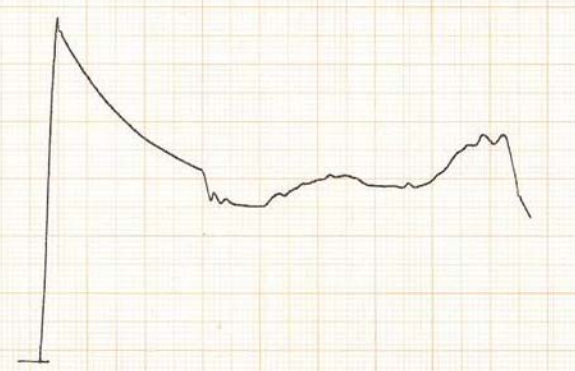
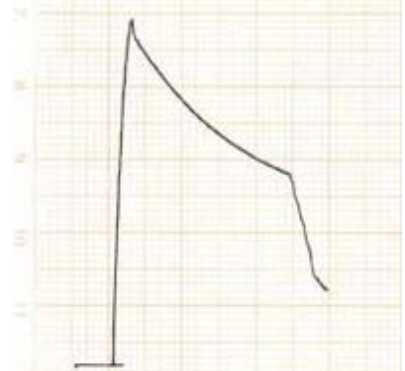

No.	1		2	
Diagrama				
No.	3	4	5	
Diagrama				

Tabla 7.11 Diagramas obtenidos en el ensayo (continuación)

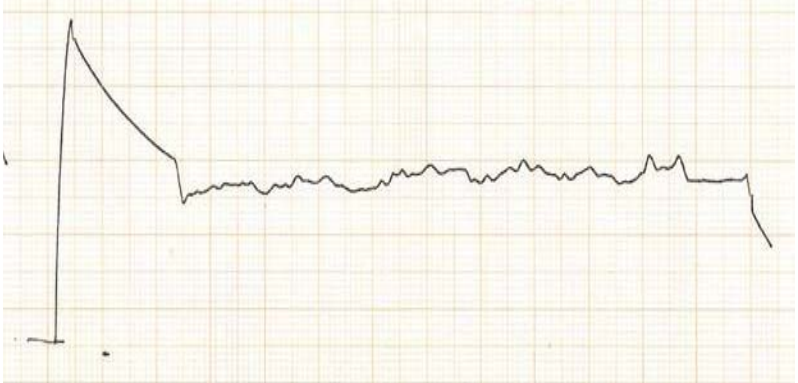
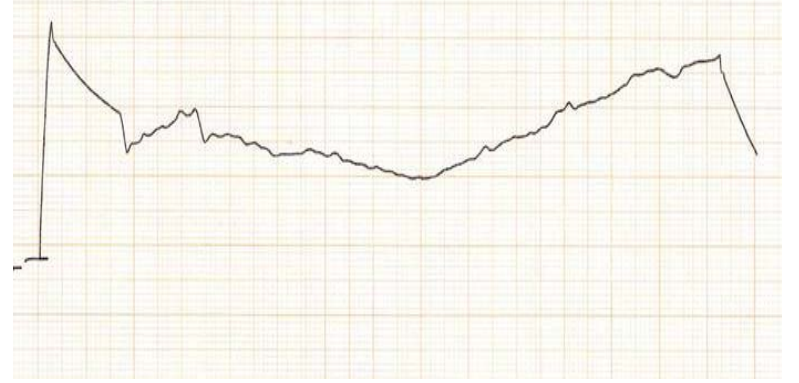
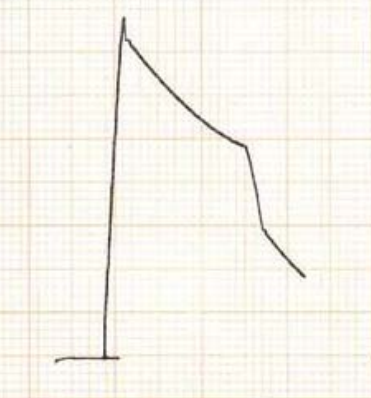

No.	6	7
Diagrama		
No.	8	9
Diagrama		

Tabla 7.11 Diagramas obtenidos en el ensayo (continuación)


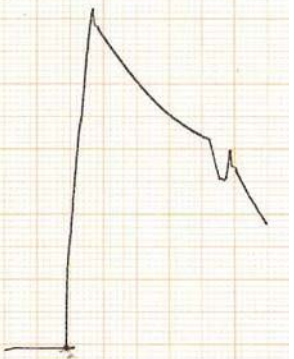
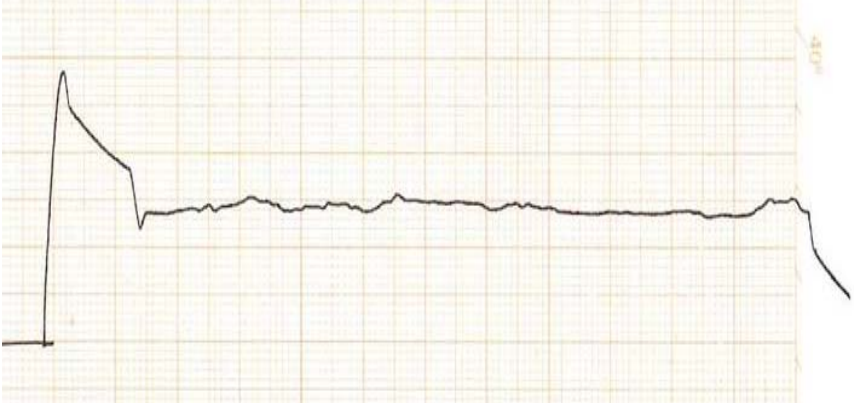
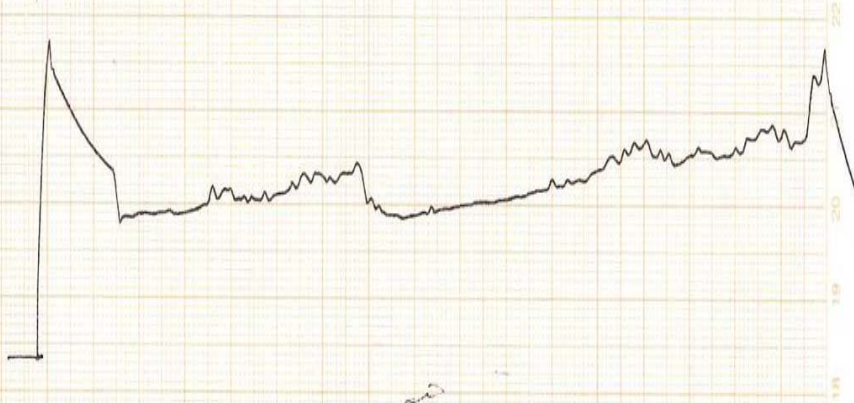
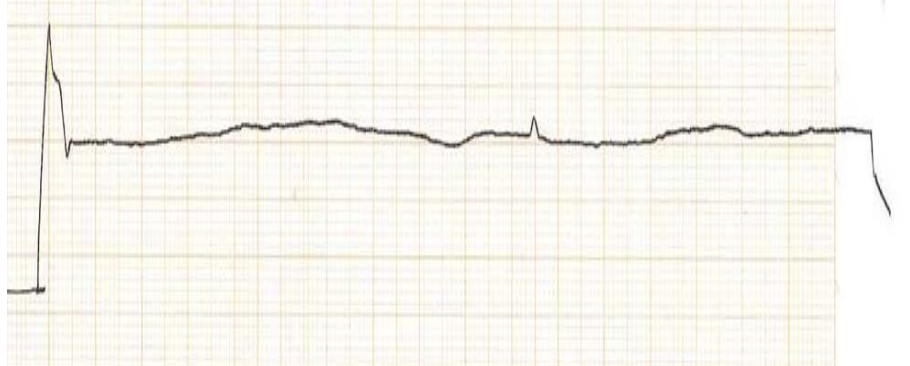


No.	10	11
Diagrama		
No.	12	13
Diagrama		

Tabla 7.11 Diagramas obtenidos en el ensayo (continuación)

No.	14	15
Diagrama		
No.	16	
Diagrama		

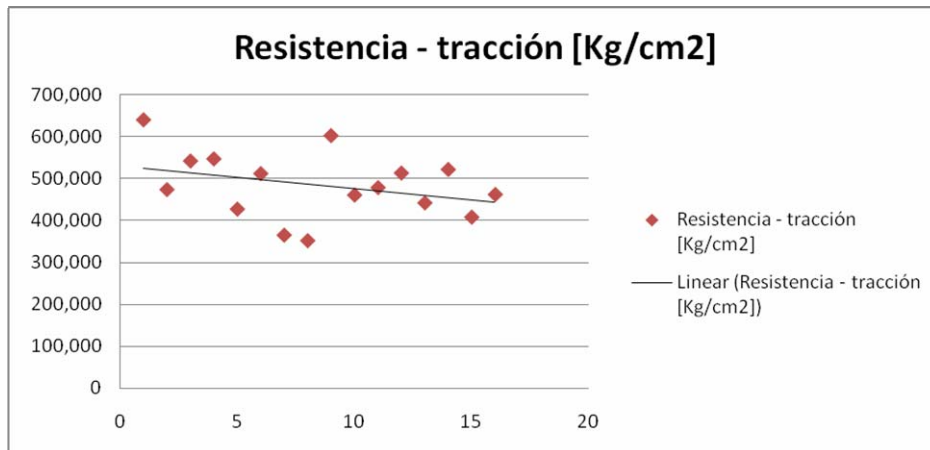


Fig. 7.13 Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas y secadas con respecto al número de ensayo realizado

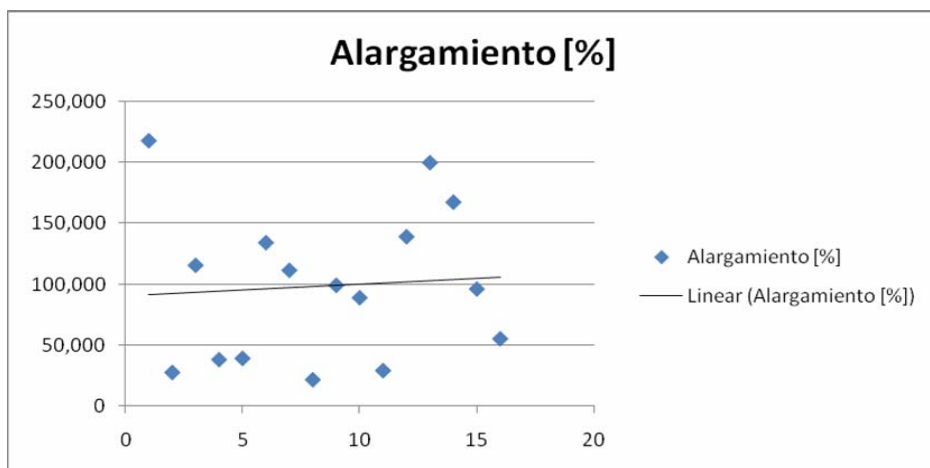


Fig. 7.14 Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas y secadas con respecto al número de ensayo realizado

Con éste tipo de material la resistencia a la tracción presentó los mejores resultados para el material extruido, está en un rango de 351,873 a 639,265 [Kg/cm2]; el alargamiento porcentual, así mismo, tiene muy buenas propiedades, es así que los valores de alargamiento porcentual están en un rango de 21,911 a 217,436%.