



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio de las propiedades mecánicas del corcho  
natural y sus aglomerados

Study of the mechanical properties of natural cork and  
its agglomerates

Autor

Manuel Rafael Bello Legua

Director

Ramon Miralbés Buil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (Universidad de Zaragoza)

2020





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D<sup>ña</sup>. **Manuel Rafael Bello Legua** ,en

aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado

(Título del Trabajo)

Estudio de las propiedades mecánicas del corcho natural y sus aglomerados.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 de Junio del 2020.

Fdo: Manuel Rafael Bello Legua

# Estudio de las propiedades mecánicas del corcho natural y sus aglomerados

## Resumen

El poliestireno expandido o EPS se ha convertido en un material muy utilizado en diversos sectores por sus propiedades físicas y mecánicas, entre las que destaca su capacidad de absorber energía. Su origen no renovable y el mal comportamiento ante las deformaciones hace que sea necesario buscar alternativas que tengan una vida útil mayor, incluso tras sufrir una deformación severa y que tenga un origen renovable. En la búsqueda de materiales que puedan sustituir en la industria el uso del EPS nos encontramos con el corcho natural y sus aglomerados.

El corcho natural presenta, al igual que el EPS, una microestructura de celda cerrada que lo dota de propiedades mecánicas muy parecidas, pero con un comportamiento elástico mucho mayor, siendo un material de origen natural y por tanto renovable.

Si bien el corcho natural presenta buenas propiedades mecánicas, estas solo son sobresalientes en la dirección perpendicular a la superficie, ya que se trata de un material ortótropo. El empleo de materiales conglomerados de corcho podría resolver este problema al presentarse como materiales homogéneos y sin simetrías.

En este trabajo fin de grado se realiza la caracterización y el estudio de las propiedades mecánicas a compresión de varios conglomerados de corcho, así como también del corcho natural y de una variedad de poliestireno expandido, con el fin de compararlos. También se analiza la variación de sus propiedades mecánicas al someterlos a ciclos de carga y descarga, para distintos valores de deformación.

Para realizar este trabajo ha sido necesario la fabricación de las probetas de los distintos materiales, su posterior ensayo a compresión (realizando ciclos de carga y descarga), el tratamiento de la información obtenida para la elaboración de los resultados y por último el análisis crítico de los mismos.

## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	- 1 -
1.1. Estado del arte .....	- 2 -
1.2. Módulo de Poisson y Gom Correlate .....	- 3 -
1.3. Objeto y Alcance .....	- 3 -
2. MATERIALES EMPLEADOS .....	- 5 -
2.1. El corcho.....	- 5 -
2.1.1. La obtención y procesado del corcho.....	- 6 -
2.1.2. Características y propiedades del corcho virgen y derivados .....	- 6 -
2.1.3. Propiedades mecánicas de los corchos.....	- 7 -
2.2. Corchos empleados en el trabajo .....	- 8 -
2.3. El EPS o Poliestireno expandido .....	- 9 -
2.3.1. Obtención y procesado del EPS .....	- 9 -
2.3.2. Características y propiedades del EPS .....	- 9 -
2.3.3. Propiedades mecánicas del EPS.....	- 10 -
2.4. El EPS empleado.....	- 11 -
3. MÉTODOS .....	- 12 -
3.1. Marco normativo en el que se sitúa este trabajo.....	- 12 -
3.2. Fabricación de las probetas.....	- 13 -
3.3. Ensayos a compresión, equipo empleado y desarrollo de los ensayos.....	- 15 -
4. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS .....	- 17 -
4.1. Cálculo de la densidad y granulometría .....	- 17 -
4.2. Comportamiento de los materiales durante los ensayos.....	- 17 -
4.3. Ensayos de compresión al 90% de deformación .....	- 20 -
4.3.1. Curva tensión frente a deformación .....	- 20 -
4.3.2. Curva de tensión específica frente a la deformación.....	- 23 -
4.3.3. Energía absorbida.....	- 23 -
4.3.4. Eficiencia de los materiales.....	- 25 -
4.3.5. Idealidad de los materiales .....	- 27 -
4.4. Evolución de las propiedades mecánicas con los ciclos de carga. ....	- 28 -
4.4.1. Curvas tensión deformación y tensión específica deformación.....	- 28 -
4.4.2. Variación de la energía absorbida .....	- 29 -
4.4.3. Evolución de la eficiencia e idealidad.....	- 31 -
5. GOM Correlate y cálculo del módulo de Poisson.....	- 34 -

6.	RESULTADOS.....	- 35 -
6.1.	Resultados obtenidos durante los ensayos. ....	- 35 -
6.2.	Resultados obtenidos del análisis de los datos.....	- 35 -
7.	Bibliografía .....	- 38 -
	Anexos.....	- 40 -
B	Anexo: Materiales y métodos.....	- 41 -
B.1	El corcho.....	- 41 -
B.1.1	¿Qué es el corcho? Obtención y proceso productivo. ....	- 41 -
B.1.2	La obtención del corcho .....	- 41 -
B.1.3	Procesado del corcho.....	- 41 -
B.1.4	Características y propiedades del corcho virgen y derivados. ....	- 42 -
B.1.5	Propiedades mecánicas del corcho:.....	- 43 -
B.1.6	Propiedades físicas y químicas del corcho .....	- 43 -
B.1.7	Corchos empleados .....	- 44 -
B.2	El EPS o Poliestireno expandido .....	- 45 -
B.2.1	Obtención del EPS .....	- 45 -
B.2.2	Características y propiedades del EPS. ....	- 46 -
B.2.3	El EPS empleado.....	- 47 -
C	Anexo: Cálculo de densidad de las probetas y designación de los materiales. ....	- 48 -
D	Anexo: Granulometría.....	- 49 -
E	Anexo: Marco regulatorio. ....	- 54 -
F	Anexo: Fabricación de las probetas. ....	- 55 -
G	Anexos: Ensayos. ....	- 57 -
G.1	Elemento que intervenían en cada ensayo .....	- 57 -
G.2	Desarrollo de los ensayos .....	- 57 -
G.3	Imágenes de las probetas. ....	- 58 -
H	Anexo: Comportamiento de los materiales durante ensayos .....	- 60 -
I	Anexo: Resultados de los ensayos al 90% de deformación, caracterización de los materiales.....	- 71 -
I.1	Cálculo de los parámetros empleados para el análisis y la caracterización de los materiales .....	- 71 -
I.2	Curva tensión frente a deformación.....	- 74 -
I.3	Curva de tensión específica frente a la deformación.....	- 77 -
I.4	Energía absorbida por unidad de volumen. ....	- 78 -
I.5	Energía absorbida por Kg de material. ....	- 79 -

I.6	Eficiencia de los materiales .....	- 80 -
I.7	Idealidad de los materiales .....	- 82 -
I.8	Conclusiones caracterización de los materiales.....	- 83 -
J	Anexo: Cálculo de los parámetros: módulo de Young, módulo de platea y tensiones del límite elástico y de inicio de la densificación.....	- 85 -
K	Anexo Gom Correlate y módulo de Poisson.....	- 87 -
L	Anexo Manual GOM Correlate.....	- 94 -
M.1	WA295.....	- 102 -
M.1.1	Ensayos al 90% de deformación. ....	- 102 -
M.1.2	Ensayos al 75% .....	- 106 -
M.1.3	Ensayos al 62,5% de deformación .....	- 110 -
M.1.4	Ensayos al 50% .....	- 114 -
M.2	WA235.....	- 118 -
M.2.1	Ensayos al 90% de deformación. ....	- 118 -
M.2.2	Ensayos al 75% .....	- 122 -
M.2.3	Ensayos al 62,5% .....	- 126 -
M.2.4	Ensayos al 50% .....	- 130 -
M.3	WA255.....	- 134 -
M.3.1	Ensayos al 90% .....	- 134 -
M.3.2	Ensayos al 75% .....	- 138 -
M.3.3	Ensayos al 62,5% .....	- 141 -
1.1.1.	Ensayos al 50% .....	- 145 -
M.4	Material NC170 .....	- 150 -
M.4.1	Ensayos al 90% .....	- 150 -
1.1.2.	Ensayos al 75% .....	- 154 -
M.4.2	Ensayos al 62,5% .....	- 158 -
M.4.3	Ensayos 50% .....	- 162 -
M.5	Material AC250 .....	- 166 -
M.5.1	Ensayos 90% .....	- 166 -
M.5.2	Ensayos 75% .....	- 170 -
M.5.3	Ensayo al 62,5% .....	- 174 -
M.5.4	Ensayos al 50% .....	- 178 -
M.6	Material BA120 .....	- 182 -
M.6.1	Ensayos al 90% .....	- 182 -
M.6.2	Ensayos al 75% .....	- 186 -
M.6.3	Ensayo 62,5% .....	- 190 -

M.6.4	Ensayos 50% .....	- 194 -
M.7	Material EPS75 .....	- 198 -
M.7.1	Ensayos al 90% .....	- 198 -
M.7.2	Ensayos al 75% .....	- 202 -
M.7.3	Ensayos al 62,5% .....	- 206 -
M.7.4	Ensayos al 50% .....	- 210 -

## 1. INTRODUCCIÓN

El EPS o poliestireno expandido es un material muy utilizado a nivel industrial, por sus buenas propiedades físicas, químicas y mecánicas [1]. Algunas de estas son su capacidad de aislamiento térmico y sonoro, su capacidad de absorber energía, su larga vida útil o su facilidad de conformado en una gran variedad de formas y geometrías. Uno de los usos más interesantes del EPS es como elemento de absorción de energía en la fabricación de cascos[2].

El propósito de un casco es proteger la cabeza del portador ante posibles lesiones, fruto de un impacto en la cabeza durante un accidente. El empleo de materiales que absorban gran cantidad de energía es importante, pero también lo es evitar tensiones pico elevadas ya que pueden provocar momentos y aceleraciones que se pueden transmitir a la cabeza con efectos muy peligrosos para la salud y vida del accidentado [2]–[4].

En este contexto, los materiales de la familia de las espumas [5] son muy interesantes, pero en especial el EPS por su elevada capacidad de absorber energía específica. Esto hace que, una gran proporción de los cascos producidos, usen este material. Pero el EPS tiene varios problemas, entre ellos está el hecho de que una vez se ha producido una deformación, por un impacto o una carga, (como se verá en este trabajo) el material no se recupera de esta deformación produciendo un empeoramiento en el comportamiento mecánico que presenta ante un impacto posterior en la misma zona, y perdiendo entre otras características su capacidad de absorber energía. Este hecho es conocido por los fabricantes y usuarios de estos equipos, los cuales recomiendan cambiar los cascos tras haber sufrido un impacto, no solo, fruto de un accidente, sino también una caída desde una altura considerable. Vemos, por ejemplo, foros y blogs en internet sobre el mundo de las motos que advierte sobre este hecho [6]. A esto hay que añadir su origen no renovable.

En este contexto nace la idea de buscar materiales con propiedades mecánicas similares a las del EPS, pero con mejor comportamiento cuando son deformados por una carga de forma repetitiva. El corcho y todos sus derivados aparecen como una opción muy interesante, al tener una estructura interna de celda cerrada similar a la del EPS, pero con un mejor comportamiento elástico, y sin tener una densidad muy elevada [7], además de ser un material de origen natural y renovable.

Existen distintos tipos de corcho atendiendo al proceso de fabricación al que se somete la materia prima. No solo se emplea el corcho virgen curado (usado para la fabricación de tapones de botella), sino que también se producen una gran variedad de conglomerados de corcho de distintas densidades, con distintos tamaños de grano y a los que se han sometido a procesos químicos y mecánicos muy variados. En definitiva, materiales con propiedades y características diferentes. El empleo de conglomerados nos permite obtener un material, a priori homogéneo en su composición y que deja de ser ortótropo como lo es el corcho virgen.

En este trabajo se van a estudiar y comparar 7 materiales: 5 conglomerados producidos a partir del corcho, el propio corcho natural y el poliestireno expandido.

### 1.1. Estado del arte

El estudio de las espumas y los materiales con estructura de celdas, tanto abiertas como cerradas, ha sido motivo de investigación durante mucho tiempo, y en la actualidad se trata de un campo en el que abundan los artículos y estudios de todo tipo, por citar alguno de los empleados en el trabajo, véanse las referencias [8]–[13]. Pero dentro de todos estos estudios, existe un referente común y que prácticamente se cita siempre. Se trata del trabajo de L. Gibson y M. Ashby [5] en el que los autores ahondan en el análisis y cálculo de las propiedades mecánicas de los materiales con estructura de celdas, llegando a establecer modelos con los que predecir el comportamiento de estos materiales, y en especial el del corcho [14].

Si bien la literatura sobre el corcho es muy amplia [13]–[17], y se realizan estudios muy variados y algunos muy curiosos, como el [16] en el que se analiza si la intensidad, durante la saca, empleada en la obtención del corcho de los alcornoques tiene algún efecto en las propiedades del material obtenido. Existen menos estudios que se centren en materiales conglomerados de corcho [18], [19] y menos aún (por lo menos, no se han encontrado) que aborden el comportamiento de los conglomerados de corcho ante ciclos de carga y descarga.

Se va a hacer una mención especial a una serie de artículos, ya que han sido la base de este trabajo y han servido para enfocar como elaborar y presentar los resultados de este trabajo. Estos artículos también introducen algunos conceptos que se van a emplear, como son el concepto de eficiencia y el concepto de idealidad de un material.

En el artículo, *3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption* [12], se hace un estudio de las propiedades mecánicas a compresión de una serie de probetas de estructura celular realizadas con impresión 3D, en este artículo se nos define el concepto de eficiencia. Este concepto de eficiencia también es usado en otros artículos [20]–[22].

La eficiencia es un concepto que relaciona la energía que absorbe un material respecto a el valor de tensión al que es sometido. El parámetro, **eficiencia** ( $e$ ), se puede definir, para un valor de deformación concreto, como la integral de la tensión a la que se somete el material desde el inicio de la deformación hasta el momento de cálculo, dividida por el valor de tensión al que está sometida en el momento en el que queremos calcular la eficiencia.

*Ecuación 1*

$$e = \int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma}$$

La eficiencia nos permite hacernos una idea de cómo se produce la absorción de energía en un material a medida que la estructura del material se deforma. Por poner un ejemplo, si dos materiales absorben la misma cantidad hasta un valor de deformación concreto, se considerará más eficiente aquel cuyos valores de tensión sean menores.

En el artículo, *Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram* [20], se realiza el estudio de las propiedades mecánicas de tres espumas poliméricas mediante ensayos estáticos y de impacto. En este artículo se pone de relieve la importancia del parámetro de la eficiencia, ya que cuando alcanza su valor máximo durante el ensayo, el material estaría trabajando bajo las condiciones óptimas para maximizar la absorción de energía. El problema viene cuando la curva tensión-deformación de un material no es siempre creciente y en estos casos sería

mejor plantear un parámetro de eficiencia respecto a tensión máxima que experimenta el material y no sobre la que soporta en cada instante, al que llaman eficiencia total. Si la curva es creciente esta eficiencia total y la eficiencia serían las mismas.

En este artículo se define también el concepto idealidad (I), como otro indicador de la efectividad del uso del material durante la deformación. La idealidad es la relación entre la eficiencia y el valor máximo de deformación, se define de la siguiente manera:

*Ecuación 2*

$$I = \int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma\varepsilon}$$

Un material que absorbiese energía de forma ideal sería aquel que absorbiese la energía a un valor de tensión constante hasta alcanzar un valor de deformación concreto.

Uno de los objetivos de este trabajo es el estudio de la evolución de las propiedades de varios materiales al sufrir ciclos de compresión, algo similar se realiza en el en el *artículo, Quasi-static and high strain rates compressive response of iron and Invar matrix syntactic foams* [22], en este artículo se presentan los resultados del estudio. Algunas de las gráficas que se obtienen para exponer los resultados de este trabajo se inspiran en las de este artículo.

### 1.2. Módulo de Poisson y Gom Correlate

Teóricamente el corcho natural al recibir una carga de compresión en dirección radial se comprime sobre su propia estructura de celdas sin deformación tangencial [14]. Por lo tanto, el módulo de Poisson del material es cero o muy próximo a este valor. Se quiere saber en qué medida se cumple esto para los materiales ensayados ya que son en su mayoría subproductos del corcho natural, y presentan una estructura de celdas semejante. Con el fin de calcular el módulo de Poisson se empleará un programa que nos permite medir las deformaciones **GOM Correlate** mediante el tracking de la deformación de un patrón estocástico, que se preparó en la probeta con anterioridad.

### 1.3. Objeto y Alcance

Este trabajo consiste en la caracterización y comparación del comportamiento mecánico del EPS75 frente al comportamiento de varios materiales de la familia de los corchos, incluyendo el corcho natural.

Tanto el poliestireno expandido como el corcho presentan unas características microestructurales similares, pues ambos son materiales cuya microestructura está formada por celdas cerradas. Si bien las características mecánicas del corcho y el poliestireno expandido han sido objeto de estudio en multitud de publicaciones, los materiales conglomerados derivados del corcho son materiales que a pesar de su extendido uso en la industria, en una gran variedad de formas y aplicaciones, no tienen un estudio tan amplio de sus características y propiedades. El poliestireno expandido tiene una elevada capacidad de absorber energía, aunque teóricamente esta capacidad se pierde una vez el material se ha deformado. Este hecho hace que la vida útil, en términos de su capacidad de absorción energética, llegue a su fin tras sufrir un impacto o una fuerza que provoque una

deformación. El origen no renovable del EPS y sus limitaciones nos ha llevado a buscar alternativas de origen renovables. En este contexto surge este trabajo, en el que se comparará las características mecánicas del EPS con las del corcho y se verá en qué medida los conglomerados de corcho comercial pueden o no, competir con las prestaciones mecánicas que tiene el EPS.

Para realizar este trabajo, se han fabricado en un taller las probetas de los distintos materiales y se han ensayado a compresión de forma cíclica, para distintos valores de deformación, empleando una INSTRON 8032. Después se han utilizado los resultados obtenidos en estos ensayos para comparar los distintos materiales entre sí, y ver las fortalezas y debilidades que presentan estos conglomerados de corcho comerciales frente al EPS empleado, el EPS75.

Por último, se ha tratado de calcular el módulo de Poisson de los distintos materiales empleando un software que permite medir la deformación transversal de los materiales durante los ensayos a partir de la variación relativa de los puntos de un patrón estocástico, pintado en las superficies de algunas de las probetas empleadas.

## 2. MATERIALES EMPLEADOS

En este apartado se van a estudiar los materiales empleados con el fin de entender el origen de sus propiedades y características. Se buscará entender el por qué estos materiales son tan utilizados en distintos ámbitos, como pueden ser: la construcción, el embalaje o incluso la elaboración de material de protección personal, como por ejemplo cascos. Así como las similitudes microestructurales que llevan a realizar este trabajo.

Para ello primero es necesario hablar del origen, de la fabricación, de las características microestructurales y de las propiedades mecánicas, físicas, químicas y biológicas que puedan ser de interés desde un punto de vista industrial tanto para el corcho como para el EPS. En el Anexo B, se encontrará esta información ampliada.

### 2.1. El corcho

El corcho es un material de origen natural y renovable, se obtiene de la corteza de los alcornoques (*Quercus suber L.*), un árbol que crece sólo en determinadas regiones del oeste mediterráneo (Portugal, España, sur de Francia, en una parte de Italia, norte de África) y China.



*Figura 1: Mapa de la distribución del alcornoque.  
[APCOR]*

Europa representa más del 80% de la producción mundial de corcho. El mayor productor es Portugal, con cerca de tres cuartas partes de la producción mundial [7], [23].

### 2.1.1. La obtención y procesado del corcho

La obtención del corcho se hace por medio de la saca, proceso por el que se quita la corteza a los alcornoques. Este proceso se realiza cada nueve años y solo en árboles adultos [23]–[25].

El corcho extraído, al que nos referiremos como corcho virgen para diferenciarlo de otros subproductos, es seleccionado dependiendo de la calidad superficial que presente.

El corcho que presenta mejor calidad superficial se destina a la producción principalmente de corchos de botella, pero también elementos decorativos para el sector de la construcción.



Figura 2. Trabajadores realizando la saca del corcho. [15]



Figura 3: Trabajadores apilando planchas de corcho. [15]

Todos los corchos comercializados, a excepción del corcho virgen, tienen una etapa del proceso productivo común, el curado. El curado consiste en hervir el corcho durante una hora en agua y dejar en reposo durante un año. Previo a su utilización en cualquier proceso se vuelve a hervir, esto produce la expansión del gas contenido en las celdas que conforman la microestructura del material, dotando al corcho de una mayor flexibilidad [7].

### 2.1.2. Características y propiedades del corcho virgen y derivados

Para poder entender las características y propiedades mecánicas del corcho, primero se ha de comprender su estructura.

El corcho se puede describir como un material formado por un tejido homogéneo de celdas de paredes delgadas dispuestas de forma regular y sin espacio entre ellas. Estas celdas son análogas, en forma, a las de un panal de miel y estarían compuestas principalmente por suberina y cerina. Al no haber espacios vacíos entre las celdas, se crea una estructura de celdas cerradas en cuyo interior quedaría atrapado gas, en general aire. Esto se puede observar en la Figura 4.

El tamaño de las celdas varía enormemente de un árbol a otro e incluso de una zona a otra, esto hace que la densidad del corcho sea muy variable incluso entre distintas zonas del mismo árbol, haciendo imposible establecer una densidad general del corcho como material.

La disposición de las celdas no es aleatoria, la estructura de celdas se podría describir como prismas rectangulares, dispuestos base con base en columnas paralelas a la dirección radial del tronco del árbol. Esta orientación hace que la estructura del corcho presente simetría cilíndrica respecto del eje central del alcornoque. En muchos casos se

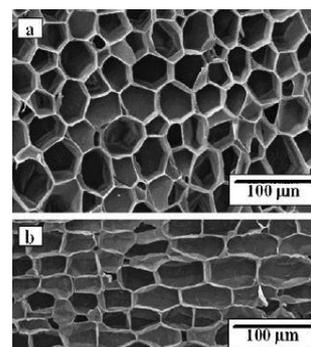


Figura 4. Estructura de celdas del corcho.[7]

considera un material transversalmente isótropo, es decir que en las direcciones perpendicular al radio del tronco las propiedades mecánicas son equivalentes. Figura 5. También hay unos canales lenticulares huecos de forma cilíndrica que discurren en dirección radial, por lo que no rompen la simetría antes mencionada [7], [16]. Estos canales lenticulares son lo que producen la porosidad superficial del corcho virgen.

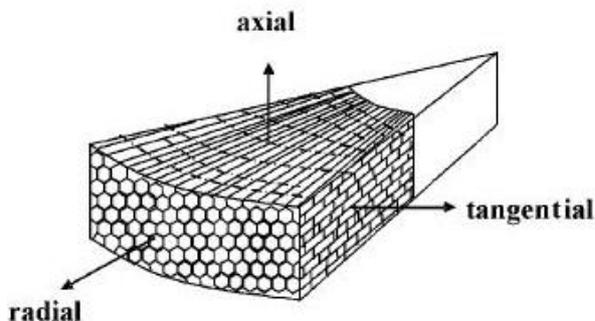


Figura 5. Disposición de las celdas en el corcho. [7, Silva]

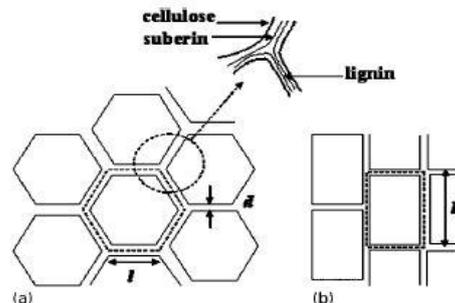


Figura 6. Componentes principales de las celdas. Celulosa, suberina y lignina. [7, Silva]

### 2.1.3. Propiedades mecánicas de los corchos

Las propiedades mecánicas que presenta el corcho han sido modelizadas en la obra de L. Gibson y M. Ashby [5] y [14]. El comportamiento de la curva tensión-deformación del corcho presenta 3 zonas, una primera zona que llega en torno al 7% de deformación y se corresponde con la zona elástica del material. En esta zona las paredes de las celdas se deforman elásticamente. Después se encuentra la zona de la platea o plateau. En esta zona la deformación se produce sin grandes variaciones en los niveles de tensión y con una pendiente o módulo, menor que el elástico, esto se debe a que a nivel microestructural se está produciendo el plegado y colapso de las paredes de las celdas sobre sí mismas. Este fenómeno se extiende hasta prácticamente un 70% de la deformación, alcanzando el punto en el que la curva tensión-deformación empieza a aumentar de forma exponencial. A esta última región se le conoce como Zona de densificación. Esto se puede ver en la Figura 7Figura 7. Curva tensión deformación del corcho. [8].

Estos mecanismos de deformación hacen que el corcho ante una compresión radial, presente un módulo de Poisson nulo o casi nulo [8], esto quiere decir que se deforma únicamente en la dirección en la que actúa la fuerza y no en las direcciones perpendiculares a la superficie donde se aplica la fuerza.

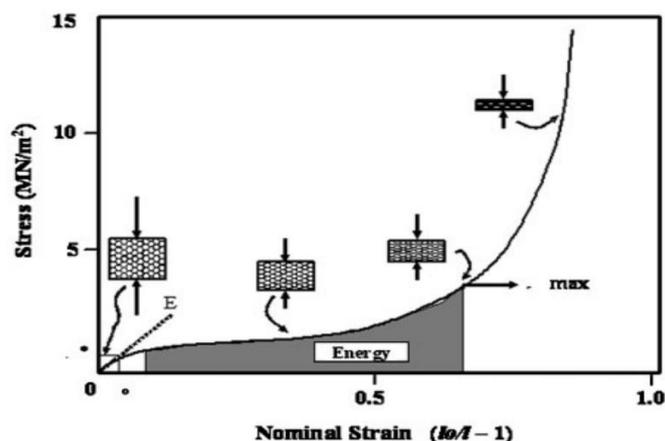


Figura 7. Curva tensión deformación del corcho. [8]

La peculiar estructura del corcho lo dota de características físicas muy útiles como aislante sonoro y térmico entre otras muchas. Sus propiedades físicas y químicas se desarrollan en el Anexo B

## 2.2. Corchos empleados en el trabajo

De los materiales derivados del corcho virgen, se han empleado cinco conglomerados de corcho diferentes y un corcho natural. Las descripciones y características dadas por los fabricantes son las siguientes, entre paréntesis aparece la designación que se le da al material, Anexo C:

NC260 (NC170) es un corcho natural y virgen lo que quiere decir que no ha sido hervido y por lo tanto no se ha producido la expansión de las celdas, sería pues un material más rígido que el corcho más común en la industria, por ejemplo, el que se emplea para tapones de vino.

WA279 (WA295), WA222 (WA235) y WA302 (WA255) son conglomerados de corcho producidos por la unión de pequeñas astillas, obtenidas mediante el triturado del corcho tratado, es decir después de hervirlo, curarlo y volverlo a hervir. El adhesivo empleado en los tres casos es una resina Epoxy. Se someten a un proceso de laminado para conseguir las planchas compactas.

AC170 (AC250) es un conglomerado de pedazos de gran tamaño de corcho virgen empleando un adhesivo, en este caso bioetanol, también se le ha aplicado una laminación para obtener la preforma de plancha de la imagen.

BA104 (BA120) es un aglomerado de corcho, es decir sin adhesivo al cual se le ha sometido a un proceso de tostado. Según la ficha técnica del material, el tostado conlleva la fusión de la suberina que actúa como aglutinante y permite la conformación del material en placas de forma totalmente natural sin necesidad de ningún aditivo químico.



Figura 8. Corchos empleados en este trabajo. [Fuente:Elaboración propia]

### 2.3. El EPS o Poliestireno expandido

El EPS es un polímero espumoso de origen no renovable muy usado en la industria, se produce a partir de otros compuestos, derivados del petróleo [26], aunque también puede aparecer en la naturaleza de forma natural. Existe constancia de que el poliestireno (PS), que es la forma no espumada del poliestireno expandido (EPS), fue descubierto en 1839 por Eduard Simon [27].

El origen no renovable del EPS se plantea como un problema que ha dado fruto a una extensa línea de estudio sobre el reciclaje del EPS [28], las características mecánicas de los productos fabricados con materia prima reciclada, formas de revalorización y de gestión del residuo como puede ser la incineración con recuperación de energía

#### 2.3.1. Obtención y procesado del EPS

El poliestireno expandido se obtiene a partir del estireno, el proceso de producción se describe en el Anexo B.2.1.

La producción de poliestireno expandido consta de tres etapas, una primera etapa de expansión, seguida de una etapa de estabilizado y una última etapa de expansión y moldeo. La materia prima en este proceso es poliestireno en forma de bolas o gránulos [29].

La primera etapa de expansión o también denominada pre-expansión determina en gran parte la densidad del material final, esto se puede lograr mediante el control de la temperatura y el tiempo de exposición a este proceso. En la tercera etapa, expansión y moldeo, se determina la forma final del producto. Estas etapas también se desarrollan en el Anexo B.

#### 2.3.2. Características y propiedades del EPS

Para entender el uso actual del EPS y su importancia en sectores tan diversos como la industria, el sector de transporte, construcción, de sanidad o incluso en la producción de

equipos de protección personal para la práctica de deportes, por ejemplo la fabricación de cascos para motoristas o ciclistas, [8] es necesario entender su estructura. Ya que, de una forma análoga al caso del corcho, de esta se derivan, sus propiedades mecánicas.

En este documento nos vamos a centrar, al igual que en el caso del corcho, en las propiedades mecánicas. Para entender el valor tecnológico que tiene este material es indispensable conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas las cuales se comentan en el Anexo B.2.2.

### 2.3.3. Propiedades mecánicas del EPS

El EPS, es una espuma, y su comportamiento mecánico se va a ajustar, al igual que en el caso del corcho, al modelo propuesto por L. Gibson y M. Ashby [5].

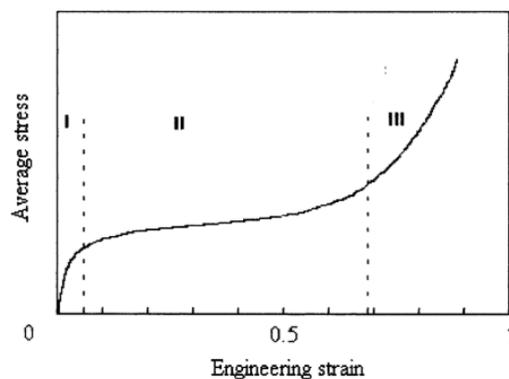


Figura 9. Curva tensión-deformación característica de los materiales espuma. [8]

Al someter el material a una tensión de compresión, la evolución teórica es la misma que en el corcho. Consta de tres zonas, una zona en la que la deformación se produce de forma elástica, una zona donde la deformación se produce a tensión prácticamente constante denominada zona de *plateau* y por último una zona en la que se produce la densificación del material y un aumento de la tensión. La deformación de las celdas es la misma que la descrita en el caso del corcho no obstante, algunos autores advierten que la deformación que se produce en el EPS no es uniforme [8], hecho que no está recogido en el modelo de L. Gibson y M. Ashby.

El EPS es conocido (y muy bien valorado) por la capacidad que tiene de absorber la energía de los impactos que se producen contra su superficie.

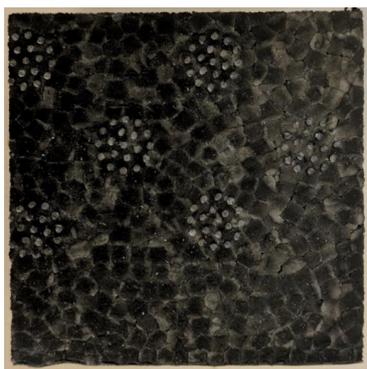
Existen dos parámetros que determinan el comportamiento del EPS, uno es la densidad y el otro es la forma y el espesor de las paredes que componen la microestructura de celdas. En el siguiente artículo [8], se ve como a mayor densidad del material, el módulo elástico aumenta y también lo hace el máximo valor de tensión en la región elástica. Otro efecto significativo es que, a mayor densidad, la densificación se produce a valores de deformación menores.

La densidad también tiene un efecto importante en la capacidad de absorber energía de impactos. El artículo concluye que, a más densidad, mayor es la absorción de energía,

pero a costa de transmitir unos valores de aceleración y fuerzas locales más altos. Por otro lado, el EPS de menor densidad absorbe menos energía, pero esta absorción la hace de una forma menos local que en el caso de EPS de alta densidad y por lo tanto la transmisión de fuerzas y momentos es menor [8].

### 2.4. El EPS empleado

Se trata de un poliestireno expandido con una densidad de  $75\text{kg/m}^3$ , utilizado como material para la producción de cascos, de aquí en adelante nos referiremos como EPS75 o simplemente EPS.



*Figura 10. Fotografía de una de las probetas de EPS75 empleadas.*

### 3. MÉTODOS

#### 3.1. Marco normativo en el que se sitúa este trabajo.

Para la realización de los ensayos de compresión se ha empleado una INSTRON 8032. Se han ensayado tanto las probetas de EPS75 como las de los distintos corchos. No existe una normativa que regule la realización de los ensayos a compresión de conglomerados de corcho, no obstante, como ya se ha visto en el apartado anterior las propiedades mecánicas del corcho y de los polímeros espumosos son similares.

Las normas que regulan los ensayos a compresión de plásticos celulares son la ISO 844 “Propiedades de compresión para plásticos celulares rígidos” [30] o ASTM D1621 “Método de prueba estándar para plásticos celulares rígidos”, al tratarse el EPS75 de un polímero celular ambas normas serán adecuadas.

Los elementos de las normas que se pueden extrapolar a nuestro ensayo están recogidos en la Tabla 1.

En este trabajo, dadas las limitaciones introducidas por el material disponible, se van a emplear probetas cuyo espesor es por lo menos 37 mm y de sección cuadrada de 37 mm de lado. 13 mm menos que los que nos marca la norma ISO 844, pero esto nos permite emplear el EPS75 disponible sin tener que añadir capas. Las probetas de conglomerado de corcho se han construido en el taller para alcanzar estas dimensiones, los motivos de esta decisión se exponen con más detalle en el Anexo E. En la Tabla 2 se ve el resumen de las normas.

Tabla 1. Normas ensayo de compresión de plásticos con estructura de celdas

<b>Velocidad del ensayo</b>	5mm/min
<b>Dimensiones mínimo de la probeta que se va a ensayar</b>	
ASTM D1621	Cubo de 25,4 mm de lado
ISO 844	50x 50 x 50
<b>Dimensiones recomendadas</b>	
ISO 844	100 x 100 X 50
<b>Empleo de capas de material para alcanzar el espesor</b>	
ASTM D1621	NO
ISO 844	NO

Tabla 2. Consideraciones finales empleadas durante los ensayos

<b>Emplearemos:</b>	
Velocidad del ensayo	5 mm/min
Dimensiones mínimas	37 mm lado

### 3.2. Fabricación de las probetas

Para la realización de los ensayos a compresión se han elaborado cinco probetas de cada material a ensayar. Un total de 35 probetas, aunque solo 28 han sido ensayadas. (En la Figura 11, se ven 8 materiales, 32 probetas, el material de la izquierda finalmente no se emplea durante los ensayos por no tener dimensiones adecuadas, y no disponer de más material para volver a mecanizar estas.)



*Figura 11, 28 probetas preparadas para realizar los ensayos de compresión.*

La elaboración de estas probetas se realizó en uno de los talleres del Edificio Betancourt bajo supervisión y siguiendo las debidas medidas de seguridad personal como el uso de gafas de protección y guantes de trabajo.

La preformas de los materiales empleados fueron placas de dimensiones variables y rollos de material. En el caso del EPS-75 se empleó una plancha de 37 mm de espesor. Esta dimensión es importante, pues estableció la dimensión de las probetas al no poder disponer de una plancha de este polímero con un espesor mayor.

Las dimensiones mínimas que se querían dar a las probetas eran de 37x37x37mm, con el fin de emplear las planchas de EPS75 sin modificar las superficies.



*Figura 12. Rollo de WA235.*

El proceso que constó de tres partes se describe con más detalle en el Anexo F.

- Primero se midieron y cortaron las planchas de corcho para obtener cuadrados de lado 37mm o en su defecto tiras de 37mm de ancho, y para ello se empleó una sierra de cinta para madera similar a la de la Figura 13.



*Figura 13. Sierra de cinta Holzstar HBS 231-1.*

- Después se pegaron las planchas con un adhesivo apropiado que mantuviera las propiedades elásticas del material, en este caso se usó un adhesivo de contacto para corchos.
- Por último y para una probeta de cada material se le pintó un patrón estocástico, que consistió en una dispersión de gotitas de pintura negra sobre un fondo blanco en varias de las superficies de la probeta.



*Figura 14. Patrón estocástico pintado en la superficie de una de las probetas.*

### 3.3. Ensayos a compresión, equipo empleado y desarrollo de los ensayos

Para la realización de los ensayos a compresión se empleó una INSTRON 8032. En la Figura 15 vemos algunos de los distintos elementos que tomaron parte en los ensayos.

1. INSTRON 8032
2. Conjunto camisa pistón y plato superior móvil
3. Probeta
4. Bloque de apoyo y plato inferior fijo
5. Temporizador
6. Cámara Nikon
7. Lámpara

Se empleó también un ordenador con software de control de la INSTRON 8032 en el que se almacenaban los resultados obtenidos en cada ensayo en un fichero compatible con Excel. Para el procesado de los resultados se empleó un ordenador personal, con un pa-

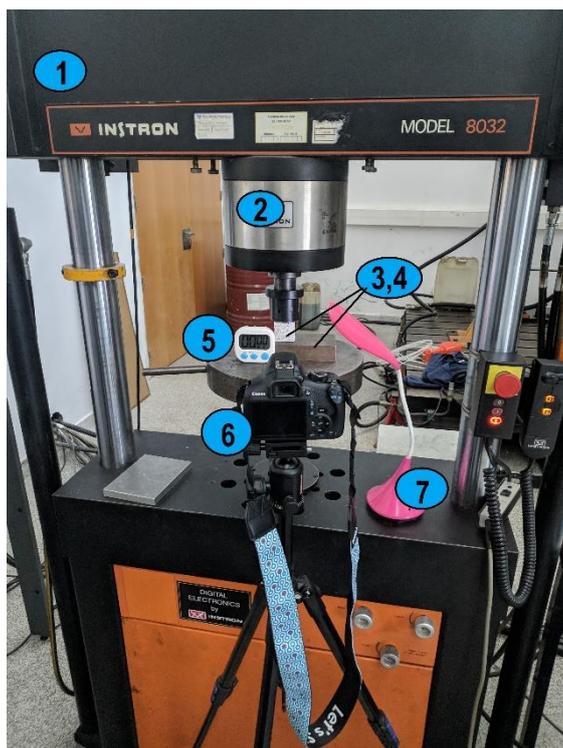


Figura 15. INSTRON 8032 y elementos empleados para la toma de resultados durante los ensayos.

quete de programas de ofimática entre los que se incluía Excel, programa usado para el tratamiento de los datos y elaboración de los resultados.

Los parámetros límites establecidos durante los ensayos fueron:  
Velocidad de compresión de 5 mm/min, lo que da una velocidad de deformación del material de  $\dot{\epsilon} = 0,225\% s^{-1}$  considerando un espesor en la dirección del ensayo de 37mm.

Fuerza máxima, limitada por la característica mecánica del modelo de máquina empleada, de 100KN.

Se realizaron para cada material ensayado, 4 ensayos a distintas deformaciones (90, 75, 62,5 y 50%), cada uno de estos ensayos consto de 4 ciclos de carga y descarga de la probeta, la dinámica que se siguió para la realización de estos se detalla en el Anexo.G.2. Se realizaron un total de 112 ciclos de compresión con la preparación necesaria anterior a cada ensayo y toma de resultados posterior, la realización de estos ensayos se prolongó varios días.

## 4. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

### 4.1. Cálculo de la densidad y granulometría

Tal y como se comenta en el apartado El corcho y en el Anexo B.1, la densidad del corcho no es constante, varía dependiendo del árbol, de la edad del árbol, de las condiciones climatológicas etc. Es imprescindible calcular la densidad de los materiales empleados, ya que la variación entre la densidad real, y la que el fabricante proporciona, puede ser grande.

Una vez medida la densidad, se designaron los materiales (con los términos que ya se han ido utilizando en este trabajo) atendiendo a los criterios expuestos en el Anexo C, los resultados están recogidos Tabla 3. Además, en esta tabla se ve la relación de material sólido y gas de nuestros materiales, su obtención se detalla en el Anexo C.

También se realizó un estudio de la granulometría recogido en el Anexo D. En las ilustraciones siguientes se ven los materiales ordenados según su tamaño de grano y densidad, de mayor a menor.

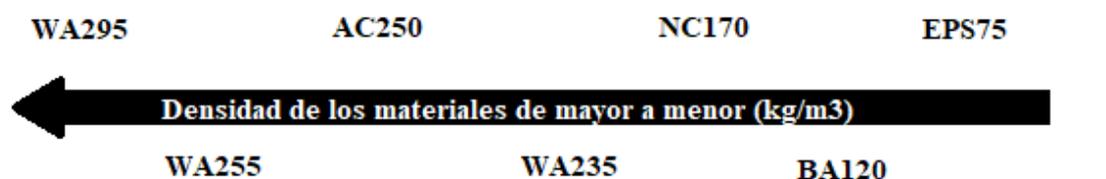


Figura 16. Materiales empleados en el trabajo ordenados según su densidad de mayor a menor

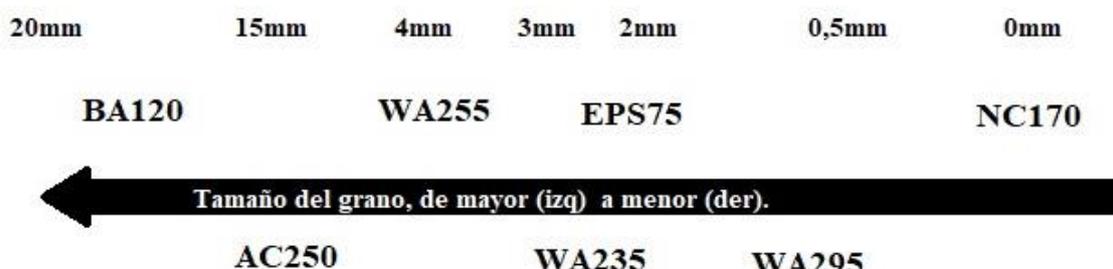


Figura 17. Materiales empleados en el trabajo ordenados según el tamaño de grano, de mayor a menor.

Tabla 3. Proporción sólido gas en los materiales empleados y densidades

Designación	EPS75*	WA255	WA235	WA295	NC170	AC250	BA120
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	81,9	255,1	235,1	293,8	172,1	250,6	118,7
Densidad sólido	1050	1150	1150	1150	1150	1150	1150
Ratio	8%	22%	20%	26%	15%	22%	10%

### 4.2. Comportamiento de los materiales durante los ensayos.

En el Anexo H, se ve y analiza con detalle la evolución de los materiales durante los ensayos y el fenómeno de recuperación de la deformación en el tiempo, que experimentan los materiales.

En este anexo se puede ver como atendiendo a la deformación que se produce, durante el ensayo al 90% hay cuatro comportamientos distintos.

Por un lado, los materiales WA295, WA255 y WA235 sufren una rotura similar, fruto de la densificación con un severo abarillamiento, que se produce a niveles de deformación elevada. Estos tres materiales son los tres conglomerados de corcho de distinto tamaño de grano y densidad, como se ya ha visto en el Anexo B y en el Anexo C. Podemos ver en la Figura 18 el ejemplo del caso del WA295, el resto se encuentran en el Anexo H, mencionado al comienzo.

Después se tendrían materiales como EPS75 y el NC170, se ve en estos materiales como sus superficies laterales a altos valores de deformación no se abomban, sino que parece como que unas capas de material se desplazan en el plano perpendicular respecto a otras. Este fenómeno tendría sentido ya que el NC170 es el corcho virgen y su microestructura es muy similar a la del EPS75, si además se ensaya de forma radial el mecanismo de deformación de la microestructura de celdas debería ser muy similar por no decir el mismo.

El material AC250, que es un conglomerado de corcho natural y virgen de grano muy grande, es el que peor comportamiento tiene. La estructura de la probeta se rompe, deshaciéndose las uniones entre los pedazos de corcho. Teniendo en cuenta que es un material menos flexible (al ser virgen y no haberse hervido, no se ha producido la expansión del gas en el interior de las celdas) y que el elevado tamaño de grano reduce los puntos en los que están en contacto, el mal comportamiento no es sorprendente.

Por último, se tiene el BC120, similar en apariencia al AC250, pero este material ha sido sometido a un proceso de tostado, en el que la suberina se ha evaporado parcialmente. Su comportamiento es atípico, si bien sufre algún daño en el ensayo al 90% el material presenta unos valores de recuperación de la deformación después del ensayo inusualmente altos.

En la tabla Tabla 18 del Anexo H, se ve la recuperación de parte de la deformación por parte de cada material, así como (de forma aproximada) el tiempo entre mediciones, para poder hacernos una idea de la velocidad a la que se produce esta recuperación.

Se ve como a mayor es la deformación durante el ensayo, mayor es la deformación final remanente en la probeta. También se puede ver que para todos los materiales la diferencia entre el ensayo al 90% y el ensayo al 75% es mayor que entre este último y el 62,5 o el 50%. Esto se debe a el efecto de la densificación.

El material que presenta el mejor comportamiento en términos de recuperación de la deformación durante los ensayos al 90% es el NC170, y el peor el EPS75. Lo cual pone de manifiesto algunas de las cualidades del corcho frente al EPS75.

En el resto de los ensayos, el que presenta mayores valores de recuperación es el BA120.

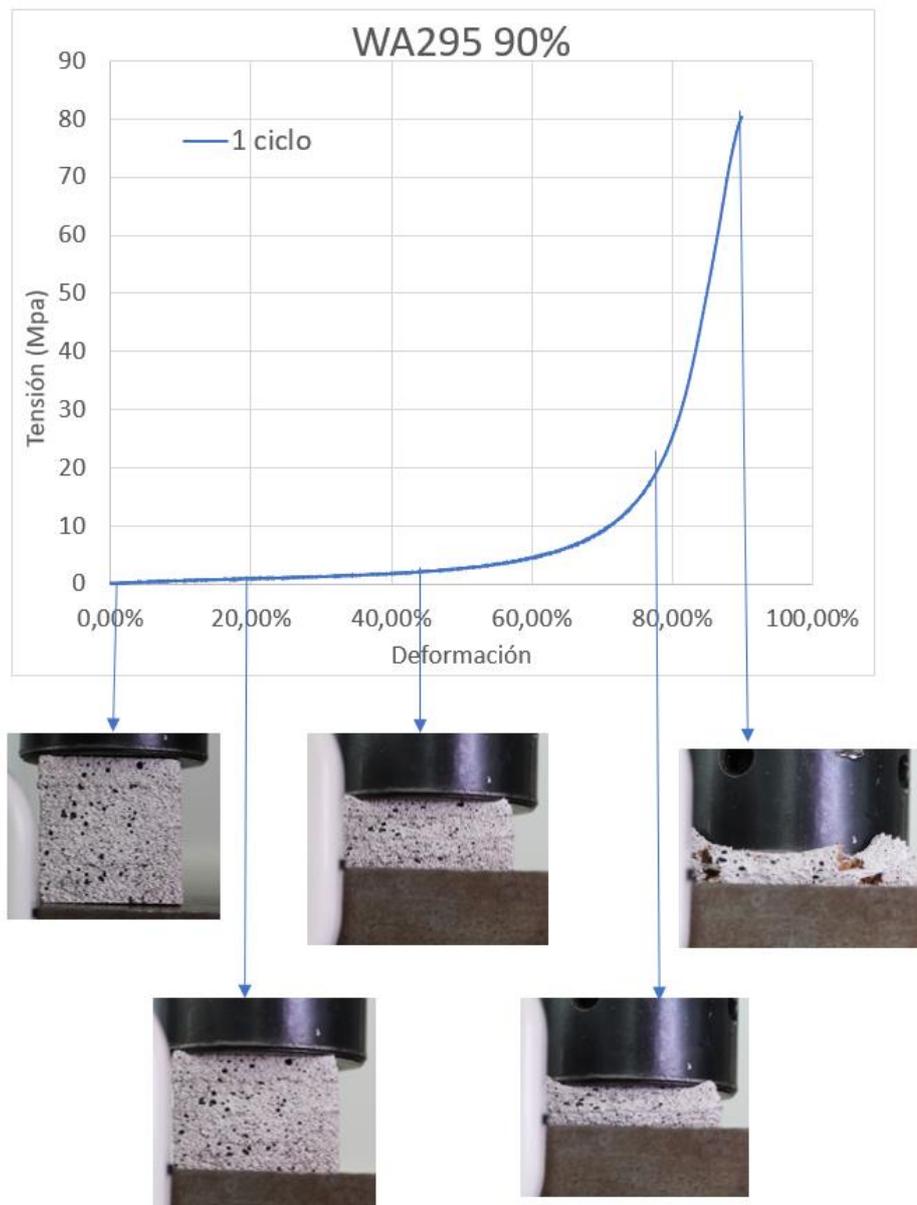


Figura 18. Evolución del WA295 durante el ensayo de compresión al 90% de deformación.

### 4.3. Ensayos de compresión al 90% de deformación

Del estudio de los resultados obtenidos de los ensayos de compresión con una deformación del 90%, se derivan los resultados recogidos en el Anexo I, en este apartado se va a exponer parte de lo contenido en este anexo.

Para realizar la comparación de las propiedades mecánicas de los materiales de estudio se han calculado una serie de curvas que se han considerado de interés.

Se han calculado las curvas de **tensión frente a deformación**, de las que obtendremos el **módulo elástico del material** y la **tensión máxima de la zona elástica**, así como también el **módulo de la platea o de “platea”** (que es la pendiente de la meseta horizontal que se forma en este tipo de materiales entre la región elástica y la zona de la curva en la que el material comienza a densificar). También se han calculado la **tensión del límite elástico** y la **tensión de inicio de la densificación**.

Otras curvas de interés que se han obtenido para la caracterización de los materiales son las curvas de **tensión específica frente a deformación**, **energía absorbida por unidad de volumen frente a deformación**, **energía específica absorbida por unidad de volumen frente a deformación** y para finalizar las **curvas de idealidad y eficiencia frente a deformación y a tensión**

Tanto las definiciones como el método empleado para calcular las curvas y la obtención de algunos de los parámetros se detallan en el Anexo I.1 y en el Anexo J.

#### 4.3.1. Curva tensión frente a deformación

En la Figura 19 se pueden ver las curvas tensión deformación de todos los materiales de estudio, nos vamos a valer de esta curva para determinar el **módulo elástico de cada material**, la **tensión máxima de la zona elástica**, el **módulo de la platea o de plateau** y la **tensión característica**, (tensión de inicio de la densificación en este caso, su cálculo se detalla en el Anexo J).

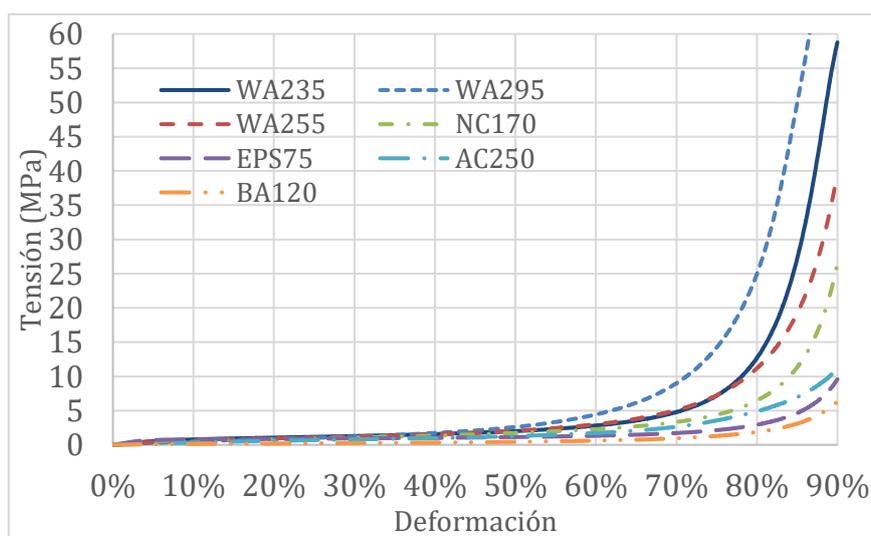


Figura 19. Curva tensión-deformación de todos los materiales ensayados al 90% de deformación

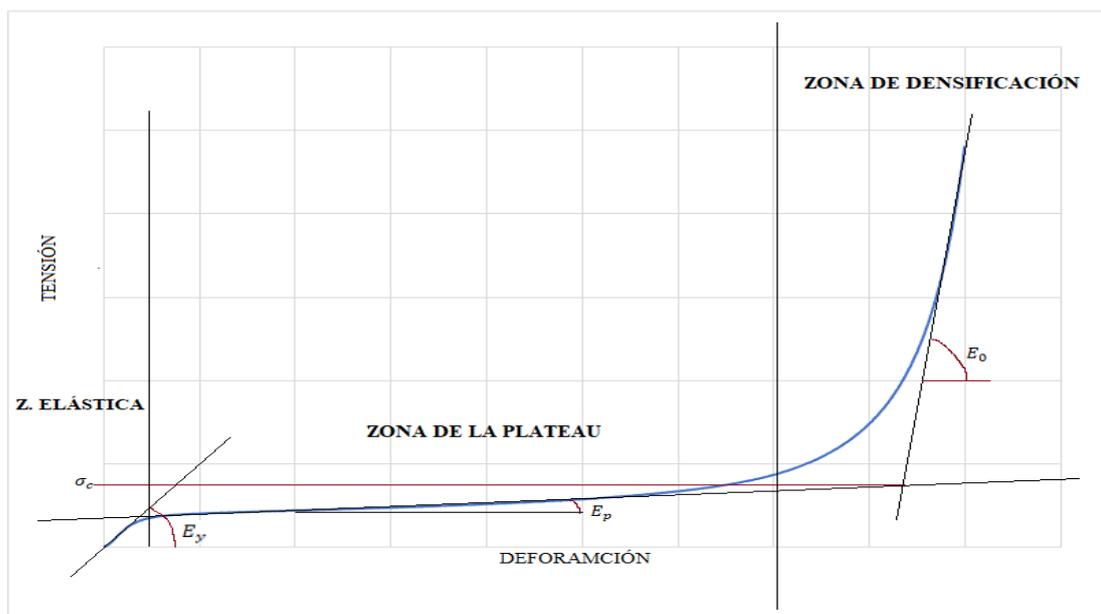


Figura 20. Parámetros característicos calculados sobre la curva tensión-deformación

Tabla 4. Valores obtenidos en el ensayo de caracterización al 90% de deformación.

	WA290	WA235	WA255	NC170	AC250	BA110	EPS75	Unidades
$E_y$	6,4	13,0	9,2	19,8	3,3	2,0	21,4	MPa
$E_p$	3,52	2,37	3,07	2,21	2,10	0,622	0,772	MPa
$\sigma_y$	0,3-0,38	0,57-0,63	0,42-0,47	0,4-0,44	0,43-0,46	0,09-0,1	0,53-0,6	MPa
$\epsilon_0$	5-7%	5-7%	5-6%	2-3%	14-15%	3-6%	3-4%	-
$\sigma_p$	3,00	2,46	2,43	2,47	1,81	0,54	1,43	MPa
$\epsilon_0$	53%	55%	55%	63%	61%	57%	64%	-

Se puede ver en la Figura 21 y en Figura 22 la variación de los módulos de elasticidad y de la platea en función de la densidad. Llama la atención como para todos los materiales, a excepción de BA110 y AC170, el módulo elástico es mayor para los materiales que tienen menor densidad, pero esta tendencia se invierte para el módulo de la platea, siendo mayor cuanto mayor es la densidad del material. Por otro lado, tenemos la Figura 23 en la que se ve a qué valores de tensión se produce el inicio de la densificación y nos sirve para comparar las tensiones alcanzadas en cada material. Se ve como el material más denso es el que presenta un mayor valor de tensión. No obstante, esto no se produce entre el WA235 y el WA255, en este caso la influencia del tamaño del grano predomina sobre la densidad. Algo parecido vemos en el corcho natural que a pesar de ser menos denso presenta un valor de tensión al inicio de la densificación elevado.

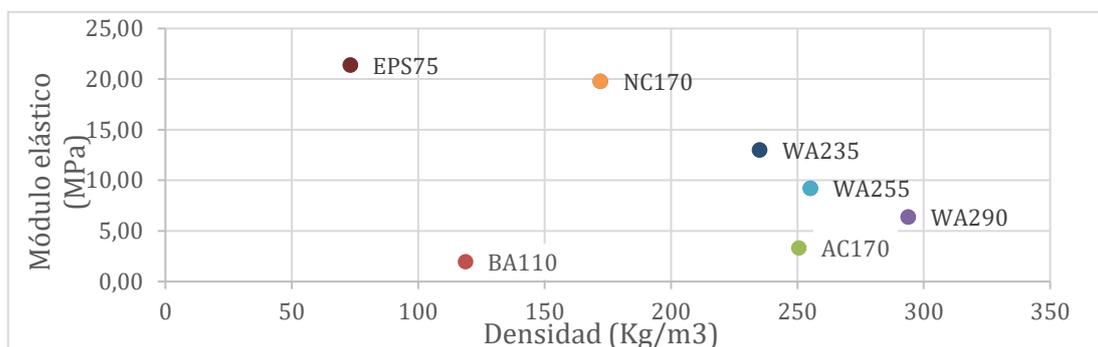


Figura 21. Módulo elástico frente a la densidad de los materiales.

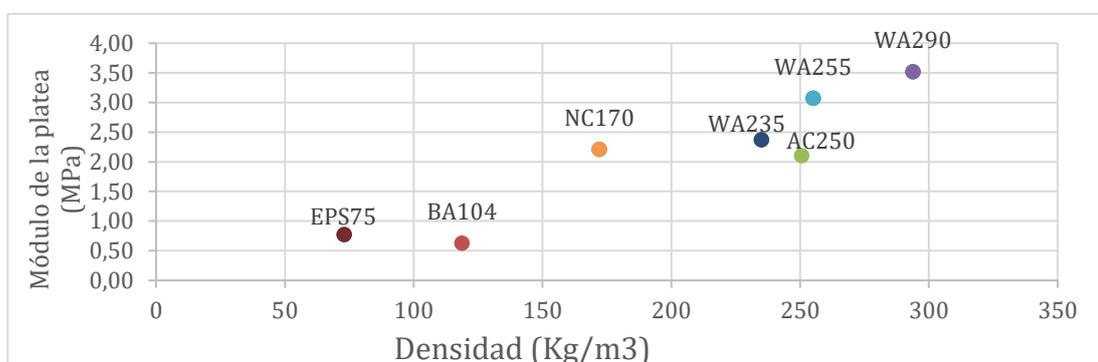


Figura 22. Módulo de la platea frente a densidad de los materiales

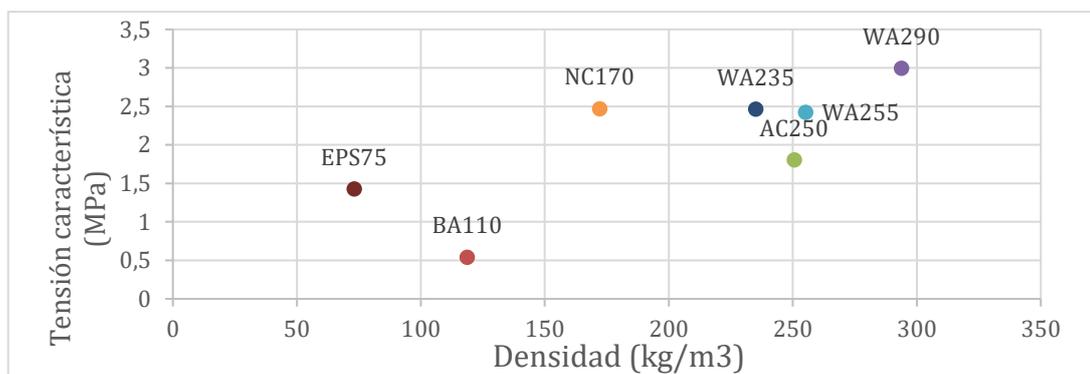


Figura 23. Tensión característica o tensión de densificación frente a densidad de los materiales

4.3.2. Curva de tensión específica frente a la deformación.

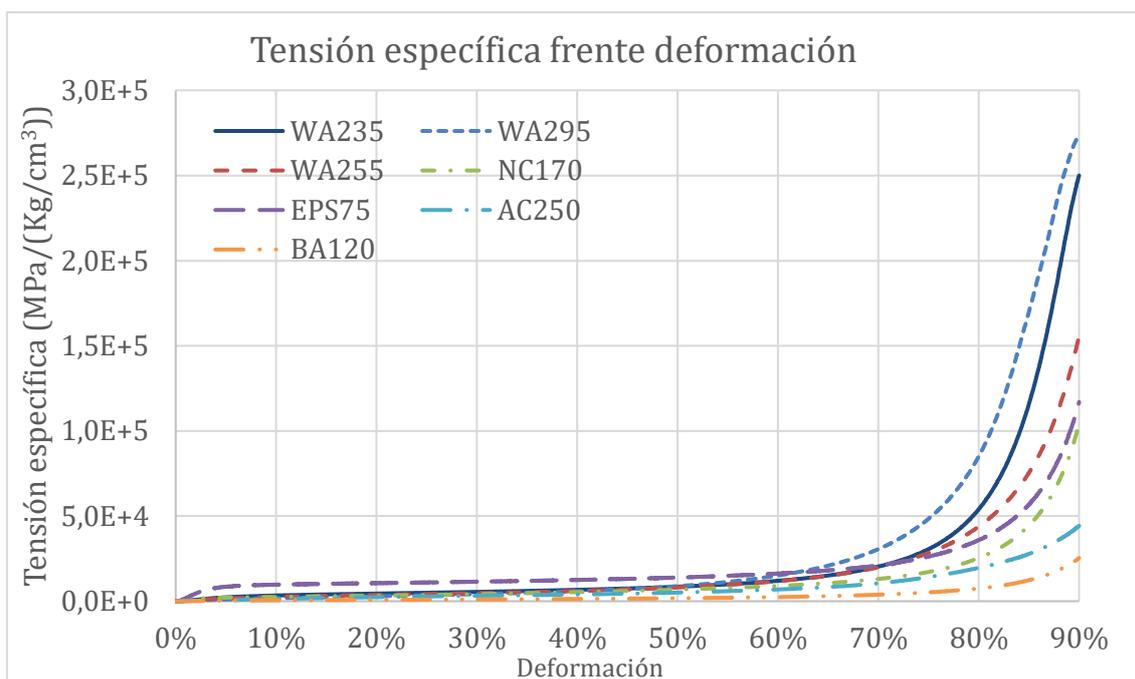


Figura 24. Curva tensión específica frente a deformación

En esta gráfica se presenta, frente a la deformación, la tensión dividida por la densidad de cada material, lo que se conoce como tensión específica.

Hay un aspecto diferencial entre lo que se observa en la Figura 19 y lo que se observa en esta figura. Esto es el comportamiento del EPS75, ya que es el que más oposición presenta ante la deformación (en términos específicos), a valores de deformación menores que el valor de deformación en la que se produce la densificación de este material. Se pone de relieve las buenas propiedades mecánicas en proporción a su densidad.

4.3.3. Energía absorbida.

La energía (E) o energía absorbida por el material durante un ensayo de compresión puede obtenerse como el área bajo la curva tensión-deformación, es decir la integral de la curva.

Ecuación 3

$$E = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

Al realizar los cálculos con Excel, en vez de la energía, vamos a emplear la energía por unidad de volumen y la energía por Kg de material a la que llamaremos energía específica, esto se expone y explica en el Anexo I.1.

Se ha aproximado la integral (con el fin de implementarla en Excel) como suma de rectángulos. El cálculo de la energía queda así:

Ecuación 4

$$E_i = \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \times (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) + E_{i-1}$$

A.1.1.1 Energía absorbida por unidad de volumen

La energía absorbida por unidad de volumen es la cantidad de energía absorbida por centímetro cúbico del material. En este caso coincide con el valor obtenido de aplicar la ecuación 4, tal y como se desprende de la Ecuación 5.

Ecuación 5

$$1Mpa = 10^6 Pa = 10^6 \frac{N}{m^2} = 10^6 \frac{Nm}{m^3} = 10^6 \frac{J}{m^3} \times \frac{m^3}{cm^3 10^6} = \frac{J}{cm^3}$$

Para deformaciones menores del 20%, el material que mejor comportamiento presenta es el EPS75, aunque los resultados del WA235 son también muy buenos, de hecho, para deformaciones comprendidas entre el 53% y el 20%, es este material el que más cantidad de energía absorbe. Para valores de deformación mayores, el WA295 es el que en términos absolutos absorbe más energía, no obstante, esta se produce en zonas de deformación muy elevadas en las que se inducen tensiones también muy altas y este hecho se ha de considerar, ya que el material transmitirá tensiones muy elevadas y en determinadas aplicaciones [2] esto es peligroso.

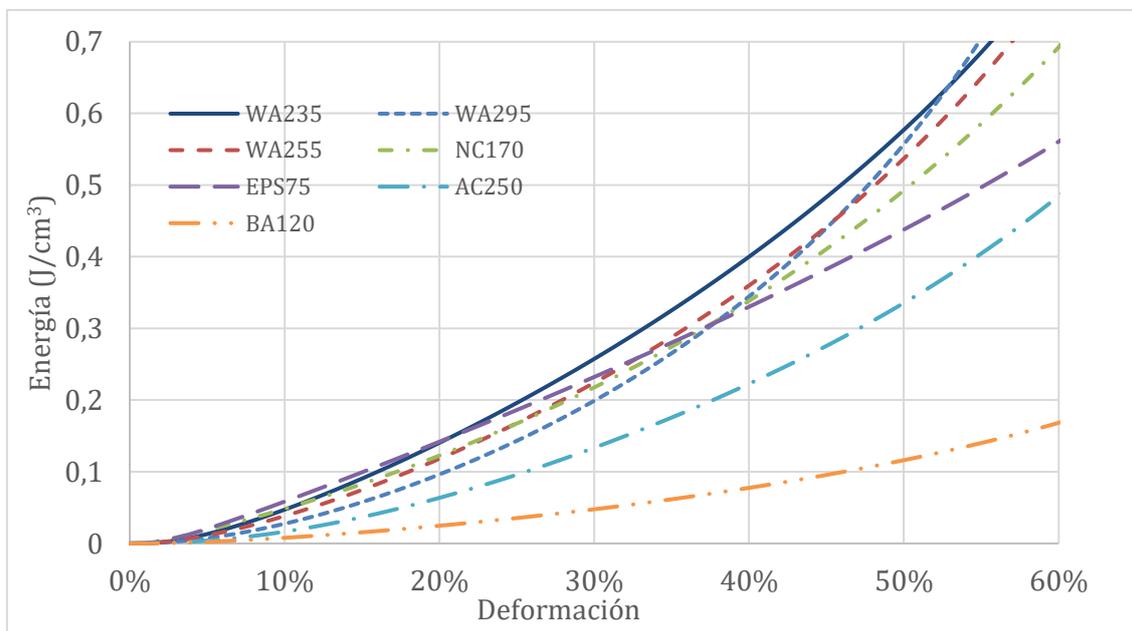


Figura 25. Energía por unidad de volumen deformación al 60%

A.1.1.2 *Energía absorbida por Kg de material.*

La energía absorbida por kg de material coincide con lo que se denomina energía específica. Se obtiene de dividir la energía por la densidad del material.

Ecuación 6

$$E_{\text{específica}} = \frac{E}{\rho} = \frac{\frac{J}{\text{cm}^3}}{\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}} = \frac{J \times \text{cm}^3}{\text{cm}^3 \times \text{Kg}} = \frac{J}{\text{Kg}}$$

Vistos los resultados de energía por unidad de volumen y sabiendo la notable diferencia de densidad entre el EPS75 y los conglomerados WA, el material que mejor comportamiento tiene es el EPS75 como se ve en la Figura 26. Vemos como el comportamiento del EPS75 es excelente hasta alcanzar deformaciones superiores al 80%, además presenta un comportamiento muy lineal, ya que se está produciendo a valores de tensión no muy elevados.

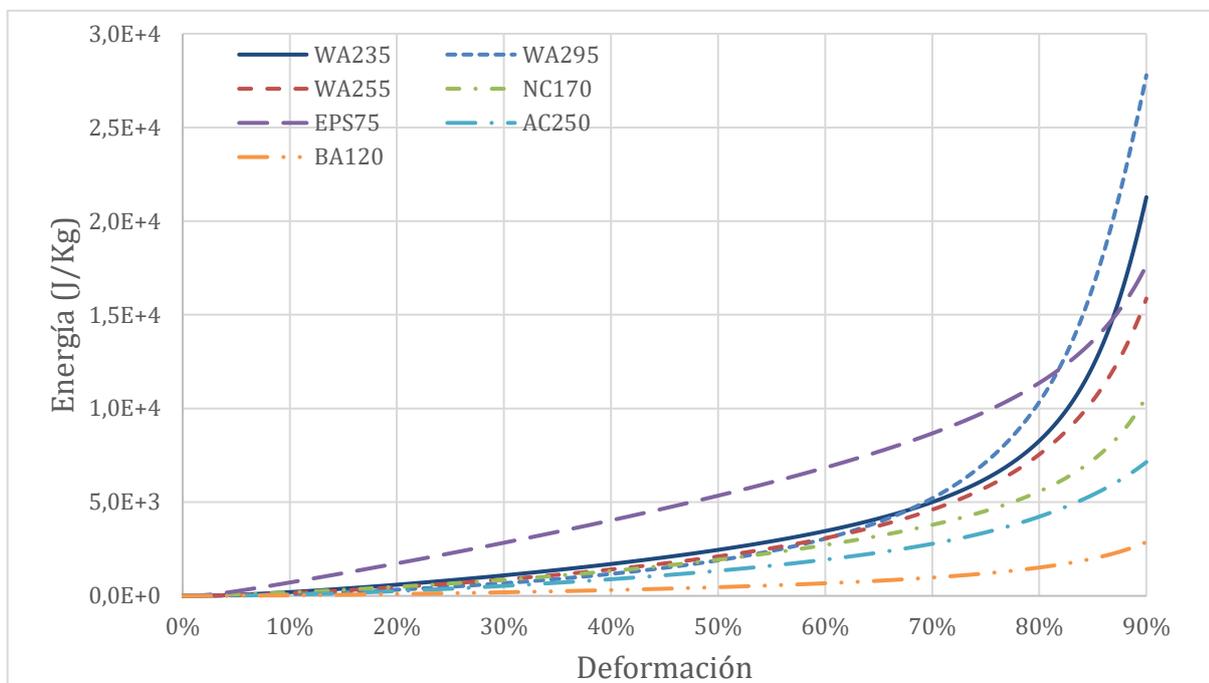


Figura 26. *Energía específica absorbida.*

Por otro lado, la energía específica absorbida por los conglomerados (WA235, WA255 y WA295) y el NC170 es muy similar hasta alcanzar valores cercanos al 70% de deformación.

4.3.4. *Eficiencia de los materiales*

En este apartado se va a ver como de eficientemente realiza el material la absorción de energía a un valor de tensión determinado. Se va a representar tanto la eficiencia frente a la tensión como al desplazamiento. Es tan importante saber a qué tensión se produce la eficiencia máxima como la deformación asociada a esta.

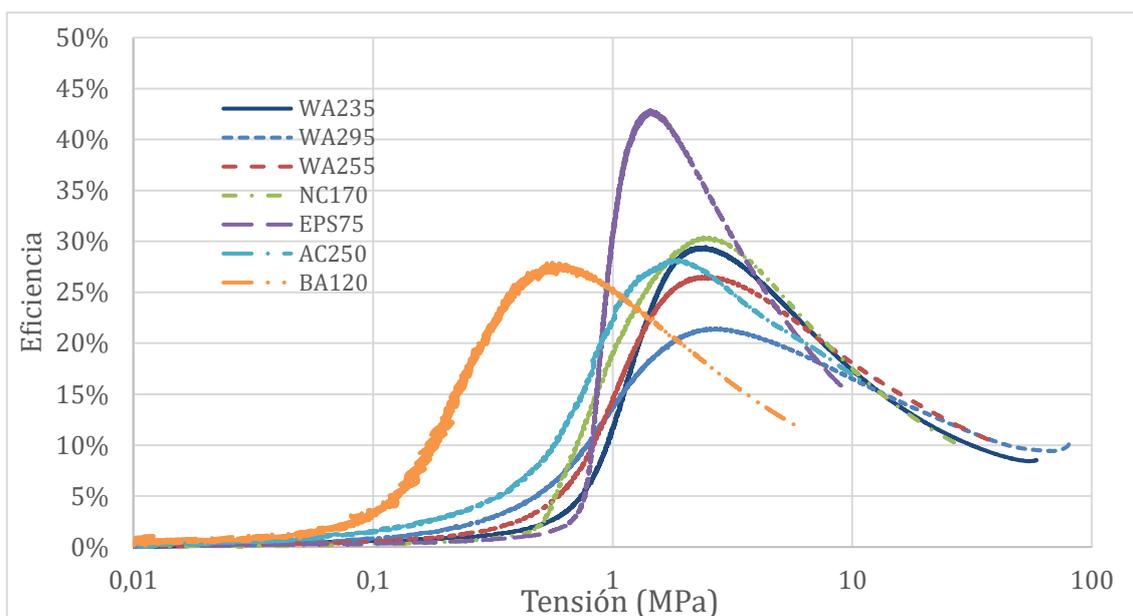


Figura 27. Eficiencia frente a tensión, escala logarítmica.

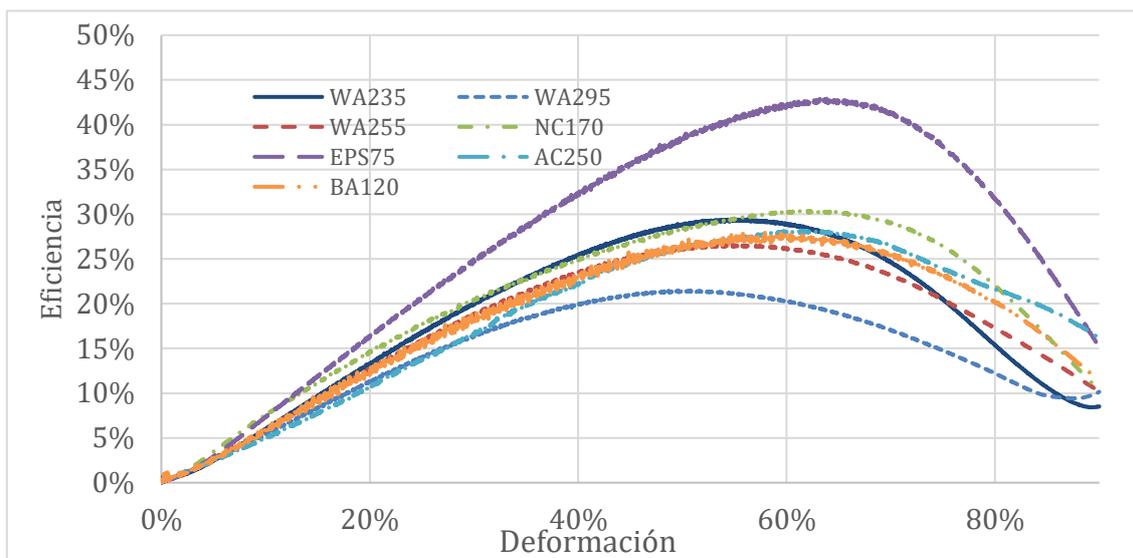


Figura 28. Eficiencia frente a deformación.

El material que realiza la absorción de la energía de forma más eficiente vuelve a ser el EPS75. En el caso del WA295, material que en términos absolutos absorbía más energía, aquí presenta el peor valor poniendo en evidencia que esta absorción de energía se realiza durante la densificación debido a los altos valores de tensión que se alcanzan en este material y pone de manifiesto que los valores de energía absorbidos para deformaciones por encima del punto de densificación no son de tanto interés como la absorción que se produce a deformaciones menores. Tanto por la validez de los resultados, (como se puede ver en el Anexo H) las probetas sufren daños que hacen cuestionables los resultados obtenidos para deformaciones mayores del 80-85%) como por la escasa probabilidad de que el material llegase a trabajar bajo unas condiciones tan extremas.

#### 4.3.5. Idealidad de los materiales

Por último, se va a estudiar la idealidad, el concepto es similar al de la eficiencia visto en el apartado anterior, pero aquí se va a comparar el material ensayado con un material que se comportaría de forma ideal, es decir que absorbería la energía a tensión constante y la densificación se produciría a deformación constante, dicho de otro modo, el área bajo la curva tensión-deformación sería un rectángulo.

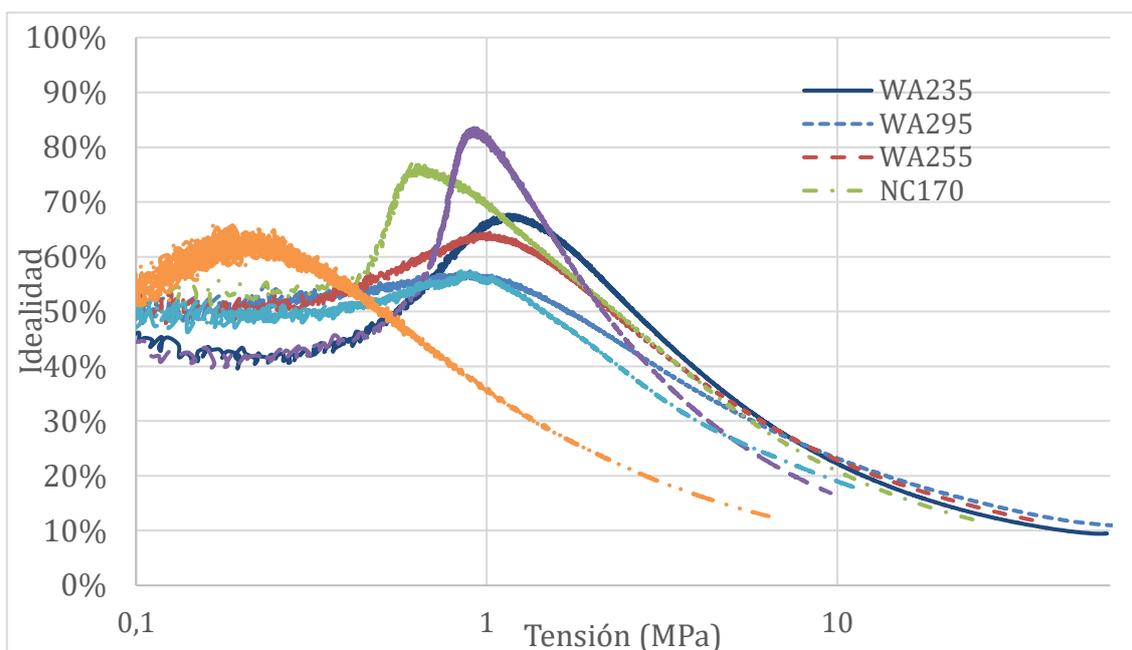


Figura 29. Idealidad frente a tensión con escala logarítmica

Lo que se observa en estas gráficas (Figura 29 y Figura 30) es una vez más, como el EPS75 presenta los valores máximos, no obstante, tanto para este como para el resto de los materiales los máximos se producen a valores de tensión muy bajos, menores de 1Mpa, y a deformaciones menores de un 30% a excepción del EPS75 que se mantiene en valores cercanos al máximo hasta superar este 30%.

Si bien el comportamiento general de los corchos no es bueno el NC170 alcanza un valor próximo al 75% nada despreciable, alcanzando este valor máximo en una zona próxima a su límite elástico (8% de deformación frente al 6% de deformación en el que se estableció el límite elástico para este material)

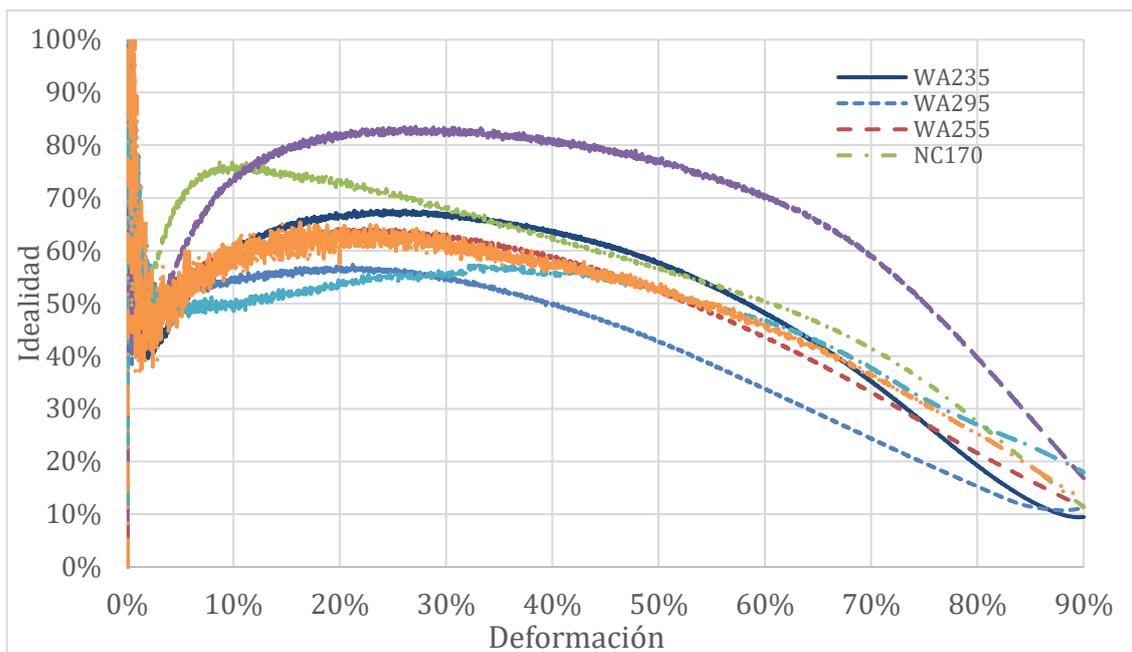


Figura 30. Idealidad frente a deformación

#### 4.4. Evolución de las propiedades mecánicas con los ciclos de carga.

Como ya se ha comentado en otros apartados de esta memoria, se han realizado 24 ensayos (7 materiales distintos y 4 valores de deformación) y cada uno de estos ensayos ha constado de hasta 4 ciclos de carga y descarga. De todos estos datos obtenidos, se han elaborado gráficas en las que se refleja la evolución con los sucesivos ciclos de las siguientes propiedades. Se han calculado las curvas de: **tensión frente a deformación**, **tensión específica frente a deformación**, **energía por unidad de volumen y energía por Kg de material**, y por último las **gráficas de idealidad y eficiencia frente a deformación y frente a tensión**. En total se han elaborado 224 gráficas, recogidas en el Anexo M.

En esta parte se van a comentar los resultados allí obtenidos, nos vamos a valer de tablas y alguna gráfica adicional en la que se resumen los resultados más relevantes.

##### 4.4.1. Curvas tensión deformación y tensión específica deformación.

Como se puede ver en las gráficas de tensión-deformación o en las de tensión específica deformación del Anexo M, todos los materiales sufren una importante degradación de sus propiedades mecánicas tras producirse el primer ciclo de compresión.

En todos los materiales se produce una disminución del módulo elástico y del módulo de plateau, esto se traduce en que el material reduce su oposición a la deformación porque su estructura interna está dañada. Estos pueden ser producidos por la salida del gas, ya que recordamos que todos los materiales son de celda cerrada. Tras producirse este deterioro inicial, el resto de los ciclos se diferencian únicamente en que la deformación permanente que se produce en el material es cada vez mayor, pero las pendientes de las curvas son muy similares entre ellas (nos referimos a las obtenidas para el segundo, tercer, y cuarto ciclo de compresión). El EPS75 es un caso especial, ya que no presenta un comportamiento elástico, se deforma permanentemente y esto se refleja en los resultados obtenidos del segundo ciclo, en adelante.

La degradación de estas propiedades se puede observar en la variación de la energía absorbida por el material o la variación de los parámetros eficiencia e idealidad en cada uno de los ciclos de compresión, recogido en los siguientes apartados.

#### 4.4.2. Variación de la energía absorbida

La evolución de la energía absorbida, por los distintos materiales, en los sucesivos ciclos de carga queda representada en las siguientes gráficas, se han incluido, tanto las gráficas de energía por unidad de volumen, como las gráficas de energía específica. Ambas son las correspondientes a las deformaciones de 90 y 75%, ya que se consideran los ensayos más representativos para este fin.

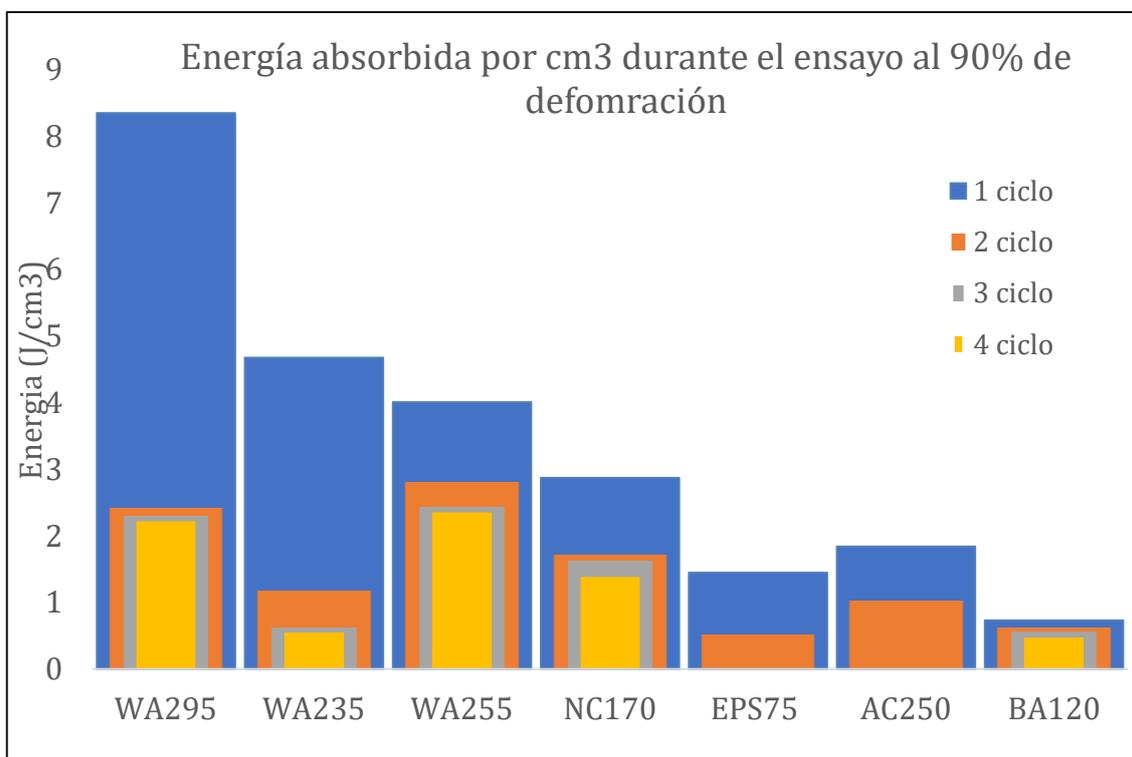


Figura 31. Energía absorbida por cm3, ensayo al 90% de deformación

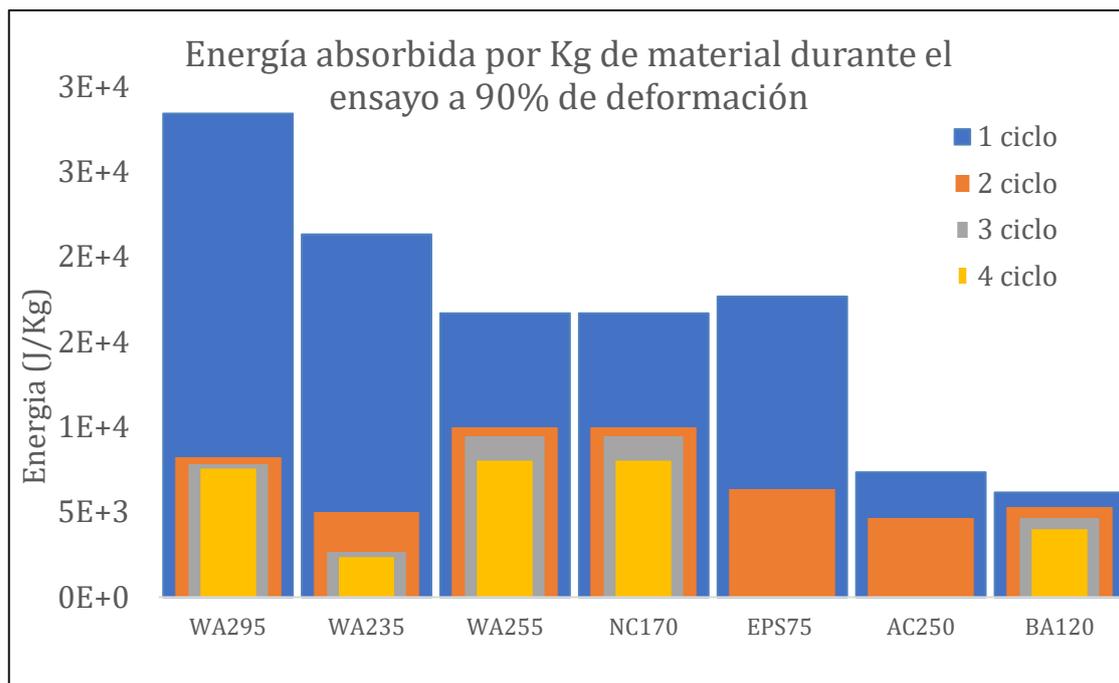


Figura 32. Energía absorbida por Kg de material, ensayo al 90% de deformación.

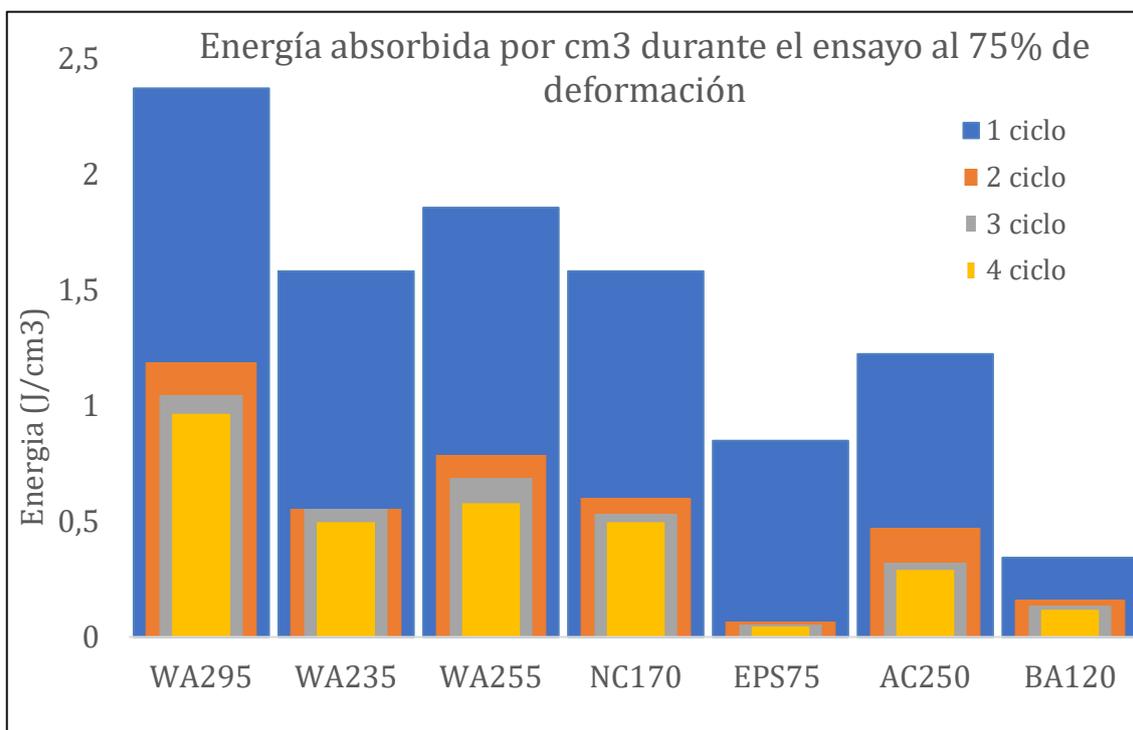


Figura 33. Energía absorbida por cm3, ensayo al 75% de deformación

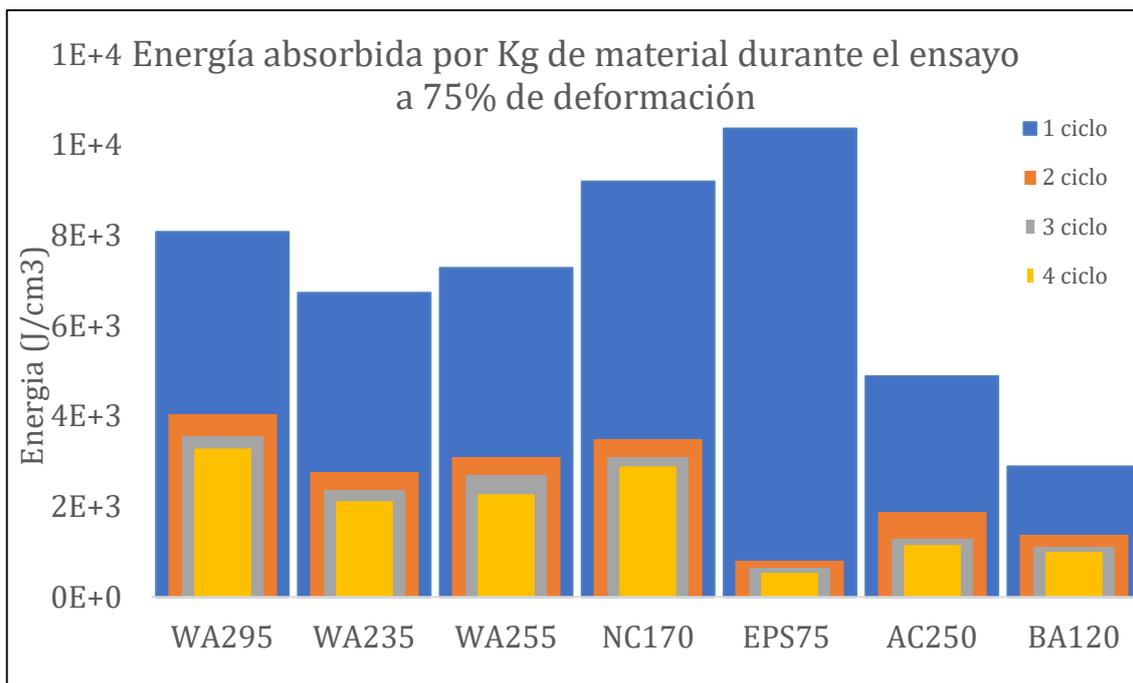


Figura 34. Energía absorbida por Kg de material, ensayo al 75% de deformación.

#### 4.4.3. Evolución de la eficiencia e idealidad

Si se observan los materiales se ve como entre el primer ciclo y el segundo ciclo de carga se produce un notable deterioro del material que se refleja en la disminución de los valores, pero una vez se ha producido esta reducción, entre los ciclos posteriores será mucho menos acusada. Como la variación más significativa se produce entre el primer y segundo ciclo de carga, se va a representar en las siguientes tablas esta variación para todos los materiales.

y ensayos realizados.

Tabla 5. WA295 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>WA295</b>				
90%	55%	15%	21%	11%
75%	57%	32%	22%	16%
62,5%	60%	35%	22%	15%
50%	59%	44%	22%	17%

## Estudio de las propiedades mecánicas del corcho natural y sus aglomerados

Tabla 6. WA235 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>WA235</b>				
90%	67%	13%	29%	9%
75%	69%	30%	29%	16%
62,5%	68%	33%	29%	16%
50%	68%	40%	29%	17%

Tabla 7. WA255 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>WA255</b>				
90%	63%	27%	26%	15%
75%	63%	32%	25%	16%
62,5%	61%	36%	25%	17%
50%	53%	40%	24%	15%

Tabla 8. NC170 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>NC170</b>				
90%	75%	31%	30%	20%
75%	66%	36%	29%	18%
62,5%	70%	37%	31%	17%
50%	68%	39%	30%	15%

Tabla 9. AC250 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>AC250</b>				
90%	56%	18%	27%	11%
75%	55%	22%	24%	11%
62,5%	59%	39%	27%	14%
50%	59%	31%	24%	12%

Tabla 10. BA120 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>BA120</b>				
90%	65%	21%	27%	14%
75%	63%	40%	25%	17%
62,5%	65%	40%	27%	20%
50%	64%	53%	25%	17%

Tabla 11. EPS75 Evolución eficiencia e idealidad.

Material	Eficiencia		Idealidad	
	1er ciclo	2nd ciclo	1er ciclo	2nd ciclo
<b>EPS75</b>				
90%	43%	3%	82%	3%
75%	43%	3%	85%	3%
62,5%	42%	4%	85%	8%
50%	38%	5%	83%	10%

Tal y como se observa en estas tablas, cuanto menor es la deformación a la que se somete el material, mejores son los valores obtenidos en el ciclo posterior, incluso en el EPS75. También se ve como las características de todos los materiales derivados del corcho, incluyendo el NC170 mantienen un comportamiento mecánico aceptable, mientras que el EPS75 no.

## 5. GOM Correlate y cálculo del módulo de Poisson.

Como se explica en el Anexo K, no se ha podido realizar de forma exitosa el estudio de esta parte del trabajo. Esto se ha debido a que, en la mayoría de los casos, el software no era capaz de dar resultados.

Si bien, en uno de los ensayos sí que ha sido posible, pues su procesado es correcto, nos referimos al análisis realizado para el material WA295, la falta de precisión en las medidas de deformación en la dirección del ensayo hace que no podamos dar valores cualitativos. Esta falta de precisión se ha observado al comparar los valores obtenidos por el software Gom Correlate y los obtenidos durante el ensayo de compresión por la INSTRON 8032. Esto aparece reflejado en la Tabla 12.

Tabla 12

Tiempo	Poisson	Def y (GOM)	Def y (real)	Error
0'0''		0,000	0,000	0%
0'24''	0,031	-1,789	-1,897	6%
0'49''	0,025	-6,280	-7,960	21%
1'13''	0,026	-10,974	-13,770	20%
1'35''	0,030	-15,487	-19,118	19%
2'01''	0,031	-20,956	-25,347	17%
2'25''	0,035	-26,015	-33,670	23%
2'49''	0,040	-31,561	-37,020	15%
3'13''	0,058	-37,365	-43,168	13%
3'37''	0,071	-43,272	-48,885	11%
4'01''	0,089	-49,032	-54,560	10%
4'25''	0,112	-54,668	-60,360	9%
4'48''	0,119	-60,537	-66,180	9%

## 6. RESULTADOS

A partir de la evolución y comportamiento de los distintos materiales durante el ensayo, así como los resultados de los ensayos de caracterización y los ensayos cíclicos que se han llevado a cabo se pueden establecer las siguientes conclusiones.

### 6.1. Resultados obtenidos durante los ensayos.

El haber realizado el ensayo de compresión para la caracterización del material al 90% de deformación, ha resultado excesivo. En muchos casos el material debido a la densificación ha sufrido daños estructurales. Esto ha hecho muy difícil evaluar la calidad y por tanto la veracidad de los resultados obtenidos al final del primer ciclo (deformaciones mayores del 80%) y en los ciclos posteriores del ensayo al 90%. Habría sido más apropiado ensayarlos al 85 o incluso al 80% de deformación, pues la densificación del material ya sería muy elevada y se evitaría o reducirían las probabilidades de que alguno de los materiales fallase antes de concluir todos los ciclos.

La capacidad de recuperación es superior a la que tiene el EPS75. Durante los ensayos se ha podido observar el mal comportamiento que tenía el EPS75 en términos de recuperación, lo que ha sido respaldado por el análisis de los datos obtenidos en los otros apartados.

También se ha podido observar como la recuperación de los otros materiales (derivados del corcho), no es instantánea, sino que se extiende mucho en el tiempo. Las mediciones tomadas a las probetas ensayadas al cabo de varios días, pone de manifiesto que este fenómeno de recuperación de la deformación se puede extender mucho tiempo, algo que no se ha valorado durante los ensayos de la forma debida y podría ser motivo de estudio posterior.

Se ha visto con los resultados obtenidos que este proceso de recuperación de la deformación del material durante los ensayos no significa la recuperación de las propiedades mecánicas anteriores al ensayo. Esto se puede deber a que incluso a valores bajos de deformación el gas contenido en el interior de las celdas (celdas cerradas), y de las estructuras generadas por partículas de corcho y adhesivo, se abre paso para salir (fruto del aumento de la presión causada por la deformación durante el ensayo de compresión) y provoca daños microestructurales como fisuras. Si bien no se puede asegurar en este trabajo que este sea el mecanismo que produce la degradación mecánica.

### 6.2. Resultados obtenidos del análisis de los datos

En el estudio de caracterización se ha visto como el material EPS75 presenta las mejores propiedades mecánicas, si bien en algunos aspectos otros materiales se han acercado a sus características, la realidad es que la reducida densidad del EPS75, en combinación con los buenos resultados obtenidos de absorción de energía y la eficiencia con la que realiza, lo hacen sobresalir entre el resto de los materiales. Hay que destacar su elevado módulo de Young (en términos relativos al resto de materiales) y reducido modulo en la platea, haciendo que sea un material capaz de absorber mucha energía, pero sin producir tensiones elevadas.

Si bien los resultados obtenidos por el EPS75 son sobresalientes, los resultados obtenidos con otros materiales como los conglomerados de corcho WA235, WA255, WA295 y el NC170 no son malos. Si bien es cierto que no alcanzan al EPS75, los valores de absorción de energía del WA235, WA255 y WA295 son muy cercanos y en algunos casos

superiores al EPS75, es cierto que esta absorción de energía en términos específicos es considerablemente menor. En términos de eficiencia son todos inferiores, al igual que en idealidad. El NC170, es el material, aparte del EPS75, que mayores valores de eficiencia e idealidad alcanza durante el ensayo. Se ve como el triturar el corcho para producir conglomerados, reduce algunas de las características mecánicas del material natural, aunque estos conglomerados (WA235, WA255 y WA295) absorben algo más de energía lo hacen de una forma menos eficiente.

Sería interesante analizar el comportamiento de estos materiales conglomerados frente al comportamiento del corcho sometido a compresión de forma no radial. Presumiblemente por los estudios realizados [14], el comportamiento de los conglomerados de corchos (WA235, WA255 y WA295) ante una carga de compresión en otra dirección será muy similar a los resultados obtenidos. Al tratarse de un material con una estructura (idealmente) homogénea y por tanto mecánicamente isótropo, mientras que el corcho no lo es, es ortótropo y los resultados del ensayo a compresión en la dirección tangencial del NC170 serán peores tal y como apuntan L. Gibson y M. Ashby en su obra.

Se observa que el aumento de densidad en los conglomerados se traduce en una reducción de la eficiencia e idealidad de estos materiales, aunque a valores de deformación mayores del 70% también se traduce en una mayor energía total absorbida. Como se ha visto, valores de deformación tan elevados pueden provocar el fallo del material y alterar los resultados obtenidos respecto a los que deberían obtenerse. A mayor densidad del conglomerado vemos como el inicio de la densificación se produce antes, es decir a menores valores de deformación y esto puede provocar el fallo prematuro durante el ensayo.

Los materiales AC250 y BA120 han sido los que han presentado las peores propiedades mecánicas en especial el BA120, estando un escalón por debajo de todos los demás materiales en lo referente a las propiedades mecánicas aquí estudiadas.

En lo relativo a los resultados obtenidos del estudio del comportamiento de los materiales ante ciclos de carga, el EPS75 queda en evidencia. Si bien en términos de propiedades mecánicas ha tenido resultados buenos, y sobresalientes si se tiene en cuenta su baja densidad, (es decir comparando los materiales en términos de sus propiedades específicas). El EPS75 presenta un comportamiento pésimo ante ciclos de carga, aunque la deformación a la que se someta sea relativamente baja, 50%. Esto hace que los materiales WA235, WA255, WA295 y NC170 adquieran un mayor valor, pues, aunque sus resultados mecánicos en términos específicos no han sido tan buenos, en algunos casos en términos absolutos han sido incluso superiores. A esto hay que añadirle que la degradación de sus propiedades mecánicas es menor.

La energía específica absorbidas por estos materiales en los ciclos segundo, tercero y cuarto es muy superior a energía específica absorbida por el EPS75 en cualquier ciclo, a excepción de la energía absorbida en el primero. También lo son los valores de idealidad y eficiencia como queda recogido en las tablas 5-11.

Si bien, a falta de la realización de un ensayo de impacto para cuantificar la absorción de energía y la evolución de esta absorción en sucesivas repeticiones del impacto en los materiales que han sido objeto de este trabajo, se observa como los conglomerados de corcho tienen características muy interesantes en especial su menor degradación ante ciclos de carga.

Se observa también la gran diferencia de propiedades y características mecánicas de los distintos productos derivados de corcho, dependiendo estas de la densidad, pero también del tamaño de grano del corcho y de los aglutinantes empleados entre otros factores. Este hecho hace que nos cuestionemos la idoneidad de tratar el corcho y sus derivados como

un material de forma general, y pone en evidencia la necesidad de la caracterización de cada uno de los materiales conglomerados que se obtienen del corcho, como materiales individuales y en algunos casos con propiedades mecánicas muy diferentes.

En lo relativo al cálculo del módulo de Poisson de los materiales, solo se puede concluir que en el caso del WA295 es muy pequeño, en especial para deformaciones pequeñas. Pero el método empleado para su obtención no ha sido adecuado, y para futuros trabajos se recomendaría emplear otro. Por ejemplo, el uso de galgas extensiométricas en la dirección perpendicular a la del ensayo sería una opción mucho más fiable.

## 7. Bibliografía

- [1] D. van Moorsel, J. Fischer, T. Kunas, E. Meuwissen, L. Neirinckx, y D. Thompson, «EPS White Book EUMEPS Background Information on standardisation of EPS», p. 74, 2016.
- [2] M. Bocciarelli, V. Carvelli, S. Mariani, y M. Tenni, «Assessment of the shock adsorption properties of bike helmets: a numerical/experimental approach», *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 23, n.º 5, pp. 169-181, 2020, doi: 10.1080/10255842.2019.1709451.
- [3] J. Kunecky y O. Jirousek, «Study of Possible use of Strain-rate Dependent Materials in Protective Helmets», pp. 1-6, 2010.
- [4] B. Van Den Hazel, «Impact mechanics of helmet components», n.º January, 2015.
- [5] L. Gibson y M. AShby, «Cellular Solids: Structure and Properties, Cambridge University Press, 1999.», *Journal of Biomechanics*, vol. 22, n.º 4. p. 397, 1989, doi: 10.1016/0021-9290(89)90056-0.
- [6] «¿Cuándo debemos cambiar el casco de moto? ¿Tiene caducidad?» <https://www.tienda-moto.com/blog/cuando-debemos-cambiar-el-casco-de-moto/> (accedido jun. 04, 2020).
- [7] S. P. Silva, M. A. Sabino, E. M. Fernandas, V. M. Correlo, L. F. Boesel, y R. L. Reis, «Cork: Properties, capabilities and applications», *Int. Mater. Rev.*, vol. 50, n.º 6, pp. 345-365, 2005, doi: 10.1179/174328005X41168.
- [8] L. Di Landro, G. Sala, y D. Olivieri, «Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets», *Polym. Test.*, vol. 21, n.º 2, pp. 217-228, 2002, doi: 10.1016/S0142-9418(01)00073-3.
- [9] G. B. Castro, L. O. Carmona, y J. O. Florez, «Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material», *Ing. y Univ.*, vol. 21, n.º 2, pp. 177-194, 2017, doi: 10.11144/javeriana.iyu21-2.mtpe.
- [10] G. E. Abdelrahman, S. Kawabe, F. Tatsuoka, y Y. Tsukamoto, «Rate effects on the stress-strain behaviour of eps geofoam», *Soils Found.*, vol. 48, n.º 4, pp. 479-494, 2008, doi: 10.3208/sandf.48.479.
- [11] M. Presas-Mata, «Comportamiento mecánico de materiales celulares de carburo de silicio», *Univ. Politécnica Madrid*, p. 208, 2008.
- [12] S. R. G. Bates, I. R. Farrow, y R. S. Trask, «3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption», *Mater. Des.*, vol. 112, pp. 172-183, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.08.062.
- [13] O. Anjos, H. Pereira, y M. E. Rosa, «Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork», *Holz als Roh - und Werkst.*, vol. 66, n.º 4, pp. 295-301, 2008, doi: 10.1007/s00107-008-0248-2.
- [14] L. Gibson, M. AShby, y E. Easterling, «The structure and mechanics of cork», *Cambridge Univ. Eng. Dep. Trumpingt. Str. Cambridge CB2 1PZ, U.K.*, 1981, doi: 10.1007/s10853-011-5914-9.
- [15] S. P. Silva, M. A. Sabino, E. M. Fernandas, V. M. Correlo, L. F. Boesel, y R. L. Reis, «Cork: Properties, capabilities and applications», *Int. Mater. Rev.*, vol. 50, n.º 6, pp. 345-365, dic. 2005, doi: 10.1179/174328005X41168.
- [16] A. El Alami, A. Hakam, B. Kabouchi, A. Famiri, A. Bouchti, y M. Ziani, «Effect of the stripping intensity on physical and mechanical properties of cork», *ARNP*

- J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 4, pp. 921-926, 2019.
- [17] M. Ptak, P. Kaczynski, F. A. O. Fernandes, y R. J. A. de Sousa, «Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material», *Int. J. Impact Eng.*, vol. 106, pp. 238-248, ago. 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.014.
- [18] R. T. Jardim, F. A. O. Fernandes, A. B. Pereira, y R. J. Alves de Sousa, «Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates», *Mater. Des.*, vol. 68, n.º March, pp. 121-126, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.12.016.
- [19] S. Sanchez-Saez, S. K. García-Castillo, E. Barbero, y J. Cirne, «Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork», *Mater. Des.*, vol. 65, n.º January, pp. 743-748, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.054.
- [20] M. Avalle, G. Belingardi, y R. Montanini, «Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram», *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, n.º 5, pp. 455-472, 2001, doi: 10.1016/S0734-743X(00)00060-9.
- [21] U. E. Ozturk y G. Anlas, «Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams», *Mater. Des.*, vol. 30, n.º 1, pp. 15-22, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.054.
- [22] D. D. Luong, V. C. Shunmugasamy, N. Gupta, D. Lehmus, J. Weise, y J. Baumeister, «Quasi-static and high strain rates compressive response of iron and Invar matrix syntactic foams», *Mater. Des.*, vol. 66, n.º PB, pp. 516-531, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.030.
- [23] C.E. Liège, «Código internacional de prácticas suberícolas», *Código Int. prácticas Sube.*, n.º Código internacional de prácticas suberícolas., 2005.
- [24] M. C. Varela, «El corcho y los alcornoques», *Depósito Doc. la FAO*.
- [25] «Fotos: Desnudando alcornoques | Sociedad | EL PAÍS». [https://elpais.com/sociedad/2011/08/09/album/1312840801\\_910215.html#foto\\_gal\\_1](https://elpais.com/sociedad/2011/08/09/album/1312840801_910215.html#foto_gal_1) (accedido jun. 05, 2020).
- [26] A. Pérez-Sánchez, E. J. P. Sánchez, y R. M. Segura Silva, «Simulation of the styrene production process via catalytic dehydrogenation of ethylbenzene using CHEMCAD® process simulator », *Tecnura* , vol. 21. scieloco , pp. 15-31, 2017.
- [27] «Polystyrene - Wikipedia». <https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene> (accedido jun. 19, 2020).
- [28] L. Arthuz-López y W. Pérez-Mora, «El Reciclaje Del Poliestireno Expandido a Nivel Mundial», *Inf. Técnico*, vol. 83, n.º 2, pp. 209-219, 2019, doi: 10.23850/22565035.1638.
- [29] «Producción de poliestireno expandido | Textos Científicos». <https://www.textoscientificos.com/polimeros/polietireno/produccion> (accedido jun. 05, 2020).
- [30] I. Standard, «ISO 844 Rigid cellular plastics — Determination of compression properties COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT», *Ref. number ISO*, vol. 844, 2007.
- [31] M. E. Rosa y M. A. Fortes, «Temperature-induced alterations of the structure and mechanical properties of cork», *Mater. Sci. Eng.*, vol. 100, pp. 69-78, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90240-6](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90240-6).
- [32] «Cork Shop by Barnacork - Tienda online de productos derivados del corcho - Cork Shop BCN By Barnacork». <https://www.corkshopbcn.com/es/> (accedido jun. 10, 2020).
- [33] Knauf Miret, «Propiedades del EPS KNAUF Therm Th35SE», 2005.



# Anexos

Estudio de las propiedades mecánicas del corcho  
natural y sus aglomerados

Study of the mechanical properties of natural cork  
and its agglomerates

Autor

Manuel Rafael Bello Legua

## B Anexo: Materiales y métodos

### B.1 El corcho.

#### B.1.1 ¿Qué es el corcho? Obtención y proceso productivo.

El corcho es un material de origen natural y renovable, se obtiene de la corteza de los alcornoques (*Quercus suber L.*). Crece solo en determinadas regiones del oeste mediterráneo (Portugal, España, sur de Francia, en una parte de Italia, norte de África) y China. Esto se debe a que el alcornoque requiere una gran cantidad de sol y poca lluvia, pero con un ambiente bastante húmedo. Europa representa más del 80% de la producción mundial de corcho. El mayor productor es Portugal, con cerca de tres cuartas partes de la produc-



Figura 35

ción mundial [7], [23].

#### B.1.2 La obtención del corcho

La extracción del corcho del alcornoque o también denominado “la saca del corcho” se realiza en el mes de junio. Esta es la época del año en que se puede extraer del árbol sin dañarlo. La extracción del corcho se realiza por 1ª vez cuando el alcornoque tiene 25 años aproximadamente y después se puede realizar cada 9 años, se recomienda que no se espere más de 15 años [23],[24].

#### B.1.3 Procesado del corcho

De la corteza del alcornoque se obtiene el corcho, (al que se llamará de aquí en adelante como corcho virgen o natural, con el fin de diferenciarlo de los distintos subproductos que se pueden obtener).

El procesado del corcho virgen es diferente en función de la calidad de la superficie del corcho y del espesor de la corteza. Encontramos así dos grupos de corcho, aquel que presenta espesor suficiente y una buena calidad superficial, que principalmente va destinado a la fabricación de corchos de botella, y aquel que no presenta estas características, y se le da distintos usos a través de distintos procesos [7].

Todo corcho comercial, a excepción del corcho virgen, tiene una fase común en su proceso productivo. Durante esta fase se provocan cambios importantes en la estructura y propiedades del corcho, las cuales se verán más adelante. Esta fase consiste en hervir el

corcho durante una hora y después dejar el corcho durante un año, realizando un curado, después se vuelve a hervir en agua en ebullición.

Tras esta fase el corcho se puede destinar a la fabricación de tapones para botellas, o si su calidad no es lo suficientemente buena, a distintos procesos muy variados como la trituration para conformar distintos tipos de conglomerados hasta el tostado [7], [24].

#### B.1.4 Características y propiedades del corcho virgen y derivados.

Para poder entender las características y propiedades mecánicas del corcho, primero hemos de comprender su microestructura y los mecanismos por los que se produce la deformación.

El corcho se podría describir como un material formado por un tejido homogéneo de celdas de paredes delgadas dispuestas de forma regular y sin espacio entre ellas. Estas celdas son análogas, en forma, a las de un panal de miel y estarían compuestas por suberina y cerina. Al no haber espacios vacíos entre las celdas, se crea una estructura de celdas cerradas en cuyo interior se queda atrapado gas, principalmente aire. El tamaño de las celdas varía enormemente de un árbol a otro e incluso de una zona a otra, esto hace que la densidad del corcho sea muy variable incluso en distintas zonas de la corteza del mismo árbol.

La disposición de las celdas no es aleatoria, la estructura de celdas se podría describir como prismas rectangulares, dispuestos base con base en columnas paralelas a la dirección radial del tronco del árbol. Esta orientación hace que la estructura del corcho presente simetría cilíndrica respecto del eje central del alcornoque. En muchos casos se considera un material transversalmente isótropo, es decir que en las direcciones perpendicular al radio del tronco las propiedades mecánicas son equivalentes.

También hay unos canales lenticulares huecos de forma cilíndrica que discurren en dirección radial, por lo que no rompen la simetría antes mencionada [7], [16].

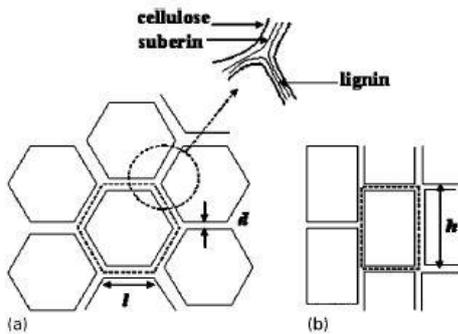


Figura 37

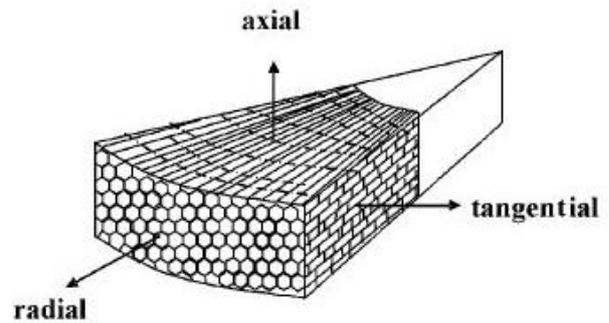


Figura 36

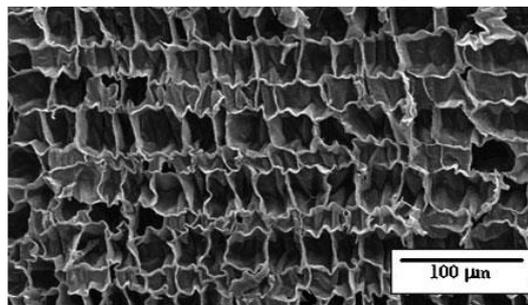


Figura 38

Una característica importante de las celdas del corcho es que sus lados laterales a veces están arrugados, e incluso pueden colapsar. Esto se cree que es debido al propio proceso de crecimiento del corcho.

Como se expone en el artículo [7], la densidad del corcho puede variar mucho de unos árboles a otros. El factor que más afecta a esta variación es la edad del árbol, pero también el tratamiento que se le da a la corteza (es decir, si se mantiene virgen o si se le realiza el proceso de hervido y curado).

Por ejemplo, el hervido del corcho reduce las arrugas en los laterales de las celdas y aumenta su tamaño (al expandirse el gas de su interior) lo que provoca un aumento del volumen del material con la consiguiente reducción de su densidad.

La porosidad del corcho, que viene causada por la existencia de canales lenticulares radiales. Esta porosidad afecta de forma muy notable al corcho. Aunque tras el proceso de hervido muchos de estos canales lenticulares son colapsados por la expansión de la célula, sobre el 50%, aparecen también grandes poros.

### B.1.5 Propiedades mecánicas del corcho:

Las propiedades mecánicas del corcho son las descritas por el modelo de Gibson y Ashby [14]. El comportamiento de la curva tensión-deformación presenta tres zonas, una primera zona que llega en torno al 7% de deformación, que se corresponde con la zona elástica del material. En esta zona las paredes de las celdas se deforman elásticamente. Hasta llegar casi al 70% de deformación, estaríamos en la zona de la platea, esta zona tiene un módulo distinto del módulo elástico (o de Young) y es bastante menor, es una zona relativamente plana que se corresponde con el progresivo colapso de las paredes de la celda, este fenómeno se extiende hasta prácticamente un 70% de la deformación, alcanzando el punto en el que la curva tensión-deformación empieza a aumentar de forma exponencial. A esta última región se le conoce como Zona de densificación.

La estructura de celdas del corcho le dota a este de una de sus propiedades más interesantes y es un módulo de Poisson muy pequeño, prácticamente cero, cuando se le aplican cargas radiales. Esto se debe a que las celdas se pliegan sobre ellas mismas alineándose.

Existe una literatura bastante amplia sobre el efecto de distintos parámetros en el comportamiento mecánico del corcho, la influencia de la porosidad, y la densidad [13], o de la temperatura [31] pero también de aspectos como la influencia de la intensidad empleada durante la saca del corcho en sus propiedades mecánicas y físicas. [16].

### B.1.6 Propiedades físicas y químicas del corcho

El corcho tiene otras propiedades físicas que lo dotan de las características que hacen que sea tan usado en la construcción, en el embalaje como elemento de protección, su uso como tapón de botellas de vino, entre otras muchas.

Las características físicas y químicas del corcho Tabla 13 hacen del corcho un material muy usado en la industria, con diversas aplicaciones. Es usado como material aislante sonoro y térmico (esto se debe al gran contenido de gas en su interior), también es impermeable lo que permite usarlo como tapón de recipientes. Las características del material en lo relativo a la fricción lo hacen ideal para aplicaciones como calzado o

producción de mangos de herramientas, o como tapón (de una botella de vino entre otros usos). También es aislante eléctrico.

Tabla 13: Propiedades generales del corcho. [1]

Property	Value	Ref.
Friction coefficient, boiled	0.2–1.2 (cork/glass and cork/steel)	111
	0.97 (cork/cork, R)	111
	0.77 (cork/cork, NR)	111
	0.76 (cork/glass, R)	111
	0.35 (cork/glass, NR)	111
Density, kg m <sup>-3</sup>	120–180 (amadia)	29
	160–240 (virgin)	29
Surface energy, dispersive component, mJ m <sup>-2</sup>	24–38 (40°C)	32, 108
	41 (25°C)	171
Thermal conductivity, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.045 (cork)	1
	0.025 (air)	1
	0.2 (cork cell walls)	1
Electrical conductivity, S m <sup>-1</sup>	1.2 × 10 <sup>-10</sup> (25°C)	100
	1.67 × 10 <sup>-13</sup> (50°C)	100
Acoustic resistivity, kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	1.2 × 10 <sup>5</sup>	177
Specific heat, J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	350	1
Thermal diffusivity, m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1 × 10 <sup>-6</sup>	1
Water diffusion coefficient, m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4 × 10 <sup>-10</sup> (NR)	1
	1 × 10 <sup>-11</sup> (R)	1

R, measured in radial direction; NR, measured in non-radial directions.

### B.1.7 Corchos empleados

De los materiales de corcho hemos empleado cinco conglomerados de corcho diferentes y un corcho natural. Se ven en la imagen siguiente, los nombres se corresponden a la designación que se empleará durante este trabajo. No coincide con la del fabricante que vemos a continuación.



Figura 39

Estos materiales fueron adquiridos por la universidad en la tienda online de la empresa *Banacork.S.L* [32] de forma anterior al inicio de este trabajo.

En la página del fabricante encontramos algunos datos sobre la fabricación que son de interés para este trabajo:

NC260 es un corcho natural y virgen lo que nos quiere decir que no ha sido hervido y por lo tanto no se ha producido la expansión de las celdas, sería pues un material más rígido que el corcho más común en la industria, por ejemplo, el que se emplea para tapones de vino.

WA279, WA22 y WA302 son conglomerados de corcho, producidos por la unión de pequeñas astillas obtenidas mediante el triturado del corcho tratado (después de hervirlo), curarlo y volverlo a hervir. El adhesivo empleado en los tres casos es una resina Epoxy. Se someten a un proceso de laminado para conseguir las planchas compactas.

AC170 es un conglomerado de pedazos de gran tamaño de corcho virgen empleando un adhesivo, en este caso bioetanol, también se le ha aplicado una laminación para obtener la preforma de plancha de la imagen.

BA104 es un aglomerado de corcho, es decir sin adhesivo al cual se le ha sometido a un proceso de tostado. Según la ficha técnica del material el tostado conlleva la fusión de la suberina que actúa como aglutinante y permite la conformación del material en placas de forma totalmente natural sin necesidad de ningún aditivo químico.

El proceso de tostado incrementa las prestaciones aislantes del corcho. La célula expande, aumenta de volumen y mejora sus características térmicas y acústicas.

La densidad de los materiales conglomerados es muy variable ya que depende, no solo de la densidad del corcho con el que se han hecho, sino también de la aleatoriedad en la distribución que puede hacer que en determinadas zonas la densidad baje por la presencia de partículas de menor densidad, o con una peor compactación quedando más poros entre ellas.

## B.2 El EPS o Poliestireno expandido

### B.2.1 Obtención del EPS

El EPS es un polímero espumoso de origen no renovable muy usado en la industria, se produce a partir de otros compuestos derivados del petróleo, aunque también puede aparecer en la naturaleza de forma natural. Existe constancia de que el poliestireno, que es la forma no espumada del EPS, se descubrió por primera vez en 1839 por Eduard Simon [27].

Tanto el EPS como el PS provienen del estireno, a la diferencia radica en que para obtener el EPS es necesario una serie de etapas adicionales en su fabricación.

El estireno o etilbenceno es un monómero obtenido como producto en las refinerías petroquímicas junto a otros compuestos. El estireno es el producto de la reacción catalítica de etileno con benceno [26].

El poliestireno se obtiene de la polimerización, en un reactor, del estireno. Para la producción de poliestireno expandible es necesario usar un agente expansor que habitualmente es el pentano. El poliestireno se puede considerar la materia prima del EPS.

La obtención del poliestireno expandido consta de tres etapas, una primera etapa de expansión, seguida de una etapa de estabilizado y con una última etapa de expansión y moldeado.

- En la primera etapa el poliestireno, en forma de granos, se calienta con vapor de agua a temperaturas entre los 80 y 110°C provocando un aumento de su volumen. En esta etapa se determina en gran parte la densidad del EPS final. Las variables que determinan esto son la temperatura y el tiempo de exposición. La densidad inicial del polietileno expandible es de aproximadamente 630 kg/m<sup>3</sup> y puede reducirse hasta los 10 kg/m<sup>3</sup>.

- Después el material se ha de dejar reposar durante 24 horas para que se estabilice. Esto se debe a que en la primera etapa se crea un vacío interior que es necesario compensar con aire. El mecanismo por el que se produce esto es la difusión.
- Por último, estas perlas de material expandido y estabilizadas se transportan a unos moldes donde se les vuelve a inyectar vapor de agua para que se expandan en la cavidad hasta ocupar el volumen máximo y fusionarse con las otras perlas. La forma del producto final depende de esta última etapa.

Como ya se ha mencionado uno de los problemas del EPS es su origen no renovable, existe una extensa línea de investigación acerca del reciclaje del EPS con el objetivo de producir EPS de nuevo con otras formas o funciones (y estudiar las propiedades mecánicas de este material reciclado, como ejemplo de esto tenemos el siguiente artículo [9]), de revalorizar el producto ya usado y de gestionar el residuo, por ejemplo, mediante incineración con recuperación de energía.

Para entender el uso actual del EPS y su importancia en sectores diversos como la industria, pero también en el sector de transporte, construcción, de sanidad incluso en equipos de protección personal para la práctica de deportes por ejemplo la fabricación de cascos para motoristas o ciclistas, (que constituye en sí mismo, una importante línea de investigación [8]) es necesario entender su estructura de la que se deriva sus propiedades mecánicas. Pero igual de importante es comprender sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

### B.2.2 Características y propiedades del EPS.

#### *Propiedades mecánicas*

Como se ve en el proceso de obtención del EPS, el producto que obtenemos es una espuma, con una estructura interna de celdas cerradas y como tal su comportamiento mecánico ante cargas se va a ajustar al modelo descrito por Gibson y Ashby [5].

Por lo tanto, ante una carga de compresión se van a distinguir tres zonas en la curva tensión-deformación. La primera se corresponderá a la deformación elástica de las paredes de las celdas, cuando estas empiezan a deformarse plásticamente y a colapsar, aparecerá una nueva zona con un módulo elástico diferente. Esta nueva zona, con un módulo de Young menor que el de la zona elástica, se le conoce en la mayoría de los textos como *platea*. Cuando las celdas se han deformado completamente se podrá observar como la tensión empieza a aumentar rápidamente, esta zona es la zona de densificación del material donde lo único que queda es algo de aire atrapado en las celdas apiladas y escapa por efecto de la presión. Se puede ver la Figura 40 en el que se ven las tres zonas, elástica y de densificación.

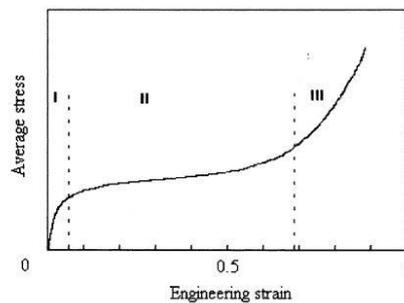


Figura 40

A pesar de que el comportamiento general se rige bastante bien por este modelo, algunos artículos y estudios realizados, por ejemplo [8], sugieren que para el caso del EPS es ligeramente diferente y no se produce una deformación uniforme, lo que no se tiene en cuenta en los modelos de Gibson y Ashby [14].

El EPS también es conocido por su capacidad de absorber energía proveniente del impacto de un cuerpo sobre el EPS [2], [8].

Además, en este artículo [8] se concluye que existen dos factores o parámetros fundamentales en el comportamiento.

Uno es la densidad del EPS. Se ve como a mayor densidad del material, el módulo elástico aumenta y también lo hace el máximo valor de tensión en la región elástica. Otro efecto significativo es que a mayor densidad la densificación se produce a valores de deformación menores. La densidad también tiene un efecto importante en la capacidad de absorber energía/impactos y en el comportamiento de este. En lo relativo a esto en el artículo [3] se concluye que, a más densidad, mayor es la absorción de energía, pero a se produce la transmisión de unos valores de aceleración y fuerzas locales más altos. El EPS de menor densidad absorbe menos energía, pero esta absorción la hace de una forma menos local, más uniforme que en el caso de EPS de alta densidad y por lo tanto la transmisión de fuerzas y momentos es menor.

El segundo factor que influye sustancialmente en las propiedades mecánicas es la forma y el espesor de las paredes de las celdas que lo componen.

### *Propiedades físicas.*

Entre las propiedades físicas más destacables encontramos:

Aislamiento térmico, esto se debe a que gran parte es aire, se estima de que más del 95% del volumen se corresponde a este gas. Es frecuente encontrarlo como elemento aislante en alimentos frescos y perecederos. Esta propiedad al igual que en el caso de las propiedades mecánicas varía con la densidad.

El material no es higroscópico, en caso de sumergirse en agua absorbe en torno a un 1% de su volumen, no obstante, el vapor de agua sí que puede penetrar en el mediante difusión.

Un coeficiente de dilatación térmica bastante bajo lo que garantiza estabilidad dimensional.

Estabilidad térmica en cuanto a que conserva las propiedades mecánicas hasta los 80°C. Si sufre degradación por los rayos UV, por lo que es necesario aplicarle recubrimientos superficiales si va a estar expuestos a estas. En caso de exposición prolongada se vuelve quebradizo y adquiere un color amarillento [1], [33].

### *Propiedades biológicas y químicas.*

El EPS no constituye un sustrato nutritivo para los microorganismos, si bien puede hacer de portador en caso de que haya mucha suciedad.

El material presenta estabilidad a elementos como soluciones salinas, jabones y soluciones de tensioactivos, lejías, ácidos diluidos, ácido clorhídrico (al 35%) y ácido nítrico (al 50%), soluciones alcalinas y alcoholes. Sin embargo, es inestable frente ácidos concentrados disolventes orgánicos como acetona, hidrocarburos, aceite de diésel y carburantes [1], [33] (el efecto de estas sustancias provoca su destrucción).

### **B.2.3 El EPS empleado**

Se trata de un poliestireno expandido con una densidad de 75g/l o lo que sería equivalente 75kg/m<sup>3</sup>, utilizado como material para la producción de cascos.

## C Anexo: Cálculo de densidad promedio de las probetas y designación de los materiales.

Para el cálculo de la densidad se empleó la fórmula:

*Ecuación 7*

$$\rho = \frac{g}{dim_1(mm) \times dim_2(mm) \times dim_3(mm)} \times \frac{1 kg}{1000g} \times \frac{1 \times 10^9 mm^3}{1 m^3} = \frac{kg}{m^3}$$

Las mediciones se realizaron con un pie de rey digital y una báscula, con una resolución de 1mg. Se midieron el largo, alto y ancho de cada una de las probetas y se pesaron. La densidad de cada material es la media aritmética de las densidades de las probetas fabricadas con ese material.

En la tabla siguiente se recogen los valores de densidades para cada uno de los materiales de estudio.

*Tabla 14*

Etiqueta	Mat 1	Mat 2	Mat 3	Mat 4	Mat 5	Mat 6	Mat 7
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	81,9	255,1	235,1	293,8	172,1	250,6	118,7
Designación	EPS75*	WA255	WA235	WA295	NC170	AC250	BA120

Las designaciones se han escogido siguiendo las designaciones comerciales, en las que las dos primeras letras hacen referencia al material, y la cifra a la densidad aproximada del material.

EPS; Expanded polystyrene. Poliestireno expandido.

WA; White Agglomerate, Aglomerado blanco.

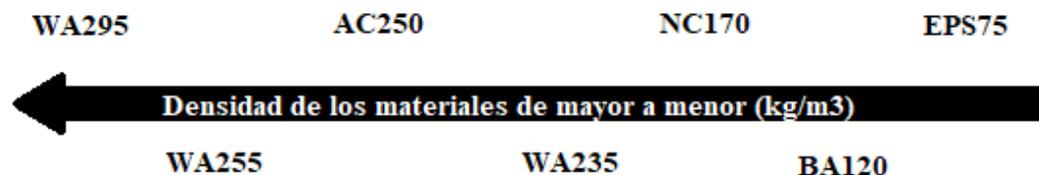
NC; Natural Cork, Corcho natural.

AC; Agglomerated Cork, Aglomerado de corcho.

BA; Black Agglomerate, Aglomerado negro.

\*En el caso del EPS al ser un producto comercial que se ha usado directamente se mantiene la designación comercial.

En la siguiente figura se ven los materiales ordenados por densidad, de mayor a menor.



*Figura 41*

## D Anexo: Granulometría.

Para la medición del tamaño del grano se ha empleado un “microscopio digital USB de aumento variable” y el software que se distribuye junto al producto.

Se tomaron varias imágenes de distintas zonas de las probetas y se el tamaño del grano de cada uno de los materiales. A continuación, se añaden las imágenes tomadas para cada material.



Figura 42

EPS75

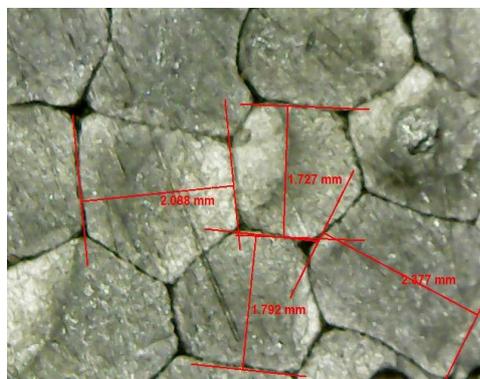
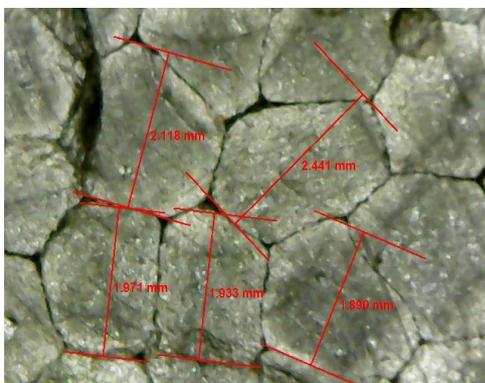


Figura 43

El tamaño del “grano” (que en realidad son las partículas de poliestireno soldadas unas a otras durante el proceso de expansión) mide entre 1,7 y 2,2mm. Vemos como las formas de los granos son bastante uniforme y no existe una variabilidad de formas y tamaño tan acusada como en el resto de los materiales de estudio.

WA255

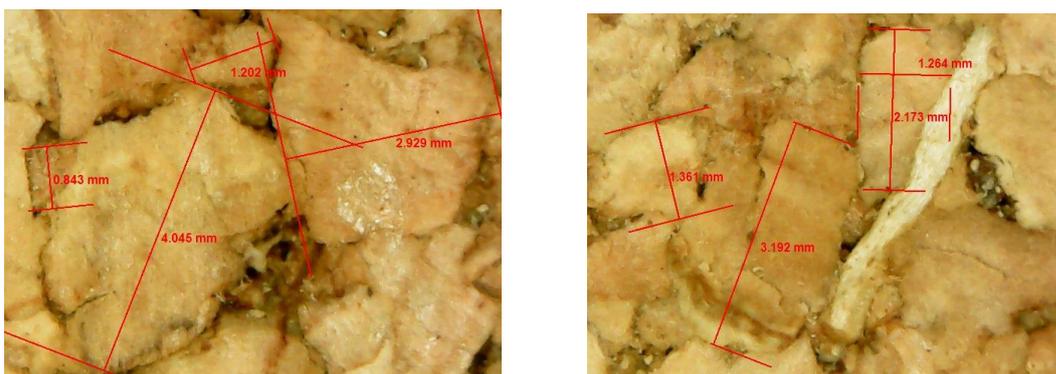


Figura 44

El tamaño del grano mide entre 1 y 4mm. Hay que destacar la mayor proporción de granos de gran tamaño, la variedad de formas de estos granos y ratios de aspecto (entendiendo como la relación entre su anchura y altura), así como su distribución, que es completamente aleatoria.

WA235

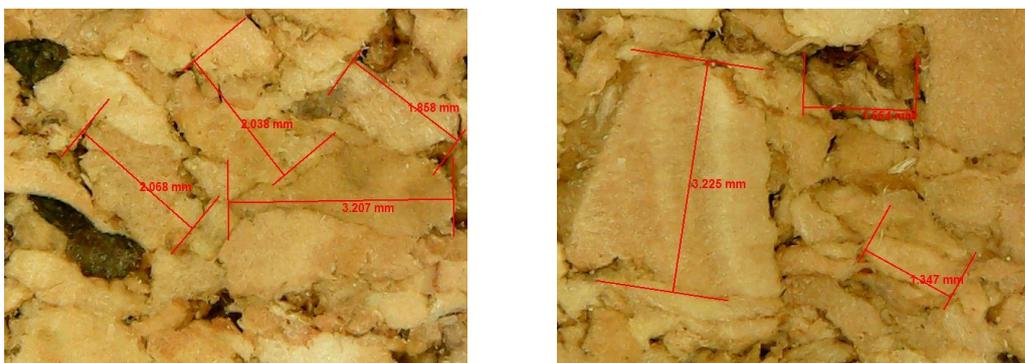


Figura 45-

El tamaño del grano mide entre 1 y 3,2mm. Se pueden realizar las mismas observaciones que en el caso del WA255 en cuanto a ratios de aspecto y distribución. Existe una tendencia hacia el grano más alargado, con ratios de aspecto mayores, aunque no se aprecia una direccionalidad predominante en estos.

WA295

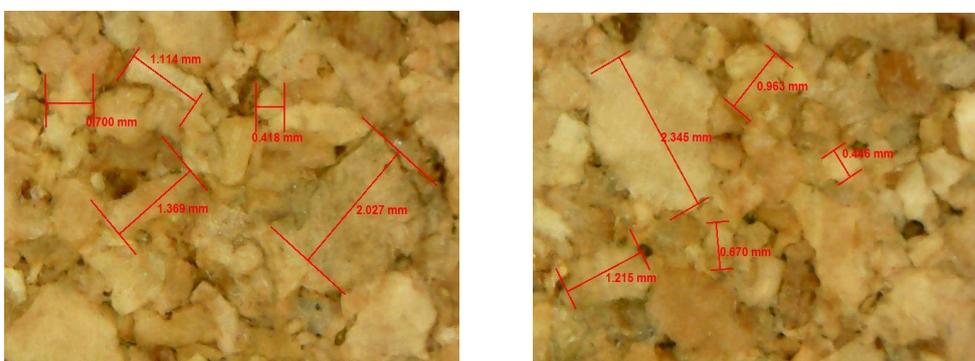


Figura 46

El tamaño medio del grano mide entre 0,5 y 2,3mm. La distribución en formas, tamaño, y orientación es similar a la observada en los materiales WA255 y WA235. Hay que

destacar menor ratio de aspecto y lo que a simple vista parece una menor porosidad al presentar una superficie más compacta, algo que iría en la línea del mayor valor de densidad.

NC170



*Figura 47*

Al tratarse del corcho natural no podemos hablar de grano, ya que su estructura es de origen natural.

AC250



*Figura 48*

Al estar este material constituido por pedazos de gran tamaño de corcho natural hemos de recurrir a la inspección visual y al empleo de un pie de rey o regla para ver el tamaño de los pedazos (granos) que lo forman. El tamaño promedio es de entre 2- 15mm. La elevada porosidad y una distribución aleatoria de los granos son las características más relevantes junto al tamaño de estos.



BA120

Figura 49

El tamaño medio del grano va de los 5 a los 20mm, lo comentado para el AC250 es aplicable aquí también. La diferencia fundamental es que este material ha sido sometido a un tratamiento térmico de tostado y no usa ningún aglomerante artificial.

En la siguiente figura se ordenan todos los materiales de mayor a menor grano.

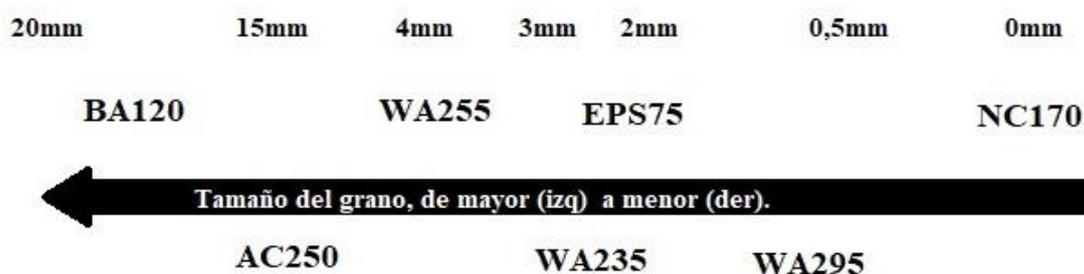


Figura 50

Por último, vamos a calcular la relación entre la densidad del material empleado, y la densidad que tiene la estructura del material suponiendo que fuese sólido, para ello se va a tomar la densidad del PS al ser la materia prima del EPS y será una buena aproximación. Para el caso del corcho es algo más complicado, pero en [14] los autores calculan la densidad de la pared de la celda del corcho y es este el valor que vamos a emplear.

*Ecuación 8*

$$\frac{\rho_{material}}{\rho_{sólido}} = \frac{\frac{1Kg}{V}}{\frac{1Kg}{V_{sólido}}} = \frac{V_{sólido}}{V}$$

Este valor nos da una idea de la relación aproximada de material sólido y gas en cada uno de los materiales estudiados.

Tabla 15

Designación	EPS75*	WA255	WA235	WA295	NC170	AC250	BA120
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	81,9	255,1	235,1	293,8	172,1	250,6	118,7
Densidad solido	1050	1150	1150	1150	1150	1150	1150
Ratio% sol/gas	8%	22%	20%	26%	15%	22%	10%

Se ve como el EPS75 es el material que más proporción de gas contiene, también hay que destacar el BA120 que su ratio es la mitad que el resto, fruto del tratamiento térmico al que es sometido.

## E Anexo: Marco regulatorio.

Para la realización de los ensayos de compresión se va a emplear una INSTRON 8032. Se van a ensayar tanto las probetas de EPS como las de los distintos corchos. No existe una normativa que regule la realización de los ensayos a compresión de conglomerados de corcho, no obstante, sus características son similares a las de otros materiales poliméricos como el EPS, para los que sí que hay una normativa. Así pues, encontramos la norma ISO 844 “*Propiedades de compresión para plásticos celulares rígidos*” o ASTM D1621 “*Método de prueba estándar para plásticos celulares rígidos*” y al tratarse el EPS75 de un polímero celular rígido, estas dos normativas serían adecuadas.

En estas normas se establecen unos criterios de ensayo comunes, como la velocidad de 5 mm/min, o que en ambas normas la probeta a ensayar tiene forma prismática. Pero difieren en otros, como las medidas de estas probetas. En la ISO 844 el prisma recomendado es de 100 x 100 x 50 mm, y en la ASTM D1621 las dimensiones mínimas serían las de un cubo de 25,4 mm de lado. Ambas normas vuelven a coincidir en que se prohíbe el uso de varias capas de material para alcanzar el espesor buscado.

En este caso debido a la imposibilidad de conseguir láminas de corcho del espesor necesario, se ha decidido fabricar las probetas de corcho mediante placas de menor espesor, unidas por un adhesivo elástico con el fin de alcanzar este espesor normalizado. Al tratarse de materiales conglomerados de corcho, en los cuales en la mayor parte de los casos de estudio se emplea un adhesivo como conglomerante, el unir dos placas con un adhesivo flexible no debe modificar de una forma notable las propiedades mecánicas del material. Esta influencia debería ser incluso menor si se tiene en cuenta que la unión va a estar sometida a compresión en dirección perpendicular a la superficie pegada, es por ello por lo que se procede de esta manera al margen de lo que dice la norma. Sin perder de vista que se sigue una norma de materiales plásticos y mientras que la estructura de células puede ser similar (la del corcho natural y muchos plásticos celulares) la estructura química de estos es completamente diferente.

Finalmente, las condiciones que se emplearán en el ensayo son:

Velocidad 5 mm/ minuto

Lado de la probeta cuadrada 36 mm

Se ha escogido esta longitud por que estaría dentro de los valores del ASTM D1621 y el EPS75 del que se disponía tenía este espesor, lo que nos permitía emplearlo sin apenas mecanizado, conservando la estructura del polímero casi intacta.

## F Anexo: Fabricación de las probetas.

Para la realización de los ensayos a compresión se han elaborado cinco probetas de cada material a ensayar. Un total de 35 probetas, aunque solo 28 serán ensayadas y la probeta restante quedará reservada para emplearse en caso de algún problema o fallo durante el desarrollo de los ensayos.

La elaboración de estas probetas se ha realizado en uno de los talleres del Edificio Betancourt bajo supervisión y siguiendo las debidas medidas de seguridad personal como el uso de gafas de protección y guantes de trabajo.

La preforma del material empleado fueron placas de dimensiones variables y rollos de material para el caso de los distintos materiales de corcho. Para el caso del EPS-75 se empleó una plancha de 37mm de espesor.

Las dimensiones mínimas que se quería dar a las probetas eran de 37x37x37mm.

Proceso llevado a cabo.

Para los materiales con preforma de plancha:

Primero se midieron en las planchas del corcho de forma aproximada las áreas que se iban a cortar, con el objetivo de aprovechar el material de la manera óptima y con el menor desperdicio.

Se calibro una sierra de cinta para que la distancia entre el filo y la guía fuese de 52mm, con el fin de que se compensase el material arrancado por la sierra y no incurrir en una dimensión real menor de 50mm. Cortadas las planchas en tiras y revisando con un pie de rey que no había errores de medida fruto de una mala operación de corte, se volvían a cortar, pero esta vez en la dirección perpendicular obteniendo así los cuadrados de 50x50mm con los que haríamos las probetas.



*Figura 51*

Después se pegaron los cuadrados para conformar los cubos de corcho que ensayaríamos, para el pegado se empleó un adhesivo de contacto que mantuviese las propiedades de flexibilidad, pero garantizase una buena sujeción y la perfecta transmisión de esfuerzos tanto en dirección perpendicular a la superficie cuadrada como en las direcciones contenidas en la misma. Para ello se empleó un adhesivo de contacto apto para corchos.

Para el pegado se puso una capa generosa en las dos superficies, uníamos las piezas para asegurar que se extendía el adhesivo de forma uniforme y las separábamos para esperar a que el adhesivo se activase. Cuando el adhesivo comenzaba su proceso de curado era el momento de volver a unir las dos partes y dejar reposar con un elemento encima que aplicase presión para asegurar la correcta unión.

Como las planchas de EPS ya tenían el espesor necesario, no hubo que pegarlas.

En el caso de que la preforma fuese en rollo, la operativa se tuvo que cambiar debido a que el material estaba deformado y era necesario conseguir que sus superficies fuesen paralelas y que no presentasen curvatura. Para ello se cortó el material en tiras de 50mm y se les aplicó el adhesivo como en el caso de los cuadrados. A continuación, se pusieron entre tablones de madera (con periódico para facilitar su posterior extracción) comprimidas por mordazas durante varios días para corregir esta deformación. Una vez el adhesivo se había secado y el material había perdido la curvatura se cortaban en cubos. Obteniendo las probetas finales.

Lo último era pintar el patrón estocástico para poder realizar el estudio de las deformaciones en las distintas direcciones con el programa *Gom Correlate*. Para ello se escogió una probeta de cada material y se le aplicó una capa de pintura blanca en spray para conseguir una superficie de color uniforme, después con otro spray se procedió a aplicar el patrón. La técnica empleada consistió en proyectar sobre la superficie partículas de pinturas, para evitar que la superficie se pintase fue imprescindible controlar la distancia de aplicación, el tiempo de aplicación del spray (es decir la cantidad de pintura) y la pulsación en el spray. La pulsación se limitó colocando una arandela bajo el pulsador de modo que se limitaba el recorrido y por tanto el caudal de gas y pintura que salía por la boquilla. Hizo falta varios intentos y botes de pintura hasta que se consiguieron patrones más o menos uniformes.



Figura 53



Figura 52

Una vez pintados y secados se pudo proceder al ensayo compresión de las probetas.

## G Anexos: Ensayos.

### G.1 Elemento que intervenían en cada ensayo

Para la realización de los ensayos a compresión se ha empleado una INSTRON 8032. En la Figura 54 vemos los distintos elementos que tomaban parte en cada ensayo.

8. INSTRON 8032
9. Conjunto camisa pistón y plato superior móvil
10. Probeta
11. Bloque de apoyo y plato inferior fijo
12. Temporizador
13. Cámara Nikon
14. Lámpara

Se empleó también un ordenador con software de control de la INSTRON 8032 en el que se almacenaban los resultados obtenidos en cada ensayo en un fichero compatible con Excel.

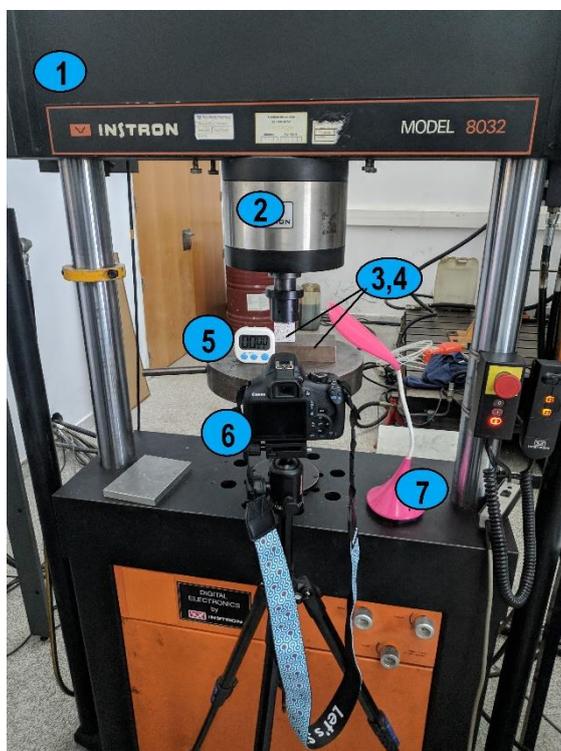


Figura 54

### Parámetros

El valor de fuerza de compresión máxima venía limitado por INSTRON y era de 100KN. La velocidad de avance se estableció como constante y de 5 mm/min.

### G.2 Desarrollo de los ensayos

Para cada material se realizaron 4 ensayos de compresión para las deformaciones del 90%, 75%, 62% y 50%. Cada uno de estos ensayos constó de hasta 4 ciclos de compresión espaciados en el tiempo lo suficiente para permitir la recuperación de la deformación por parte del material.

La dinámica empleada consistió en ensayar por tandas las probetas, se comenzó ensayando todas las probetas al 90%, una tras otra. Concluido el primer ciclo de compresión se volvían a ensayar en el mismo orden otra vez, con esto dejábamos tiempo para que el

material recuperase totalmente entre ciclos. Para saber si el material había dejado de recuperar, (es decir su espesor no aumentaba más o lo hacía a un ritmo despreciable) se iban midiendo de forma periódica cada 10 minutos hasta que el valor del espesor no variaba entre dos mediciones. Se repetía este proceso para todas las probetas siempre y cuando no se produjesen defectos por rotura de estas que se considerasen excesivos. Durante los ensayos de 90% se produjeron el fallo de la mayoría de las probetas.

En el caso de los ensayos al 90% de cada material, únicamente para el primer ciclo de compresión, se emplearon las probetas pintadas con el patrón estocástico. Durante este ciclo se tomaron fotografías cada 20 segundos con el fin de poder analizar la deformación con un software específico. Para aumentar la calidad de la imagen y evitar sombras que pudiesen afectar negativamente al procesado de estas imágenes se empleó una lámpara. En total se realizaron 112 ciclos de compresión, lo que llevo varias mañanas de trabajo.

### G.3 Imágenes de las probetas.

Aquí se ven una serie de fotografías tomadas durante los ensayos



Figura 55

Las siguientes fotografías se corresponden al estado de las probetas tras el primer ciclo de compresión para una deformación del 90%.



Figura 56



Figura 57

Este es el aspecto de las probetas al finalizar los 4 ciclos del primer ensayo, el correspondiente a 90% de deformación.



Figura 58

En estas tres ilustraciones vemos el aspecto de las probetas al finalizar los ensayos de 75%, 62,5% y 50% respectivamente.



Figura 59



Figura 60



Figura 61

## H Anexo: Comportamiento de los materiales durante ensayos

En este anexo se va a analizar el comportamiento de los distintos materiales durante los ensayos de compresión.

El análisis se va a centrar en analizar visualmente, (aprovechando las imágenes generadas para los análisis de deformación transversal con el programa *GOM Correlate*) el comportamiento estructural de las probetas durante los ensayos. También se tendrá en cuenta y se intentará cuantificar el fenómeno de recuperación del material tras ser sometido a los distintos ciclos de compresión de los que consta el ensayo.

Recordemos que se han realizado para todos los materiales, ensayos a compresión hasta alcanzar los valores de deformación de 90%, 75%, 62,5% y 50%. Para cada uno de estos ensayos se han realizado 4 ciclos de carga y tras cada ciclo se ha dejado reposar el material un tiempo que ha oscilado entre los 40 minutos y 1 hora

Veamos ahora el comportamiento observado en líneas generales para los materiales ensayados:

Durante el ensayo al 90% de deformación, el primer ciclo es el que aporta más valor ya que al producirse una densificación muy elevada en todos los materiales se producen defectos de mayor o menor magnitud que con la repetición consecutiva de ciclos se van agravando.

Podríamos decir que tenemos 4 comportamientos.

1-Por un lado, los materiales WA295, WA255 y WA235 que son los tres materiales de conglomerado de corcho con distintos tamaños de grano y de densidad, vemos como los tres tras realizar el primer ciclo de carga han sufrido daños severos, pero todos de la misma manera. Se pueden ver la evolución en las Figura 62, Figura 67 y Figura 68. Vemos como en las probetas de estos materiales aparece un ligero curvado de las probetas conforme se aumentaba la deformación y estas se densifican. Al llegar a valores próximos al máximo del ensayo se produce el fallo en las probetas de WA295 y WA235. En la probeta del material WA255 se ha producido el fallo en los ciclos posteriores.

2-El material AC250 es el que peor comportamiento ha presentado, no solo durante el ensayo al 90% sino en todos los ensayos. Durante el ensayo al 90% antes de alcanzar una deformación del 60% ya se podía observar cómo iba perdiendo la integridad estructural casi por completo. Esto aparece reflejado en la Figura 66. Si bien realizaremos otro ciclo de carga más, al final se desechará sin realizar el tercero.

3-El EPS75 y el NC170 (corcho natural, que además ha sido ensayado de forma radial) tienen un comportamiento similar si nos fijamos en sus ilustraciones, Figura 63 y Figura 64 respectivamente. Para valores de deformación elevadas sus superficies no se abomban, sino que da la impresión de que unas capas de material se desplazan de forma lateral respecto a otras, no obstante, habría que analizarlo con más cuidado. Lo que si podemos afirmar es que en ninguno de los dos casos la deformación se produce como en los materiales WA295, WA255 y WA235. La diferencia principal entre el NC170 y el EPS75 la encontramos en la recuperación de la deformación después del ensayo. Siendo para el caso de la probeta de EPS75 muy inferior. Debido a que la probeta del material EPS75 no ha recuperado apenas, los ciclos siguientes no aportan mucha información. En el caso del NC170 vemos en la Figura 64 como al final de todos los ensayos sigue presentando una notable integridad estructural.

4-Por último, el BC120 presenta un comportamiento muy atípico al resto de corchos. Si bien durante el primer ensayo de este material la probeta sufre algún daño como se puede apreciar en la Figura 65, el material presenta una recuperación de la deformación excepcional tanto al final del primer ciclo como de los siguientes ciclos.

Para los ensayos al 75%, 62,5% y 50% al no alcanzarse valores de densificación elevados el comportamiento es mejor, en la mayoría de los casos no sufren daños apreciables y la

deformación permanente es menor cuanto menor es la deformación a la que se someten las probetas. Hay que destacar el mal comportamiento que ha vuelto a tener la probeta de AC250 durante los ensayos del 75% y 62,5%, llegando a desecharse la probeta empleada para los 62,5% antes de completar los 4 ciclos de carga. El EPS75 por otro lado ha presentado muy mala recuperación ante una deformación con independencia de la magnitud de esta, si bien en el caso del ensayo al 50% la recuperación es algo mayor que en los otros.

En la tabla tal se ven los valores de deformación que alcanzan los ensayos, estos datos no están completos ya que en un primer momento no se consideró este efecto de la recuperación, pero tras ver la evolución tan significativa de las probetas ensayadas al 90% se decidió tomar las medidas de las probetas después de realizar el ciclo del ensayo correspondiente y justo antes de comenzar el siguiente. Con estos datos se ha elaborado en Tabla 16 en la que vemos los valores de deformación remanentes en cada uno de los momentos citados y conociendo las horas y los intervalos de tiempos podíamos calcular más o menos cuanto tiempo tenía estaba el material en reposo. Repitiendo las mediciones cuatro días después de realizar los ensayos (última columna de la tabla) nos damos cuenta como el proceso de recuperación del material es más lento de lo que habíamos supuesto y es algo que se debería tener en cuenta para ensayos cíclicos de materiales

### Conclusiones

Se ha podido ver como en todos los casos, una deformación del 90% ha sido excesiva, provocando en algunos casos el fallo del material. Hay que destacar en especial el mal comportamiento del AC250, que a pesar de haber acabado el ensayo de 75% manteniendo la estructura, esto no ha sido así en el caso del 62,5% poniendo de relieve las diferencias que hay entre unas probetas y otras de este material. La estructura de grano muy grande, con poca superficie en contacto de unos y otros granos pueden ser la explicación ante este hecho.

Todos los materiales han tenido en común que, tras una primera deformación, se ha producido una recuperación en el tiempo. Podemos encontrar dos fases en esta recuperación, la recuperación instantánea que se produce justo después de liberar la carga del orden de segundos, y una recuperación que se extiende en el tiempo y cuya velocidad de recuperación disminuye conforme el proceso de recuperación va avanzando, pero que puede llegar a ser del orden de minutos u horas.

A vista de los resultados de la Tabla 16, el EPS75 sería el material que peor capacidad tiene de recuperar sus dimensiones iniciales, de hecho no se puede hablar de que se produzca recuperación elástica alguna, en el caso de los ensayos al 90% el corcho natural sería el que mejor recuperación dimensional ha tenido. Para los ensayos de menos de 75% de deformación el BA120 ha sido el que mejor ha recuperado, quedando con los valores de deformación más pequeños en el resto de los ensayos.

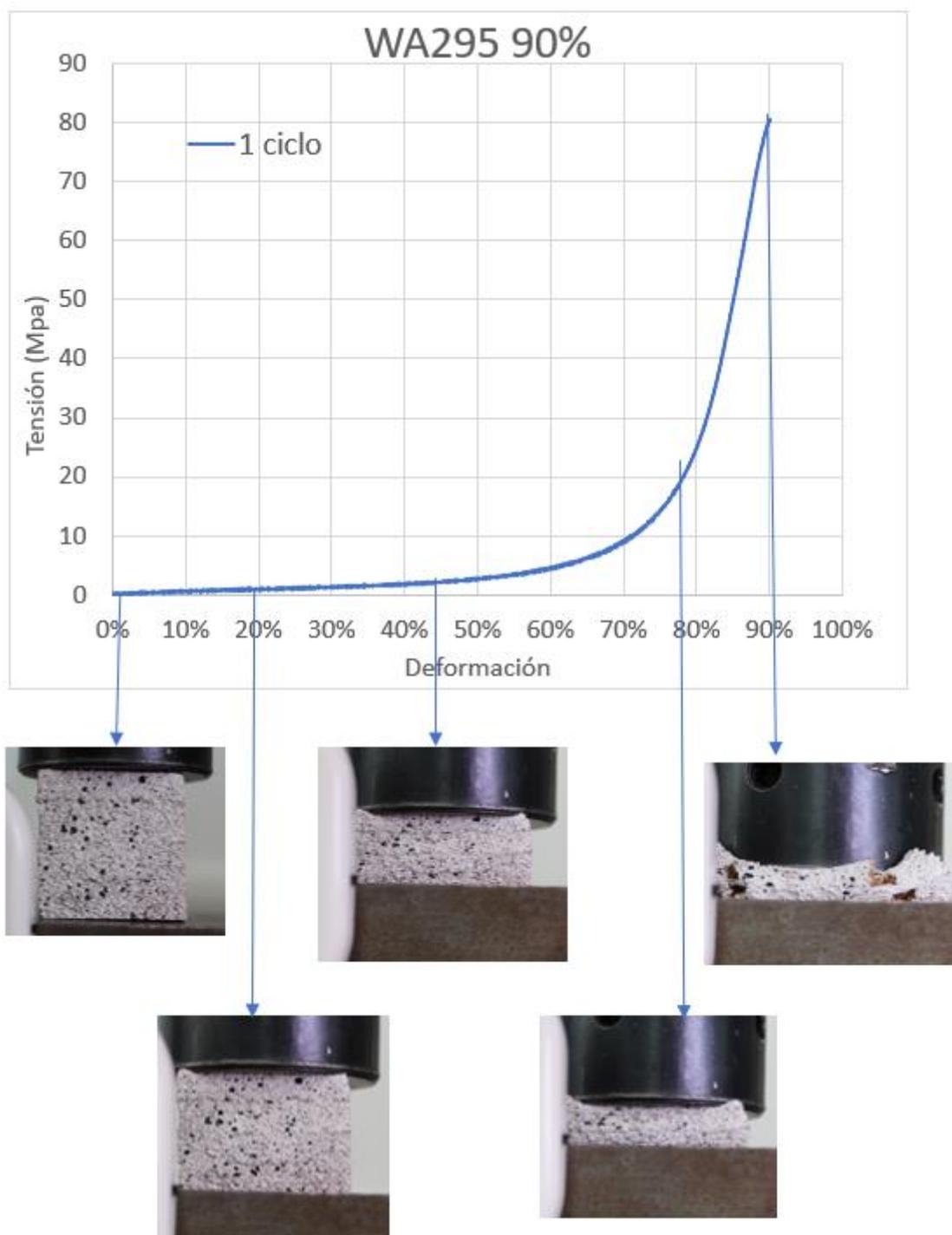


Figura 62

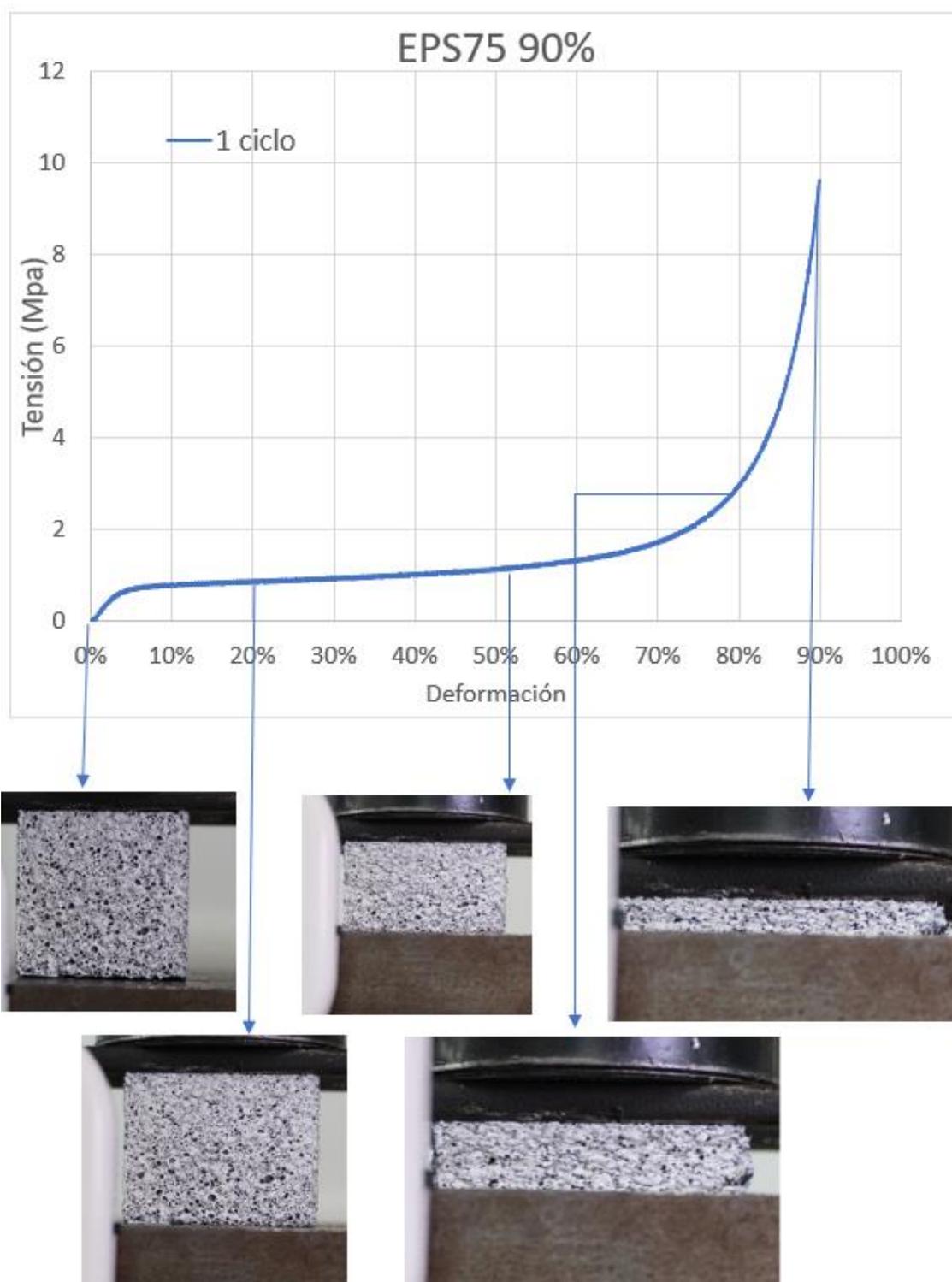


Figura 63

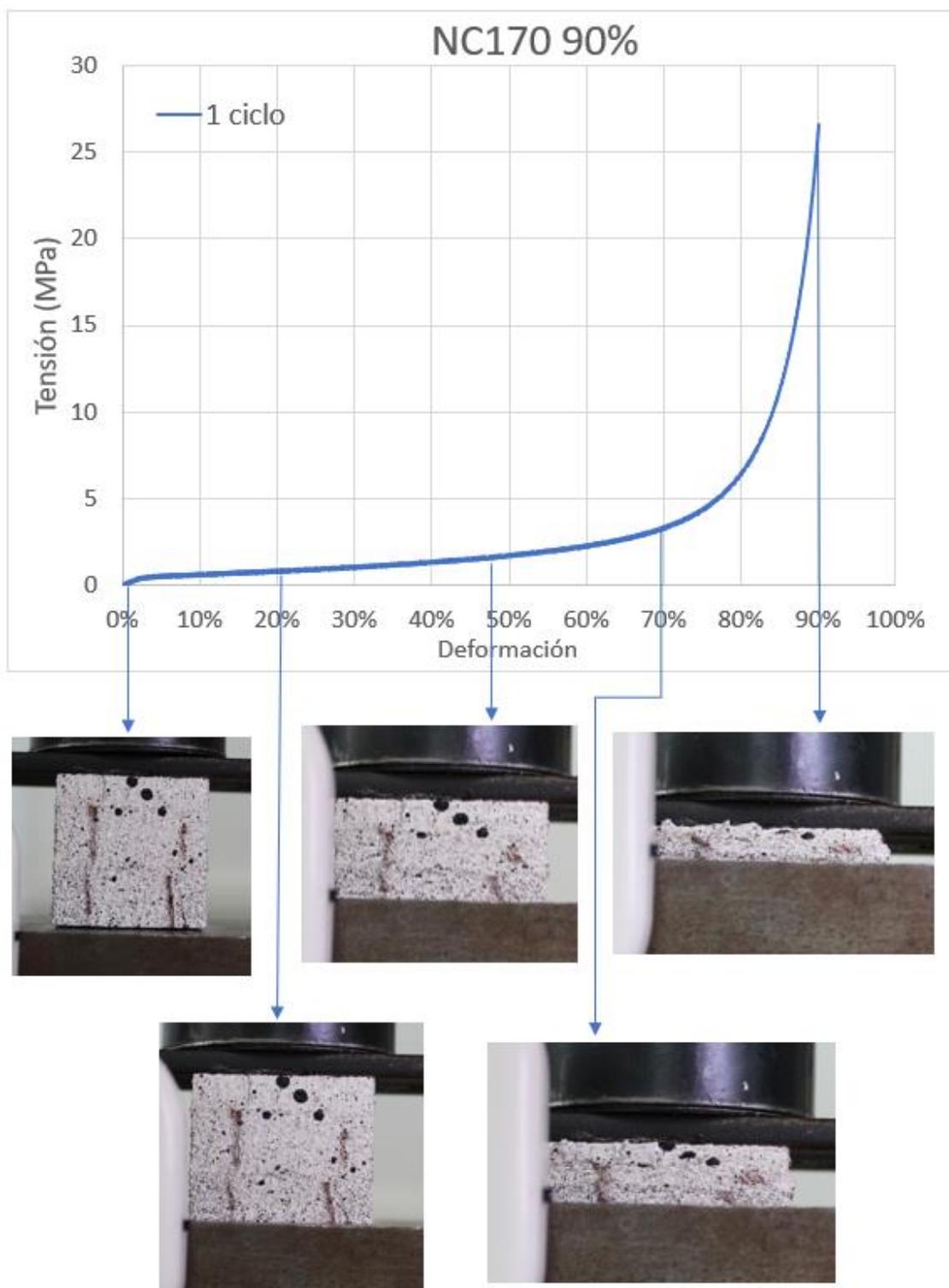


Figura 64

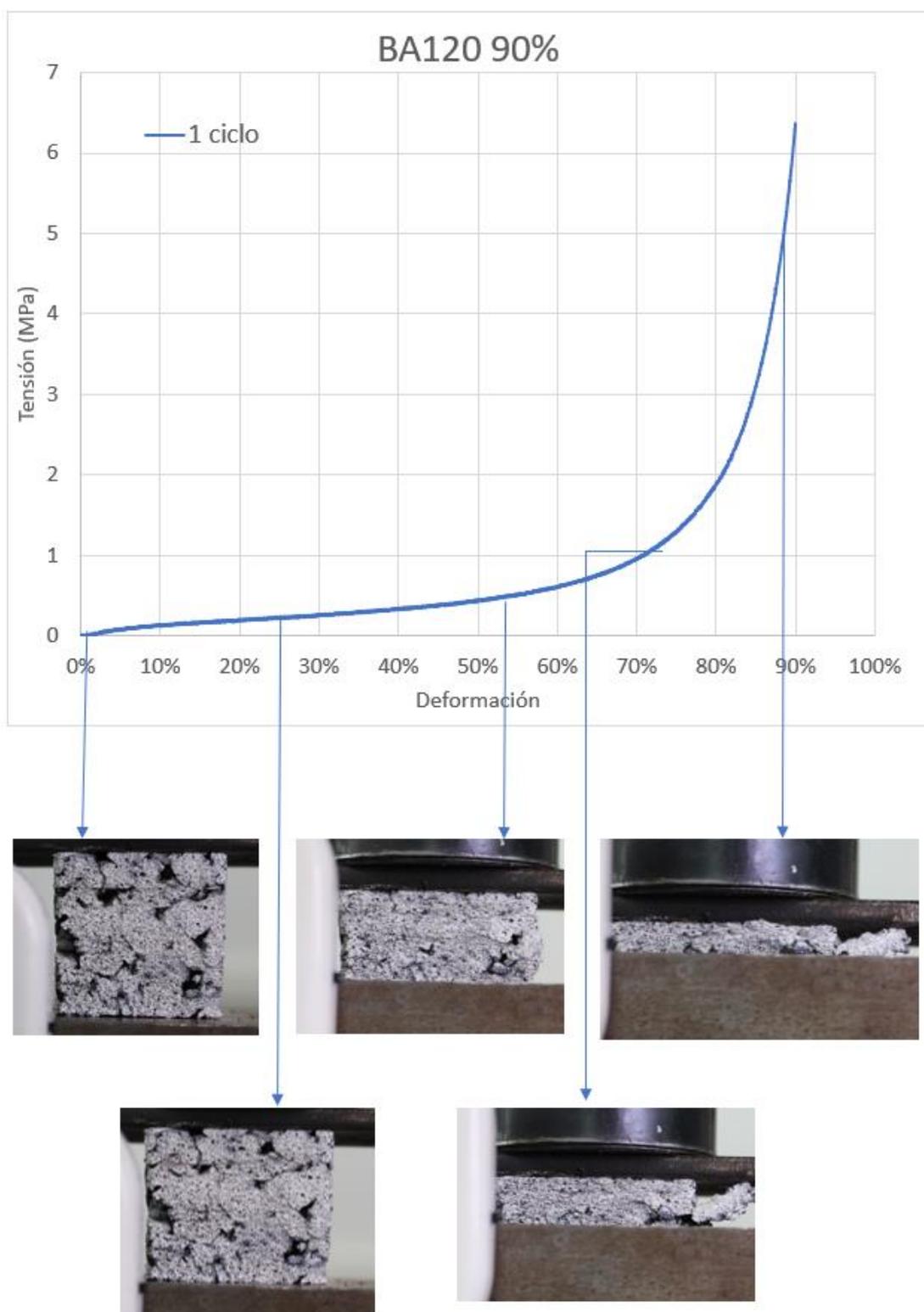


Figura 65

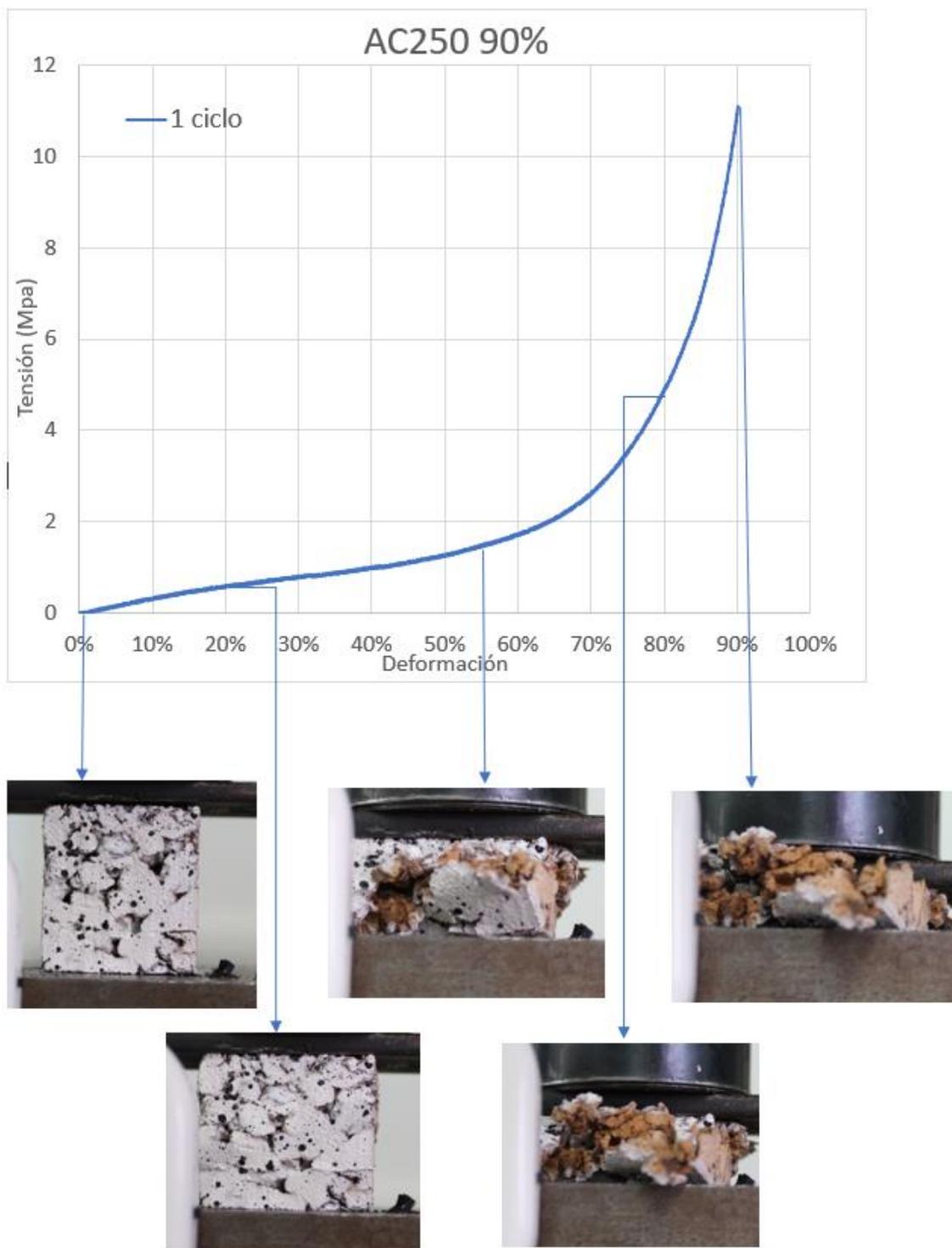


Figura 66

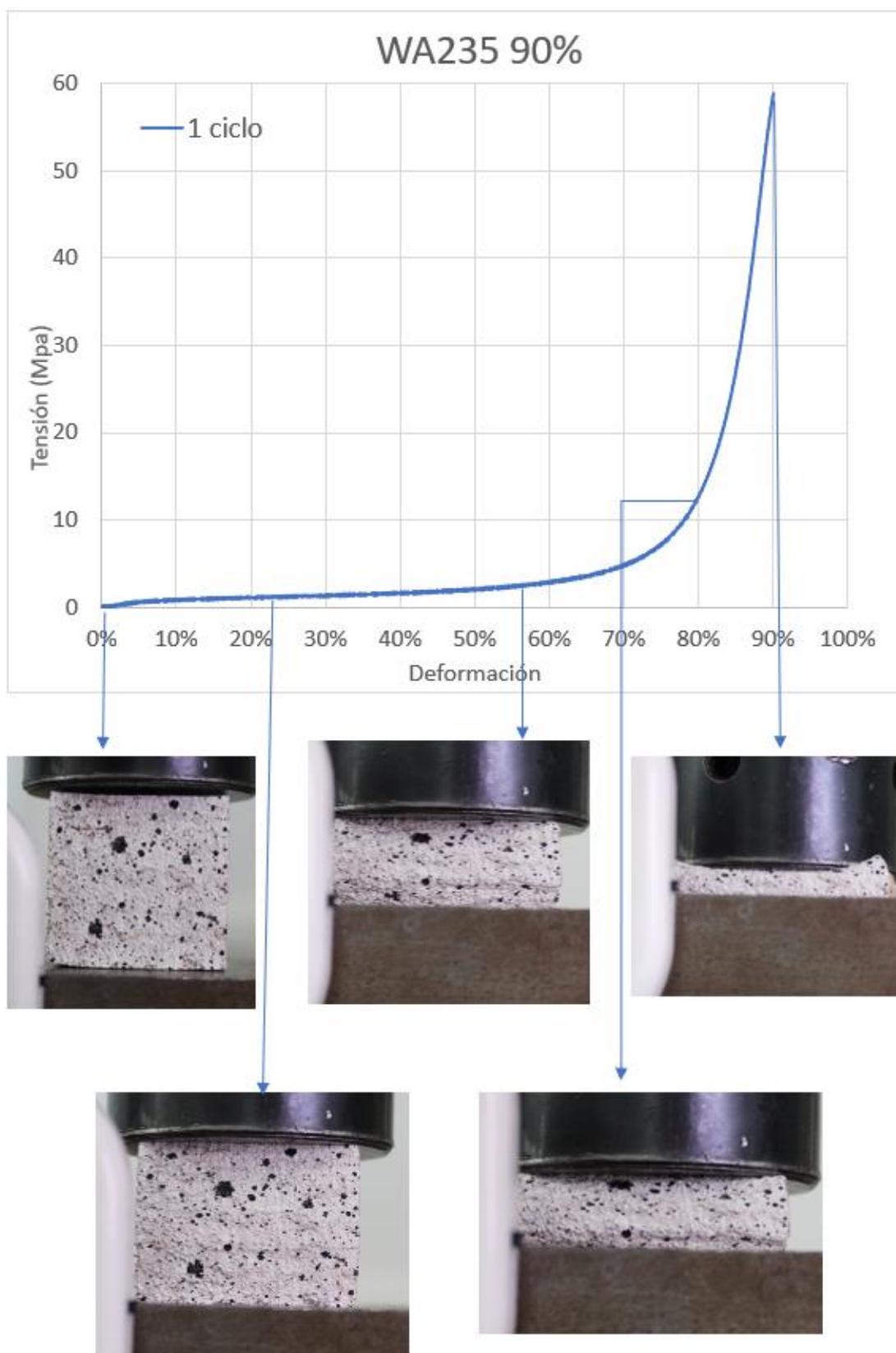


Figura 67

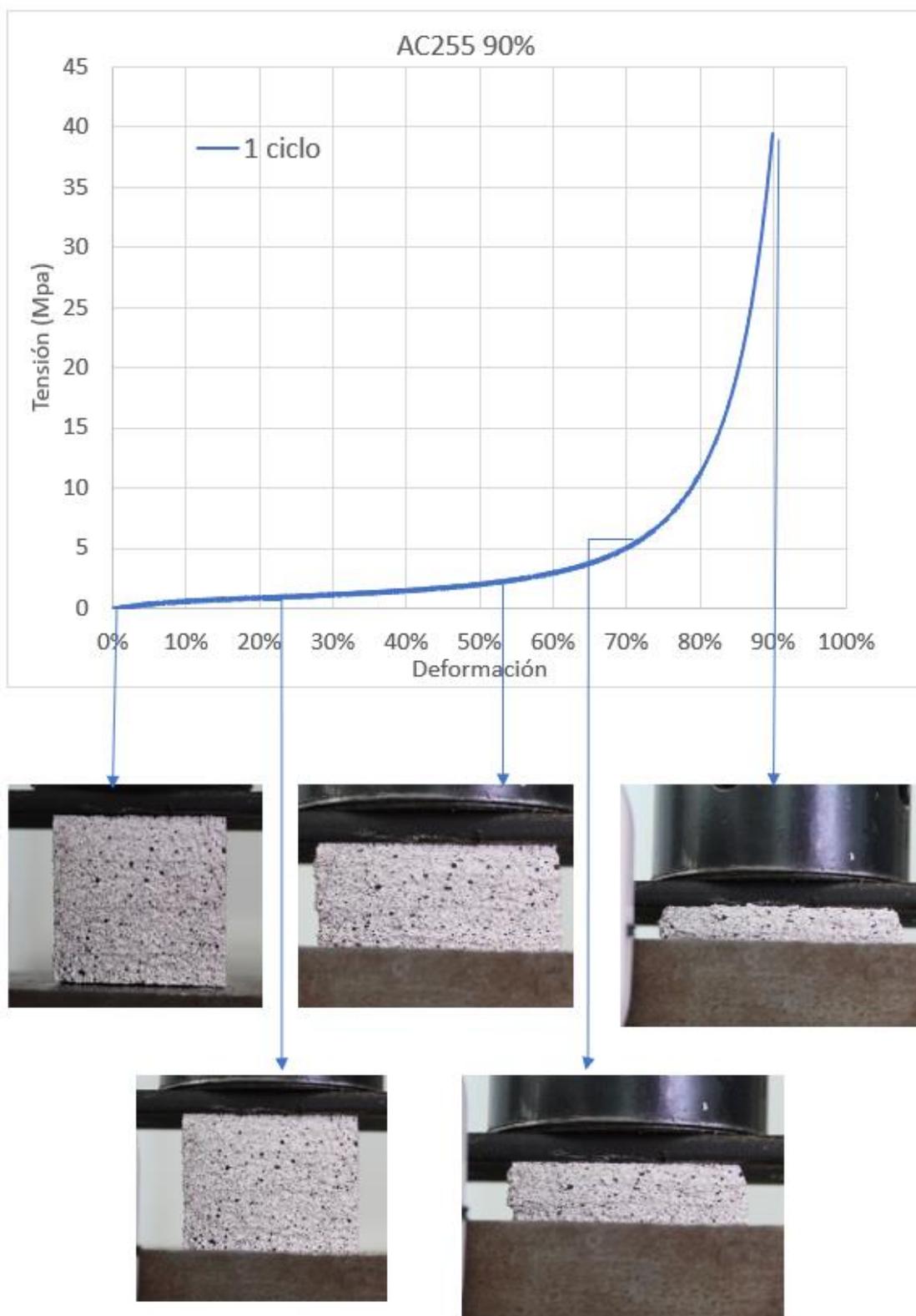


Figura 68

Estudio de las propiedades mecánicas del corcho natural y sus aglomerados

HORA	8:15		11:40	11:46	11:47	12:40	12:46	12:47	13:10	13:16	13:17	13:50	4dd
90%	Compr1	DC1	Pre Comp2	Compr2	DC2	Pre Compr3	Compr3	DC3	Pre Comp4	Compr4	DC4	Final	4Ddesp
WA295	90%		42%	90%		44%	90%		45%	90%		47%	43%
WA235	90%		53%	90%		55%	90%		57%	90%		60%	57%
WA255	90%		31%	90%		35%	90%		40%	90%		41%	37%
NC170	90%		29%	90%		32%	90%		35%	90%		38%	32%
EPS75	90%		85%	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC250	90%		79%	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA120	90%		37%	90%		45%	90%		49%			54%	47%
75%													
WA295	75%	35%	14%	75%	22%	16%	75%	23%	17%	75%	23%	18%	14%
WA235	75%	29%	21%	75%	29%	23%	75%	29%	24%	75%	30%	26%	22%
WA255	75%	35%	18%	75%	23%	20%	75%	27%	22%	75%	28%	23%	20%
NC170	75%	23%	17%	75%	24%	18%	75%	24%	19%	75%	22%	20%	17%
EPS75	75%	64%	61%	75%	65%	63%	75%	65%	65%	75%	40%	65%	64%
AC250	75%	38%	32%	75%	41%	35%	75%	41%	38%	75%	31%	38%	29%
BA120	75%	12%	9%	75%	20%	13%	75%	20%	15%	75%	66%	16%	10%
63%													
WA295	63%	12%	8%	63%	13%	9%	63%	15%	10%	63%	16%	11%	7%
WA235	63%	18%	16%	63%	21%	17%	63%	22%	18%	63%	23%	19%	15%
WA255	63%	14%	11%	63%	15%	13%	63%	15%	14%	63%	15%	15%	11%
NC170	63%	16%	14%	63%	18%	16%	63%	18%	16%	63%	18%	17%	13%
EPS75	63%	49%	51%	63%	52%	51%	63%	52%	51%	63%	51%	51%	50%
AC250	63%	25%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA120	63%	4%	4%	63%	15%	6%	63%	16%	7%	63%	17%	10%	5%

Estudio de las propiedades mecánicas del corcho natural y sus aglomerados

HORA	8:15		11:40	11:46	11:47	12:40	12:46	12:47	13:10	13:16	13:17	13:50	4dd
50%	Compre1	DC1	PreComp2	Com-pre2	DC2	PreCompre3	Com-pre3	DC3	PreComp4	Com-pre4	DC4	Final	4Ddesp
WA295	50%	5%	4%	50%	5%	5%	50%	7%	5%	50%	8%	6%	4%
WA235	50%	13%	10%	50%	13%	12%	50%	15%	13%	50%	15%	14%	11%
WA255	50%	13%	8%	50%	14%	9%	50%	19%	10%	50%	18%	11%	8%
NC170	50%	12%	10%	50%	13%	13%	50%	14%	12%	50%	14%	12%	13%
EPS75	50%	38%	5%	50%	39%	39%	50%	41%	40%	50%	41%	41%	40%
AC250	50%	16%	8%	50%	17%	16%	50%	28%	20%	50%	29%	22%	16%
BA120	50%	10%	42%	50%	10%	5%	50%	9%	5%	50%	10%	9%	4%

Tabla 16

Compre#: Hace referencia al ciclo de compresión llevado a cabo.

DC#: Valores medidos después de la compresión

PreComp#: Valores medidos pasado un tiempo variable, justo antes de volver a ensayar el material. Se asume que el tiempo es suficiente para la recuperación del material.

Final: Valor de deformación al acabar el último ciclo de compresión para cada material.

4dd o 4Ddesp: Valor de las deformaciones tras 4 días.

## I Anexo: Resultados de los ensayos al 90% de deformación, caracterización de los materiales.

Se han ensayado los materiales hasta una deformación del 90% para determinar su comportamiento mecánico y poder comparar los materiales.

Los resultados del ensayo de compresión son la fuerza en kN y la deformación que sufre para cada instante de tiempo. Se ha empleado una hoja Excel para tratar estos datos y analizar el comportamiento mecánico de cada material.

Se han calculado las curvas de **tensión frente a deformación**, de las que obtendremos el **módulo elástico del material** y la **tensión máxima de la zona elástica**, así como también el **módulo de la platea o de “platea”** (que es la pendiente de la meseta horizontal que se forma en este tipo de materiales entre la región elástica y la zona de la curva en la que el material comienza a densificar). También se han calculado la **tensión del límite elástico** y la **tensión de inicio de la densificación**, se empleará esta última para comparar la densidad de los materiales. Otras curvas de interés que han sido obtenidas para la caracterización de los materiales son las curvas de: **Tensión específica frente a deformación, energía absorbida por unidad de volumen frente a deformación, energía específica absorbida por unidad de volumen frente a deformación** y para finalizar las **de idealidad y eficiencia frente a deformación y a tensión**.

En algunos trabajos que comparan las propiedades mecánicas de espumas, también se grafica la curva de la evolución de la energía normalizada frente a la tensión normalizada. Estos valores normalizados se obtienen dividiendo la energía y la tensión por el módulo elástico del material original. En el caso del EPS sería el del PS, pero en el caso de los conglomerados de corcho es más complicado ya que no existe un único valor para el corcho pues las propiedades mecánicas del corcho virgen varían mucho. En este caso se ha decidido prescindir de esta comparativa ya que no se considera apropiada dadas las características particulares del corcho.

### I.1 Cálculo de los parámetros empleados para el análisis y la caracterización de los materiales

**Deformación ingenieril normal ( $\epsilon$ ):** Se define como la variación de la longitud del elemento en la dirección de la carga aplicada. Se suele expresar en valor porcentual multiplicando por 100.

*Ecuación 9*

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}; \epsilon\% = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

**Tensión de compresión ingenieril ( $\sigma$ ):** Se obtiene como el cociente entre la fuerza de compresión que actúa sobre la probeta, dividido por el área de la sección transversal perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. El valor de la sección se toma de la probeta antes del ensayo y se asume constante durante este

*Ecuación 10*

$$\sigma(MPa) = \frac{F(N)}{A_0(mm^2)}$$

**Tensión específica:** La tensión específica que es el resultado de dividir la tensión a la que está sometido el material por la densidad de este

*Ecuación 11*

$$\sigma_{\text{específica}} = \frac{\sigma(\text{Mpa})}{\rho\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}\right)}$$

**Módulo de Young:** Este parámetro nos permite hacernos una idea de la resistencia que presenta el material a ser deformado, sin que se produzca una deformación plástica en este. El módulo de Young se define como la pendiente de la zona lineal que se produce al inicio de la deformación en una curva tensión-deformación de un material, en este caso, ensayado a compresión (aunque también se puede calcular para ensayos a tracción).

*Ecuación 12*

$$E_y = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

**Módulo de la platea:** Este parámetro nos permite hacernos una idea de la oposición que ejerce el material mientras su estructura de celdas se deforma y colapsa poco a poco. Suele ser menor que el módulo elástico, se calcula como la pendiente de la curva tensión-deformación en la zona de la platea.

*Ecuación 13*

$$E_p = \Delta\sigma_p / \Delta\varepsilon_p$$

**Tensión límite elástico:  $\sigma_y$ .** Es el valor de la tensión por encima del cual se produce deformación plástica en el material. En el caso de los conglomerados de corcho a compresión no existe una norma para determinarlo, como si sucede en los metales ensayados a tracción. Se obtendrá de forma aproximada con el fin de comparar la de cada material con fines más cualitativos que cuantitativos.

**Tensión característica de una espuma:  $\sigma_c$**  La tensión característica de una espuma o un polímero varia de un trabajo a otro, pero generalmente se determina como la intersección de la pendiente de la zona de la platea y la prolongación de lo que sería el módulo elástico del material sin espumar o completamente densificado.

Al empelar corchos y no solo polímeros, el módulo elástico del material sin espumar no se puede obtener, y tampoco se puede tomar uno como constante pues podría variar, por ello se decide tomar en esta ocasión como tensión característica o de referencia la tensión a la que se inicia la densificación. Esta tensión coincide con el punto en el que la eficiencia del material se hace máxima y se empleara este criterio para obtenerla.

### Tensión de inicio de la densificación $\sigma_d$

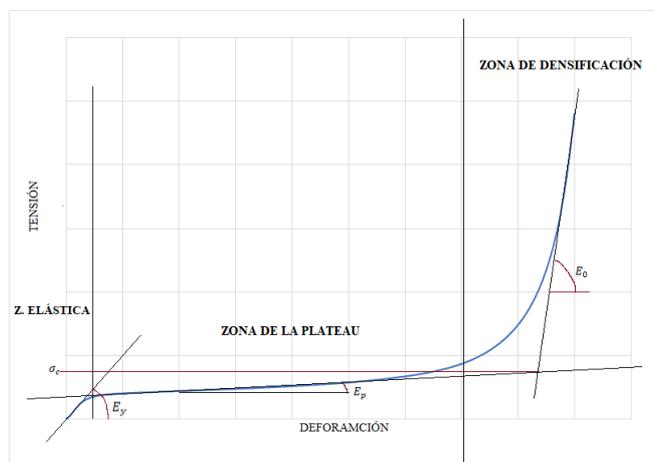


Figura 69. Parámetros característicos calculados sobre la curva tensión-deformación

**Energía:** La energía absorbida por el material durante un ensayo de compresión se puede obtener de la integral bajo la curva tensión-deformación.

Ecuación 14

$$E(J) = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

Al realizar los cálculos con Excel en vez de la energía, vamos a emplear la energía por unidad de volumen y la energía por Kg de material a la que llamaremos energía específica

**Energía por unidad de volumen:** La energía por unidad de volumen coincide con la suma acumulada de las tensiones en cada instante del ensayo, tomado la tensión en MPa y la unidad de volumen el  $\text{cm}^3$  tenemos lo siguiente:

Ecuación 15

$$1\text{Mpa} = 10^6 \text{Pa} = 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^6 \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{cm}^3 10^6} = \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

Este parámetro nos dará una idea de la cantidad de energía absorbida por el material en relación con el volumen que ocupa.

**Energía específica:** La energía específica se obtiene calculando la integral debajo de la curva de tensión específica-deformación. En este trabajo se calculará dividiendo la energía por unidad de volumen entre la densidad del material.

Ecuación 16

$$E_{\text{específica}} = \frac{\text{Energía}}{\rho \left( \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \right)} = \frac{\text{J}}{\text{cm}^3 \times \rho} = \frac{\text{J} \times \text{cm}^3}{\text{cm}^3 \times \text{Kg}} = \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

Este parámetro nos dará una idea de la cantidad de energía absorbida por el material en relación con masa del material.

**Aproximación empelada para el cálculo de la energía:** Podemos aproximar la energía, es decir, el área bajo la curva tensión-deformación, en un instante n, es decir cuando el material se ha deformado  $\varepsilon_n$  y está sometido a una tensión  $\sigma_n$ , por la suma de las áreas formadas por los rectángulos cuya base es igual a la diferencia de deformación entre dos instantes y su altura el valor de la tensión promedio entre estos dos instantes.

Ecuación 17

$$E_i = \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \times (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) + E_{i-1}$$

**Eficiencia e Idealidad:** Tanto el concepto eficiencia como el concepto idealidad ya han sido introducido, como se ha visto la eficiencia es el resultado de dividir la energía por el valor de tensión en un instante concreto, y la idealidad es el resultado de dividir la energía por el producto de la tensión y la deformación en un instante concreto. Su implementación en Excel se ha llevado a cabo mediante las siguientes expresiones.

Ecuación 18

$$Eficiencia_i = \left( \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \times (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) + Energía_{i-1} \right) / \sigma_i$$

Ecuación 19

$$Idealidad_i = Eficiencia_i / \varepsilon_i$$

Ambos parámetros adimensionales, se pueden ver tanto en porcentaje como valor tanto por uno, se suelen representar su evolución frente a la tensión y frente a la deformación permitiendo estas representaciones ver en qué momento del ensayo el comportamiento del material está siendo el más óptimo

## I.2 Curva tensión frente a deformación

En la Figura 19 se pueden ver las curvas tensión deformación de todos los materiales de estudio, nos vamos a valer de esta curva para determinar el **módulo elástico de cada material**, la **tensión máxima de la zona elástica**, el **módulo de la platea o de plateau** y la tensión característica.

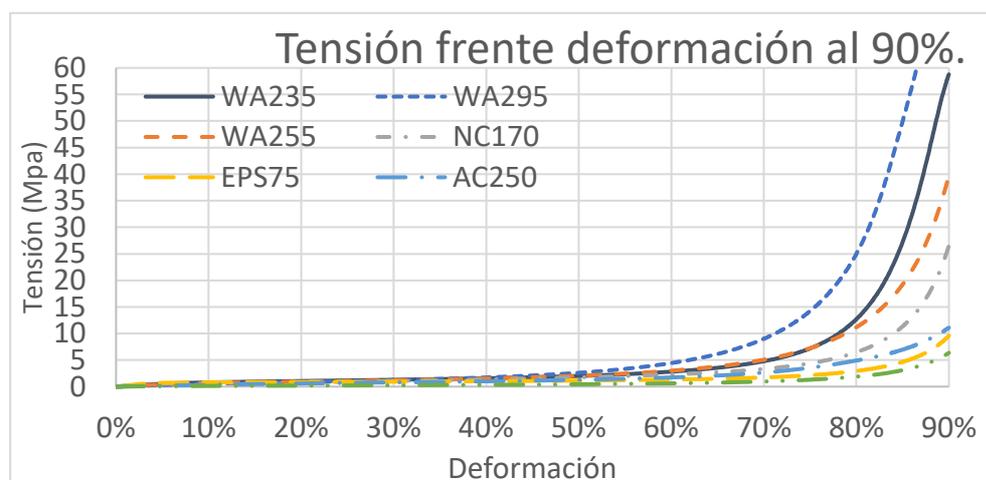


Figura 70. Curva tensión-deformación de todos los materiales ensayados al 90% de deformación

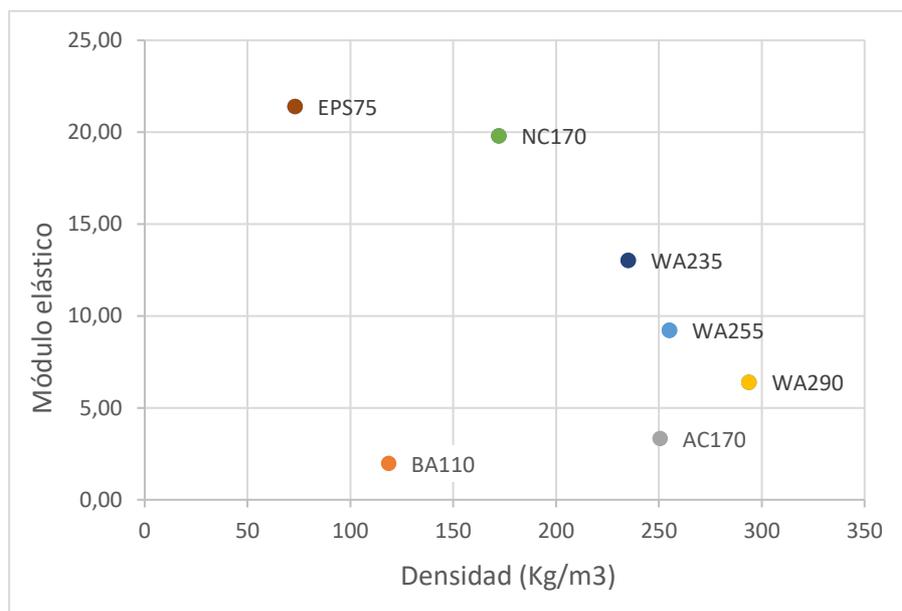


Figura 71. Módulo elástico frente a la densidad de los materiales.

Tabla 17. Valores obtenidos en el ensayo de caracterización al 90% de deformación.

	WA290	WA235	WA255	NC170	AC250	BA110	EPS75	Unidades
$E_y$	6,4	13,0	9,2	19,8	3,3	2,0	21,4	MPa
$E_p$	3,52	2,37	3,07	2,21	2,10	0,622	0,772	MPa
$\sigma_y$	0,3-0,38	0,57-0,63	0,42-0,47	0,4-0,44	0,43-0,46	0,09-0,1	0,53-0,6	MPa
$\varepsilon_o$	5-7 %	5-7 %	5-6 %	2-3 %	14-15 %	3-6 %	3-4 %	-
$\sigma_p$	3,00	2,46	2,43	2,47	1,81	0,54	1,43	MPa
$\varepsilon_o$	53%	55%	55%	63%	61%	57%	64%	-

Se puede ver en la Figura 21 y en Figura 22 la variación de los módulos de elasticidad y de la platea en función de la densidad, llama la atención como para todos los materiales a excepción de BA110 y AC170 el módulo elástico es mayor para los materiales que tienen menor densidad, pero esta tendencia se invierte para el módulo de la platea, siendo mayor cuando mayor es la densidad del material. Por otro lado, tenemos la Figura 23 y la Figura 74 en la que vemos a que valores de tensión y deformación se produce el inicio de la densificación, tomándose este valor como el característico del material para su comparación.

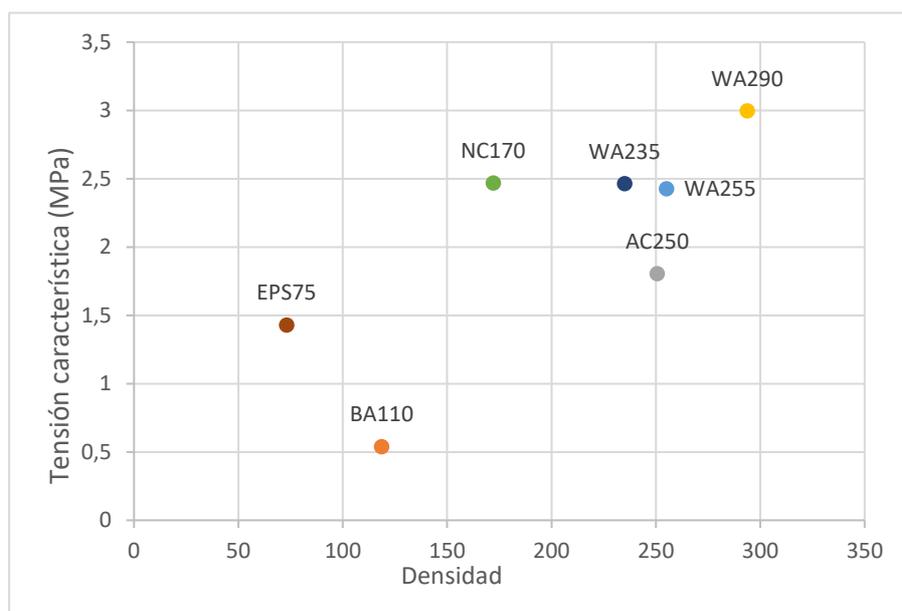


Figura 72. Tensión característica o tensión de densificación frente a densidad de los materiales

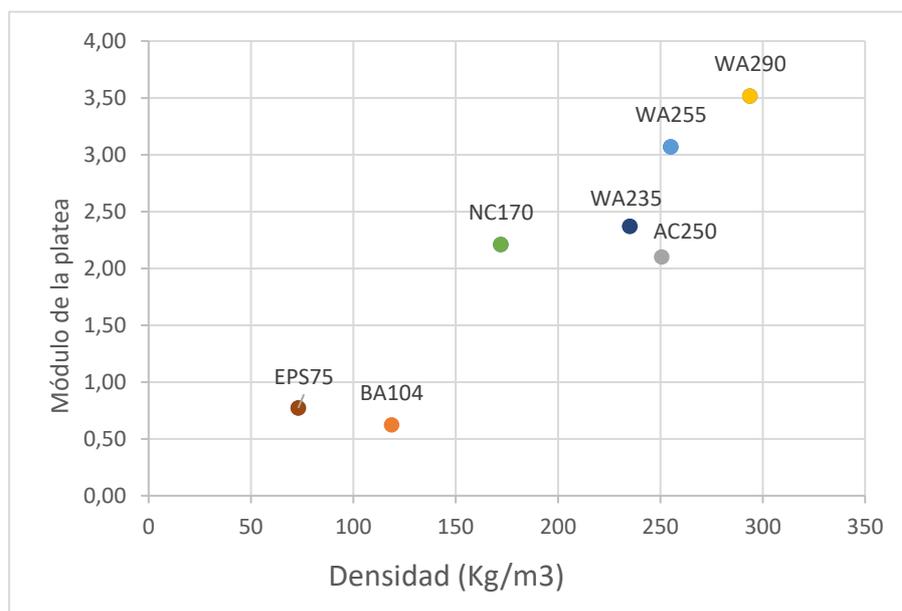


Figura 73. Módulo de la platea frente a densidad de los materiales

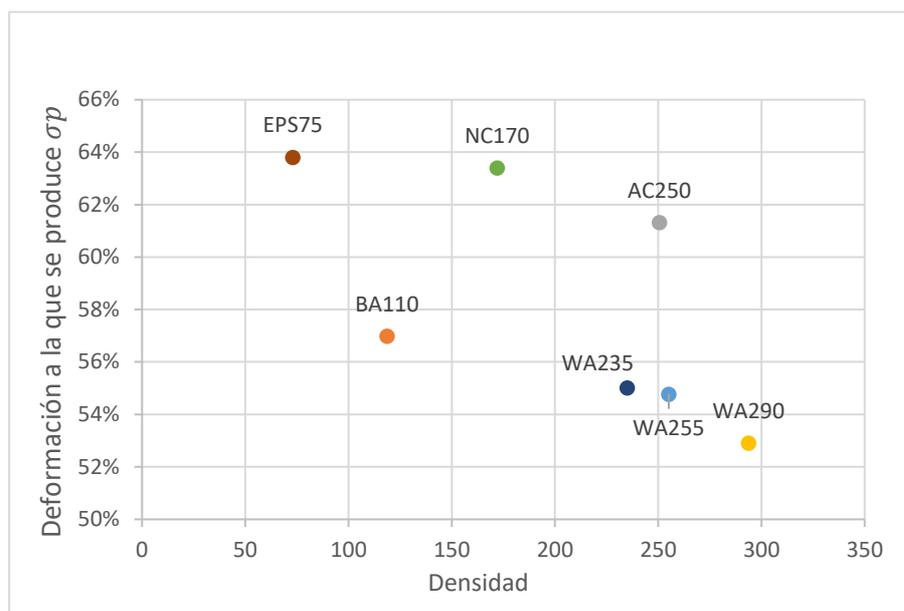


Figura 74. Deformación a la que se produce la densificación o tensión característica frente a densidad de los materiales

### I.3 Curva de tensión específica frente a la deformación.

En esta gráfica se presenta frente a la deformación la tensión dividida por la densidad de cada

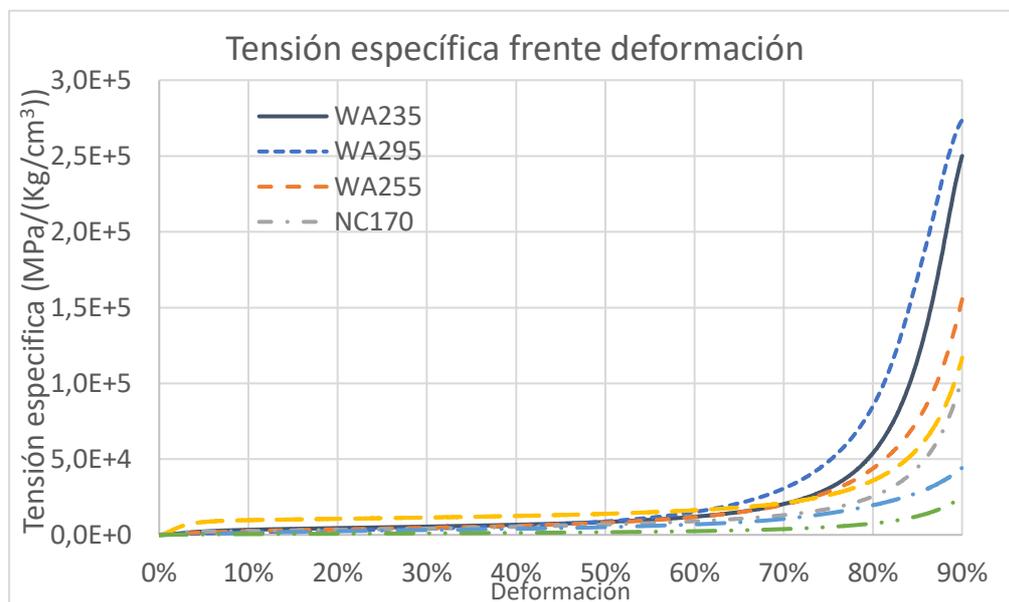


Figura 75. Curva tensión específica frente a deformación

material, lo que se conoce como tensión específica.

Hay un aspecto diferencial entre lo que se observa en la Figura 19 y lo que se observa en esta figura. Esto es el comportamiento del EPS75, ya que es el que más oposición presenta ante la deformación (en términos específicos), a valores de deformación menores que el valor de deformación en la que se produce la densificación de este material. Se pone de relieve las buenas

propiedades mecánicas en término específicos de este material o dicho de otra forma las buenas propiedades mecánicas en proporción a la relación peso-volumen que tiene.

#### I.4 Energía absorbida por unidad de volumen.

En este apartado se va a ver la energía absorbida por unidad de volumen de cada probeta, trabajando con probetas de volumen casi igual, se puede decir que es la energía absorbida por cada material. Se van a ver dos ilustraciones, una del ensayo completo y otra del ensayo hasta una deformación del 65%, ya que no solo es importante saber cuánta energía es capaz de absorber el material en términos absolutos, sino que casi es más importante para la caracterización de un material y plantear sus posibles usos conocer cómo evoluciona la energía absorbida en relación con la deformación inducida en el material durante cada instante del ensayo.

Para deformaciones menores del 20% el material que mejor comportamiento presenta es el EPS75, aunque los resultados del WA235 son también muy buenos, de hecho, para deformaciones comprendidas entre el 53% y el 20%, es este material el que más cantidad de energía absorbe. Para valores de deformación mayores el WA295 es el que en términos absolutos absorbe más energía, no obstante, esta se produce en zonas de deformación muy elevadas en las que se inducen tensiones también muy altas y este hecho se ha de considerar, ya que el material transmitirá tensiones muy elevadas y en determinadas aplicaciones este hecho es peligroso.

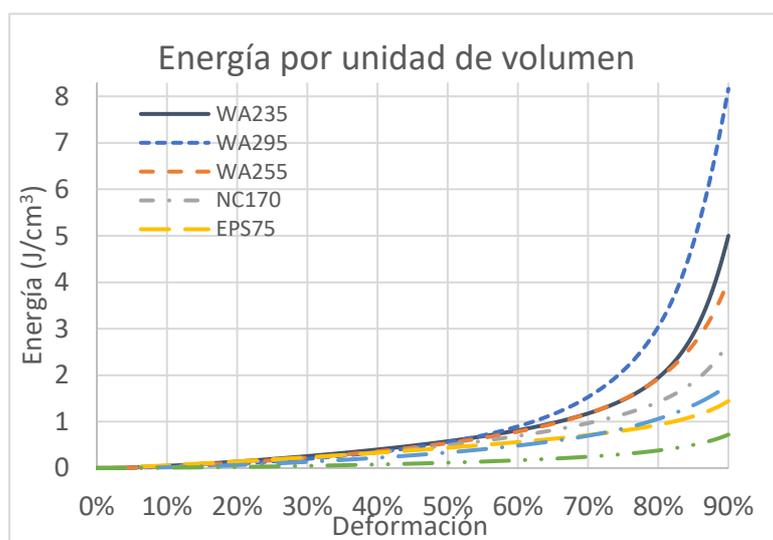


Figura 76. Energía por unidad de volumen deformación 90%

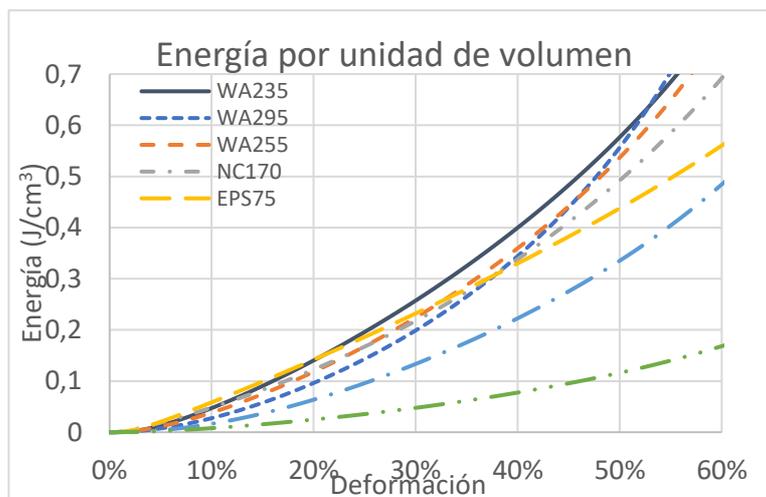


Figura 77. Energía por unidad de volumen deformación al 60%

### I.5 Energía absorbida por Kg de material.

La energía absorbida por kg de material es la energía específica que absorbe el material, como es obvio, vistos los resultados de energía por unidad de volumen y sabiendo la notable diferencia de densidad entre el EPS75 y los conglomerados WA, que el material que mejor comportamiento tiene es el EPS75 como se ve en la Figura 78. Vamos como el comportamiento del EPS75 es excelente hasta alcanzar deformaciones superiores al 80%, además presenta un comportamiento muy lineal, ya que se está produciendo a valores de tensión no muy elevados. Por otro la energía específica absorbida por los conglomerados (WA235, WA255 y WA295) y el NC170 es muy similar hasta alcanzar valores cercanos al 70% de deformación.

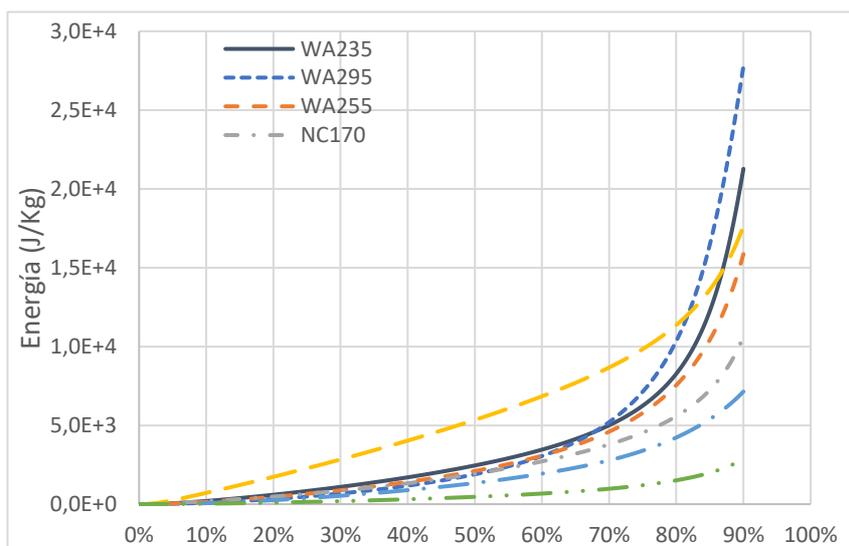


Figura 78. Energía específica absorbida.

### I.6 Eficiencia de los materiales

En este apartado se va a ver como de eficientemente realiza el material la absorción de energía a un valor de tensión determinado. Se va a representar tanto la eficiencia frente a la tensión como al desplazamiento, pues es tan importante saber a qué tensión se produce la eficiencia máxima como la deformación asociada a este.

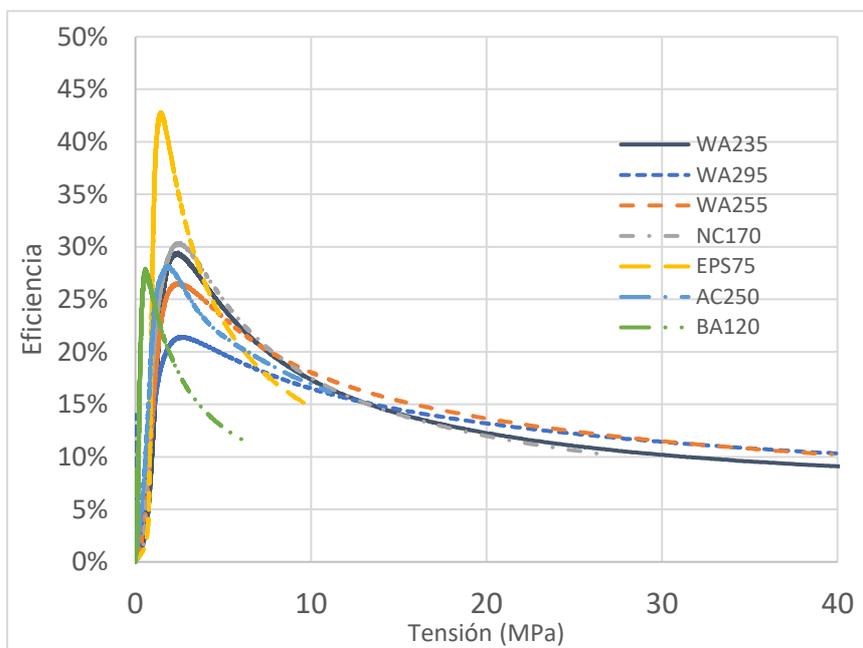


Figura 79. Eficiencia frente a tensión.

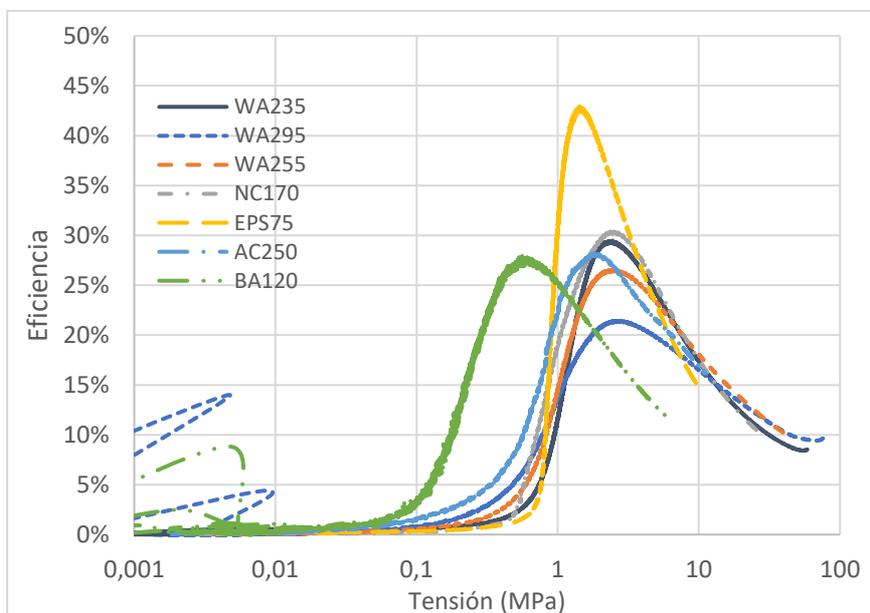


Figura 80. Eficiencia frente a tensión, escala logarítmica.

En las Figura 79y Figura 27 vemos la representación de la eficiencia frente a la tensión en diferentes escalas, esto es así porque el máximo se produce a valores de tensión pequeños en

relación a los valores máximos que se han observado durante el trabajo y no es posible representar de una manera clara los datos sin cortar la gráfica, por ello se emplea la escala logarítmica con el fin de mostrar todo el ensayo.

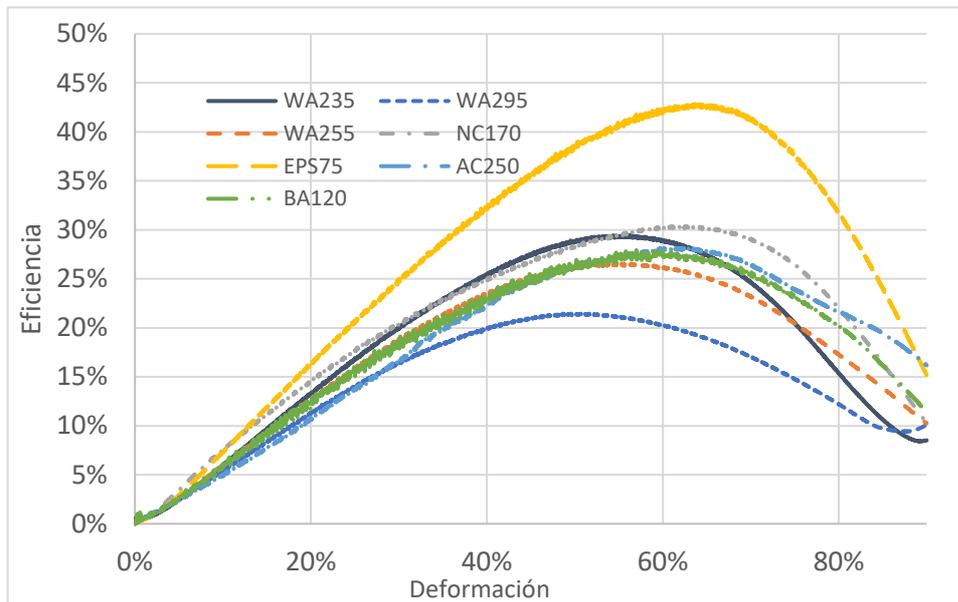


Figura 81. Eficiencia frente a deformación.

El material que realiza la absorción de la energía de forma más eficiente vuelve a ser el EPS75, hay que en el caso del WA295, material que en términos absolutos absorbía más energía aquí presenta el peor valor poniendo en evidencia que esta absorción de energía se realiza durante la densificación debido a los altos valores de tensión que se alcanzan en este material y pone de manifiesto que los valores de energía absorbidos para deformaciones por encima del punto de densificación no son de tanto interés como la absorción que se produce a deformaciones menores.

### I.7 Idealidad de los materiales

Por último, se va a estudiar la idealidad, el concepto es similar al de la eficiencia visto en el apartado anterior, pero aquí se va a comparar el material ensayado con un material que se comportaría de forma ideal, es decir que absorbería la energía a tensión constante y la densificación se produciría a deformación constante, es decir que el área bajo la curva tensión- deformación sería un rectángulo. Se podría establecer una analogía entre este concepto y el concepto “Load factor” empleado en el ámbito de la ingeniería eléctrica.

$$\frac{\text{Energía}}{\text{Energía máxima}} \text{ vs } \frac{\text{Demanda eléctrica}}{\text{Demanda eléctrica máxima}}$$

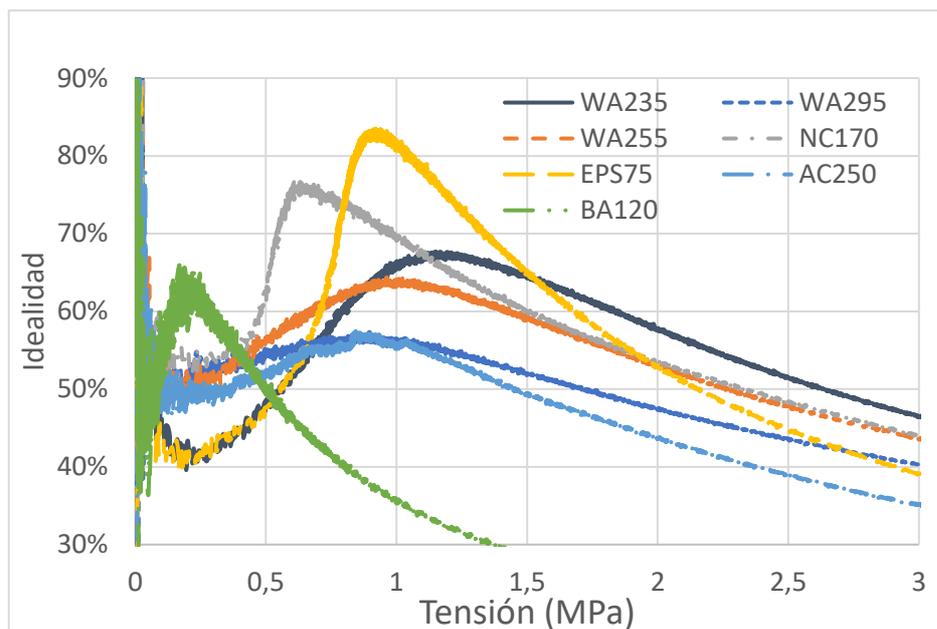


Figura 82 Idealidad frente a tensión

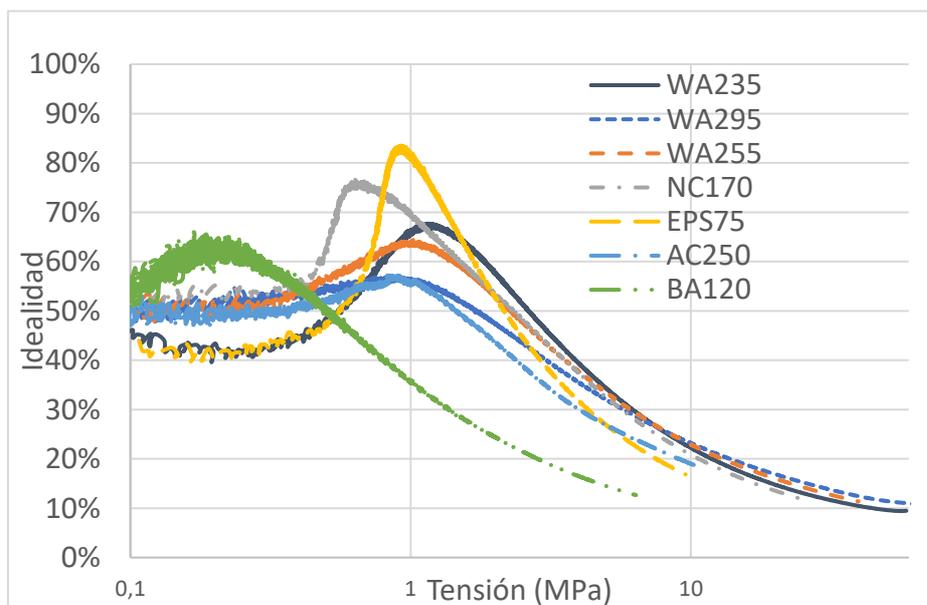


Figura 83. Idealidad frente a tensión con escala logarítmica

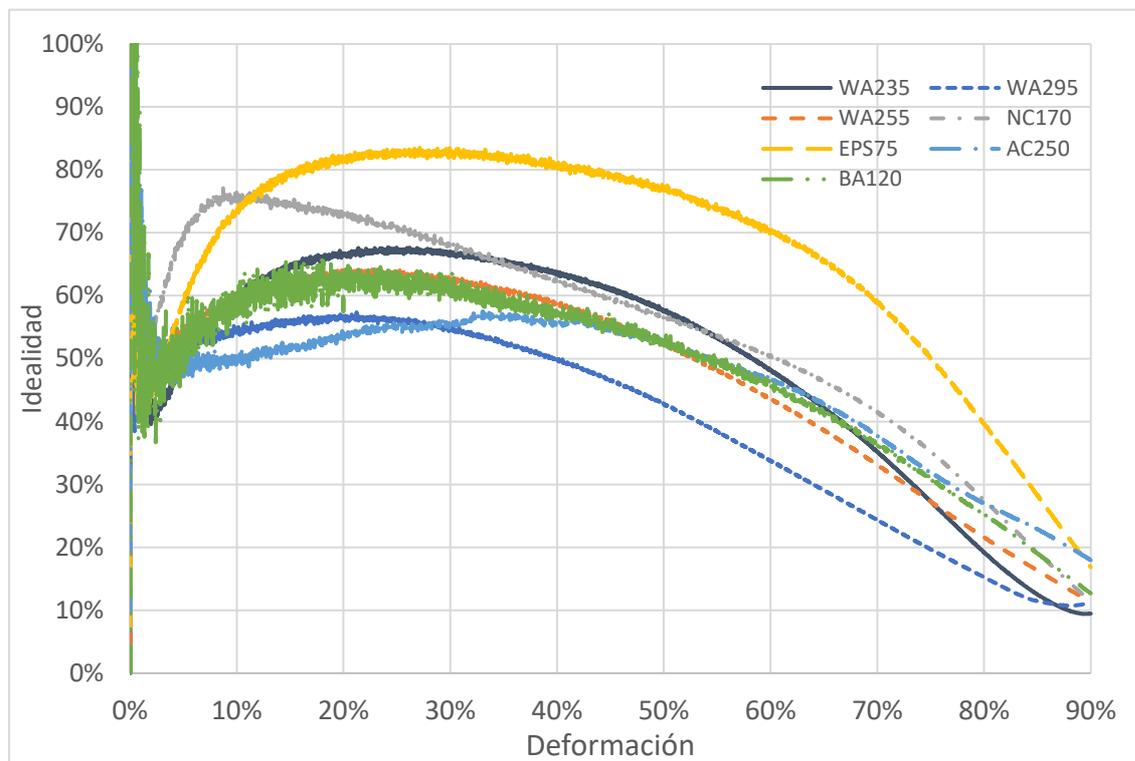


Figura 84. Idealidad frente a deformación

Lo que se observa en estas gráficas es como una vez más el EPS75 presenta los valores máximos, no obstante, tanto para este como para el resto de los materiales los máximos se producen a valores de tensión muy bajos, menores de 1Mpa, y a deformaciones menores de un 30% a excepción del EPS75 que se mantiene en valores cercanos al máximo hasta superar este 30%. Si bien el comportamiento general de los corchos no es bueno el NC170 alcanza un valor próximo al 75% nada despreciable, alcanzando este valor máximo en una zona próxima a su límite elástico (8% de deformación frente al 6% de deformación en el que se estableció el límite elástico para este material)

### I.8 Conclusiones caracterización de los materiales.

En este estudio de caracterización se ha visto como el material EPS75 presenta las mejores propiedades mecánicas, si bien en algunos aspectos otros materiales se han acercado a sus características, la realidad es que la reducida densidad del EPS75, en combinación con los buenos resultados obtenidos en absorción de energía y en la eficiencia con la que absorbe la energía lo hacen sobresalir sobre el resto. Hay que destacar su elevado módulo de Young (en términos relativos al resto de materiales) y reducido modulo en la platea, haciendo que sea un material capaz de absorber mucha energía, pero sin producir tensiones elevadas.

Si bien los resultados obtenidos por el EPS75 son sobresalientes, los resultados obtenidos con otros materiales como los conglomerados de corcho WA235, WA255, WA295 y el NC170 no son despreciables, o malos. Si bien es cierto que no alcanzan al EPS75, los valores de absorción de energía del WA235, WA255 y WA295 son muy cercanos y en algunos casos superiores al EPS75, es cierto que esta absorción de energía en términos específicos es considerablemente

menor. En términos de eficiencia son todos inferiores, al igual que en idealidad. El NC170, es el material, aparte del EPS75, que mayores valores de eficiencia e idealidad alcanza durante el ensayo. Se ve como el triturar el corcho para producir conglomerados, reduce algunas de las características mecánicas del material natural, aunque estos conglomerados (WA235, WA255 y WA295) absorben algo más de energía lo hacen de una forma menos eficiente. Sería interesante analizar el comportamiento de estos materiales conglomerados frente al comportamiento del corcho sometido a compresión de forma no radial. Presumiblemente por los estudios realizados [14], el comportamiento de los conglomerados de corchos conglomerados (WA235, WA255 y WA295) ante una carga de compresión en otra dirección será muy similar a los resultados obtenidos, al tratarse de un material con una estructura (idealmente) homogénea y por tanto mecánicamente isótropo, mientras que el corcho no lo es y posiblemente los resultados del ensayo a compresión en la dirección tangencial del NC170 dará peores resultados tal y como apuntan L. Gibson y M. Ashby en su obra.

También se observa que el aumento de densidad en los conglomerados se traduce en una reducción de la eficiencia e idealidad de estos materiales, aunque a valores de deformación mayores del 70% también se traduce en una mayor energía total absorbida. Hay que tener cuidado con esto ya que a mayor densidad del conglomerado vemos como el inicio de la densificación se produce antes, a menores valores de deformación.

Los materiales AC250 y BA120 han sido los que han presentado las peores propiedades mecánicas en especial el BA120.

## J Anexo: Cálculo de los parámetros: módulo de Young, módulo de platea y tensiones del límite elástico y de inicio de la densificación.

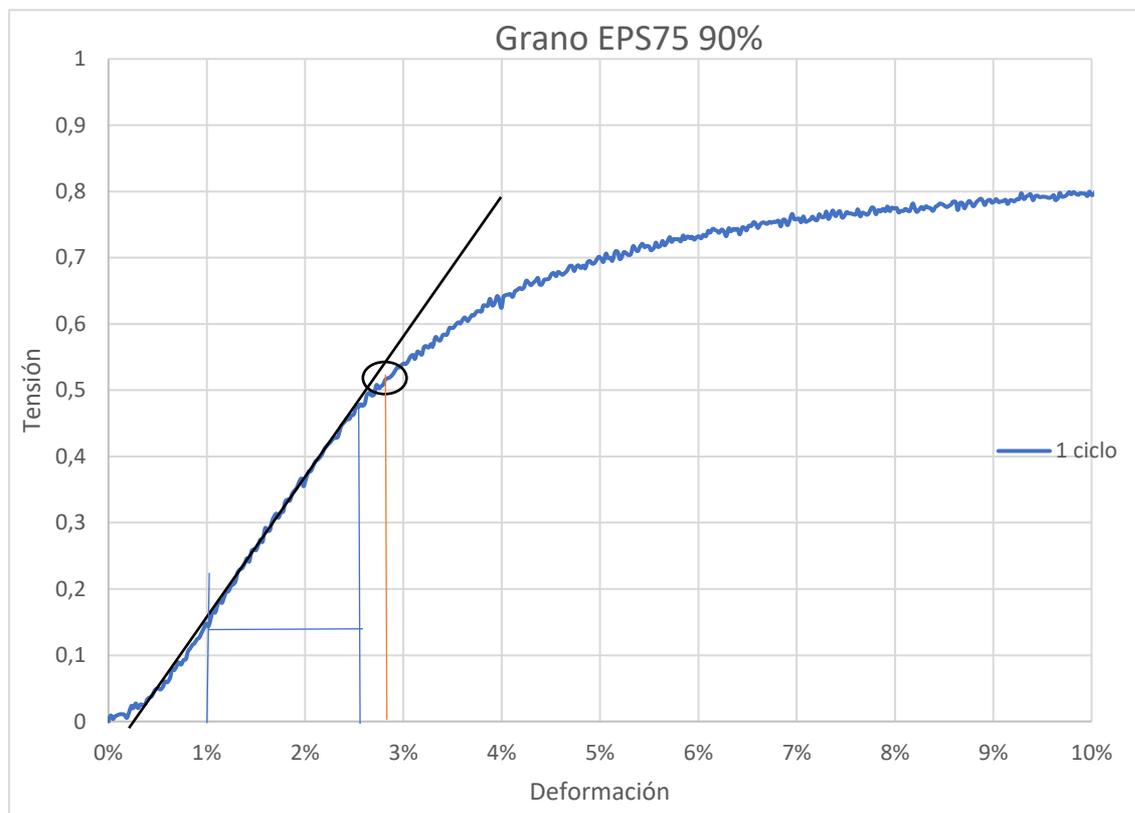


Figura 85. Cálculo del módulo de Young, y límite elástico

En la figura vemos la curva tensión deformación correspondiente al primer ciclo de carga durante el ensayo a 90% de deformación del material EPS75, en esta figura se ilustra el método que se ha seguido para determinar la región elástica.

Gráficamente vemos entre que valores de deformación, la curva del ensayo se puede aproximar por una recta, empleando los datos del ensayo contenidos en la Excel calculamos la pendiente de la curva definida entre esos valores de deformación estableciendo así el módulo elástico. El límite elástico lo establecemos en el punto en el que la recta tangente se separa de la curva. Como se puede observar es un método muy aproximado, pero nos permite aplicarlo de forma coherente en todos los materiales.

El cálculo del módulo de la platea es análogo, se ve en la siguiente figura.

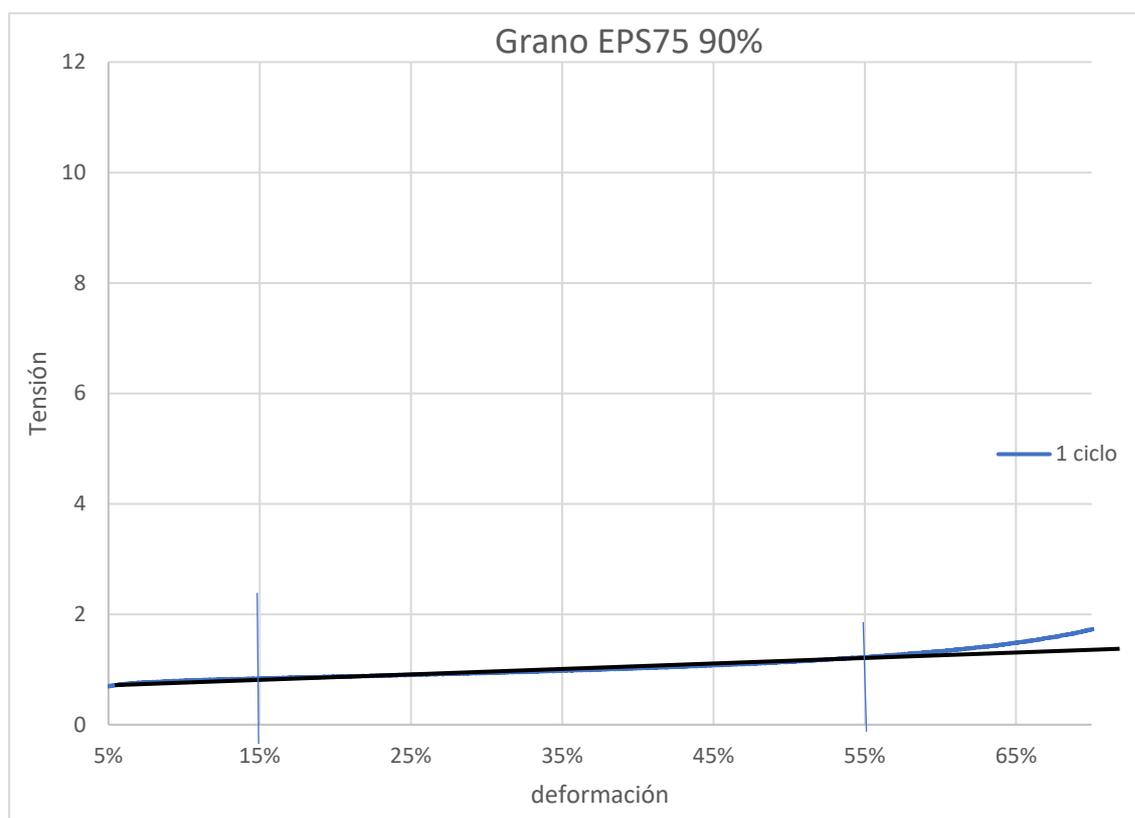


Figura 86. Cálculo del módulo de la platea.

Para calcular la **tensión de densificación** se toma el valor de la tensión para el que se hace máximo la eficiencia. Si recordamos que es la eficiencia “la eficiencia es el resultado de dividir la energía por el valor de tensión en un instante concreto” es lógico que en el punto en el que se alcanza el máximo y la curva empieza a decrecer, se está produciendo una aceleración en el aumento de la tensión, y la densificación del material.

## K Anexo Gom Correlate y módulo de Poisson.

Uno de los objetivos de este trabajo era medir la deformación transversal que se producía en las probetas durante los ensayos a compresión de estas. Con este valor y conociendo la deformación en la dirección del ensayo se podía calcular el módulo de Poisson de cada material ensayado. El objetivo era ver si en los materiales conglomerados se mantenía, al igual que en el corcho, un módulo de Poisson de cero. No obstante, como se va a ver en este anexo no se ha podido llegar a tal conclusión pues el método empleado para determinar la deformación transversal, en unos casos no ha podido proporcionar resultados y en otros no lo ha hecho con una precisión suficiente.

El programa Gom Correlate, como se explica en el Anexo 12, emplea la evolución de la posición relativa de los puntos de un patrón estocástico (previamente realizado en la probeta), para determinar la deformación que sufre el elemento de estudio. Pero para que esto sea posible, el programa tiene que ser capaz de seguir en cada instante la posición de estos patrones y como varía la forma.

Se decidió tomar fotos cada 20 segundo durante los ensayos de compresión, en total unas 20 fotos de media para cada material. Cuando se introducen en el programa, si bien se puede realizar el mallado (porque la calidad del patrón es suficientemente buena) el programa no es capaz en la mayoría de los casos, de seguir la evolución de la deformación. Esto se puede producir por varios motivos, el número de fotos ha sido demasiado bajo, el patrón no es suficientemente bueno, o que el programa no tiene potencia suficiente.

Esto tiene unas consecuencias directas, pues si no sigue la evolución de los patrones, el programa no puede dar resultados en esas regiones. Ha sucedido esto para todos los materiales a excepción del WA295. Se pone como ejemplo los resultados obtenidos para el EPS75 e ilustrar así el problema.

Las imágenes se corresponden a una deformación del 0 al 30%  $\epsilon_y$  (en dirección de la fuerza de compresión), como se ver en la Figura 87 y Figura 88 estos resultados no aportan ningún tipo de información. Como se ha indicado antes, si bien para la mayoría de los materiales no ha sido posible obtener resultados, si lo ha sido para el caso de WA295.

Caso EPS75

Evolución de los resultados de deformación obtenidos con el programa Gom Correlate

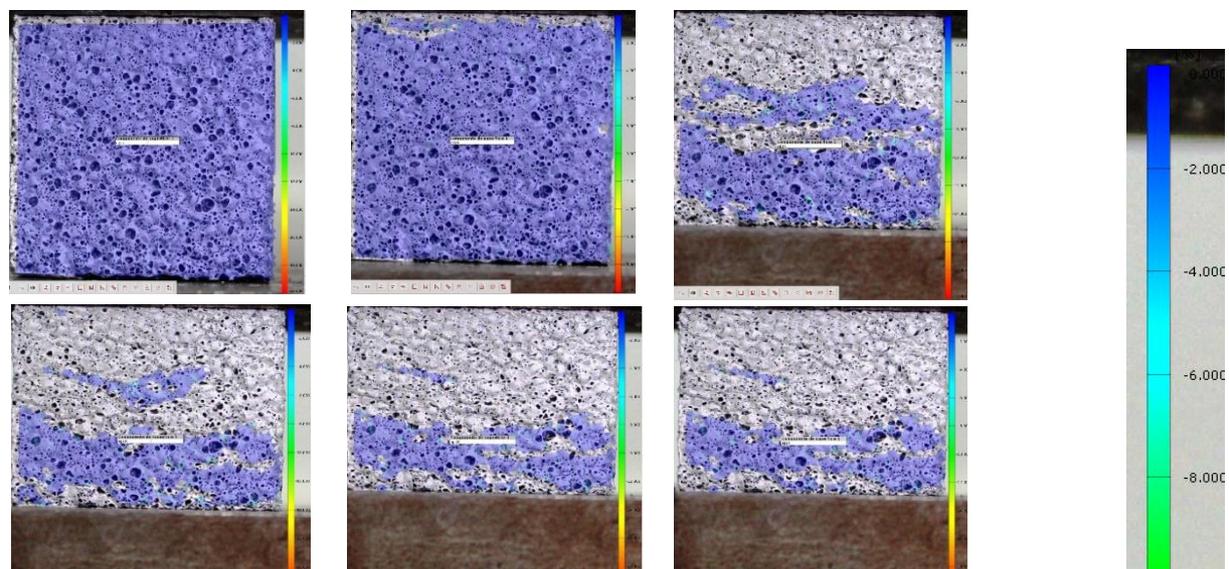


Figura 87, Deformación en la dirección transversal a la dirección del ensayo.

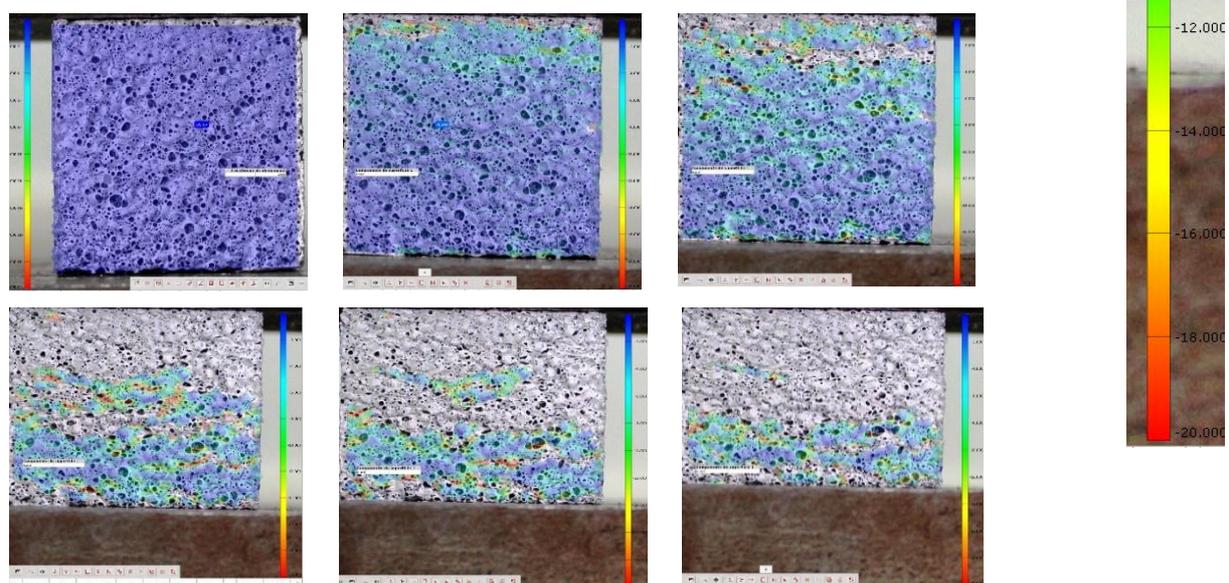


Figura 88, deformación en la dirección longitudinal a la dirección del ensayo.

Caso WA295.

En las imágenes siguientes se ve en la columna de la izquierda los valores de deformación transversal, y en la derecha los valores de deformación en la dirección de la compresión.

Se han representado la variación de estos valores en una gráfica y se han descartado aquellos que presentaban valores anormalmente altos, o con variaciones que pongan en duda su validez, obteniendo la siguiente figura:

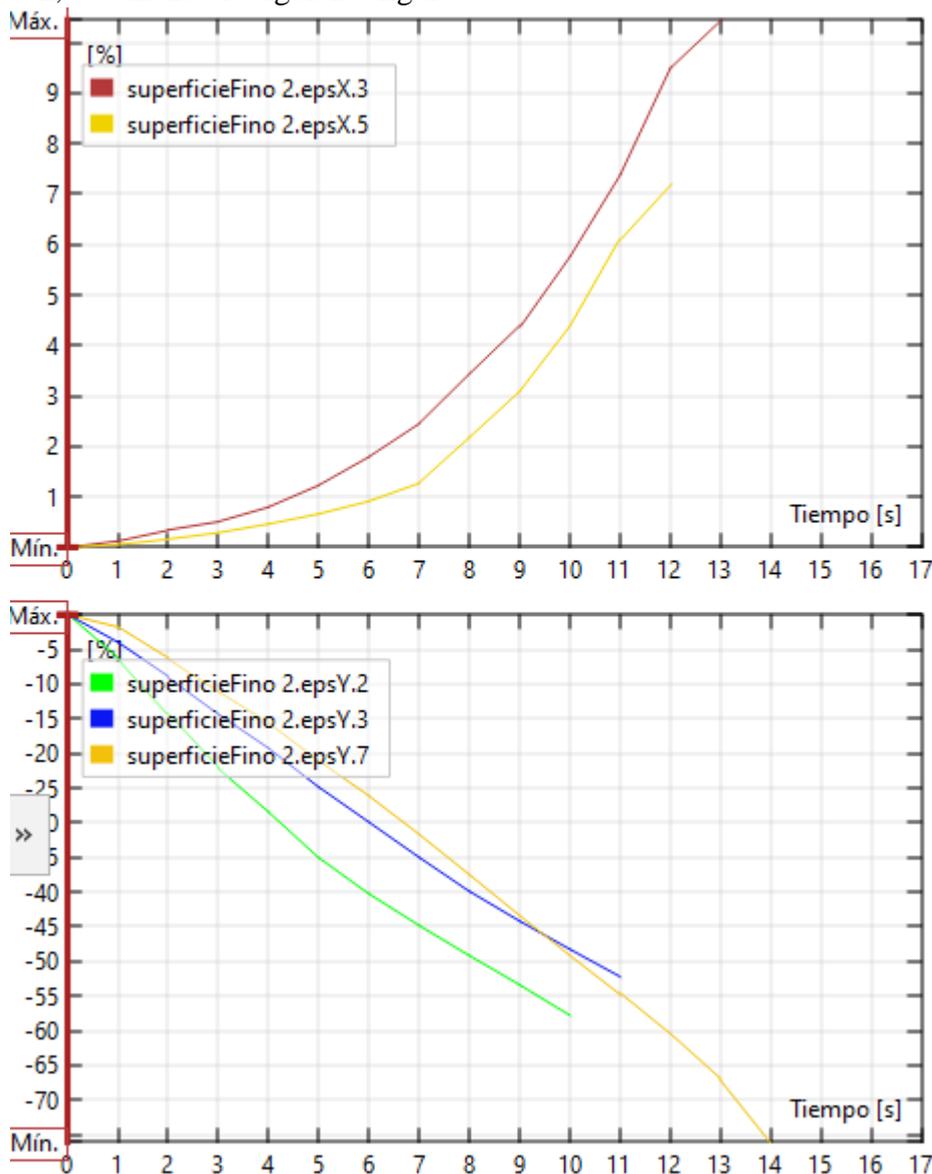


Figura89

Exportando estos datos con extensión .csv a una Excel y modificando adecuadamente los datos, podemos calcular la evolución del módulo de Poisson para el conglomerado de corcho WA295, aprovechando el tiempo del cronómetro podemos también ver que deformación real se produce y compararla con el valor obtenido por el GOM Correlate. Estos cálculos aparecen reflejados en la tabla.

Tabla 18

Tiempo	Poisson	Def y (GOM)	Def y (real)	Error
0'0''		0,000	0,000	0%
0'24''	0,031	-1,789	-1,897	6%
0'49''	0,025	-6,280	-7,960	21%
1'13''	0,026	-10,974	-13,770	20%
1'35''	0,030	-15,487	-19,118	19%
2'01''	0,031	-20,956	-25,347	17%
2'25''	0,035	-26,015	-33,670	23%
2'49''	0,040	-31,561	-37,020	15%
3'13''	0,058	-37,365	-43,168	13%
3'37''	0,071	-43,272	-48,885	11%
4'01''	0,089	-49,032	-54,560	10%
4'25''	0,112	-54,668	-60,360	9%
4'48''	0,119	-60,537	-66,180	9%

Como se puede intuir con las gráficas o los valores de las imágenes, (Figura 90, Figura 91 e Figura 92, en las cuales, la columna de imágenes de la izquierda, representa la variación de la deformación en la dirección perpendicular a la dirección del ensayo y la de la derecha a la deformación en la dirección del ensayo) el valor del módulo de Poisson es pequeño, en especial durante la primera parte del ensayo, es decir, durante la fase de deformación elástica y de deformación en la zona de la platea. El problema viene cuando comparamos los valores obtenidos de deformación en la dirección de compresión con la deformación obtenida por el software de la INSTRON.

Lo que vemos es que se produce un error elevado tanto con los valores promedio de las curvas, (los representados en la tabla) como con los valores de cualquiera de las curvas que nos da el software. Para el caso de los valores promedios vemos que hay errores de hasta el 21%. Si bien es cierto que el programa tiene una opción de calcular la variación de la longitud de una línea establecida, solo está disponible en la versión de pago.

Ante estos resultados no se pueden asegurar un valor de Poisson correcto, y simplemente nos da una idea de la magnitud del valor.

El software y método empleado no ha sido el apropiado para alcanzar el objetivo planteado. Para futuros análisis el empleo de galgas extensiométricas sería una opción mucho más precisa y práctica.

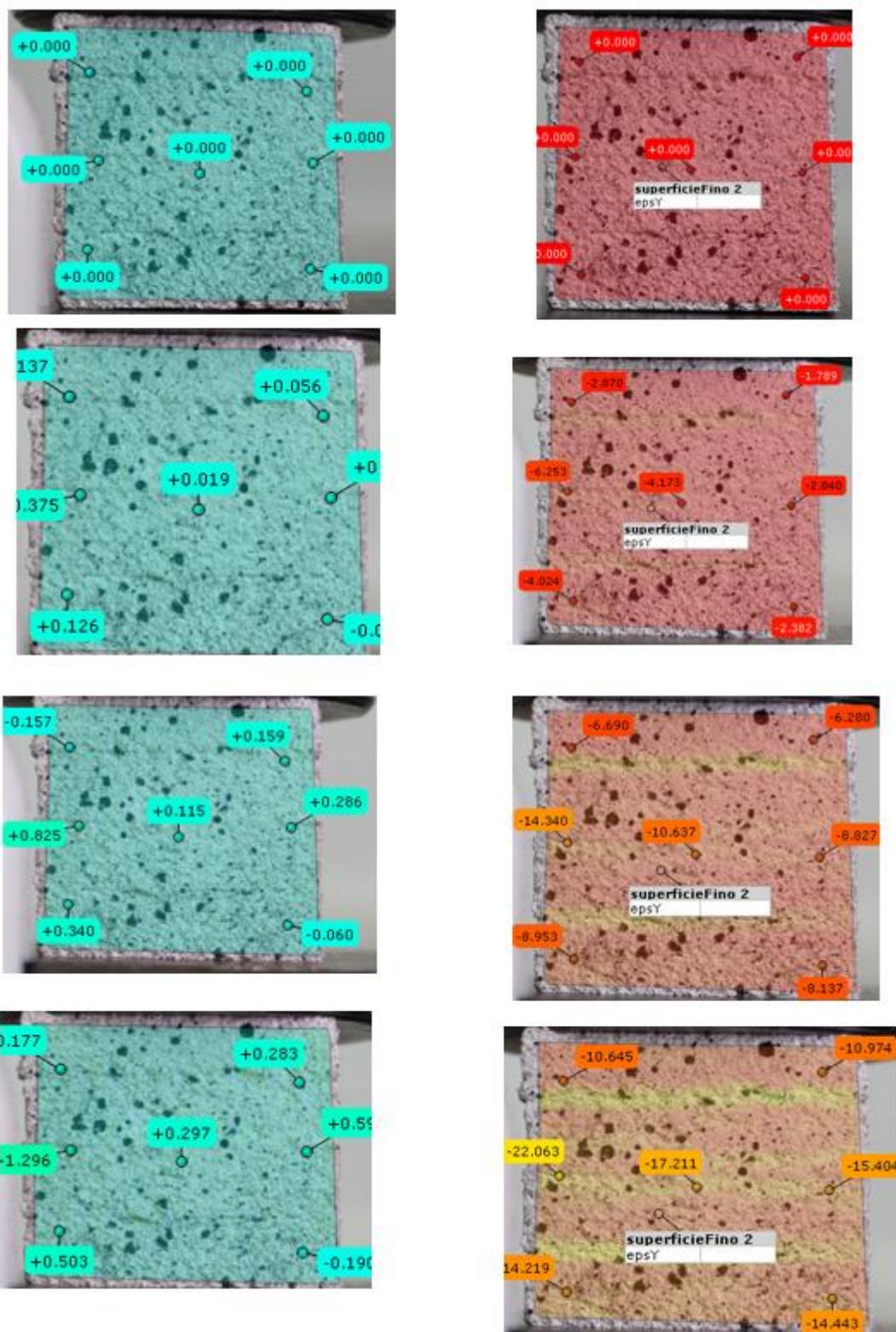


Figura 90

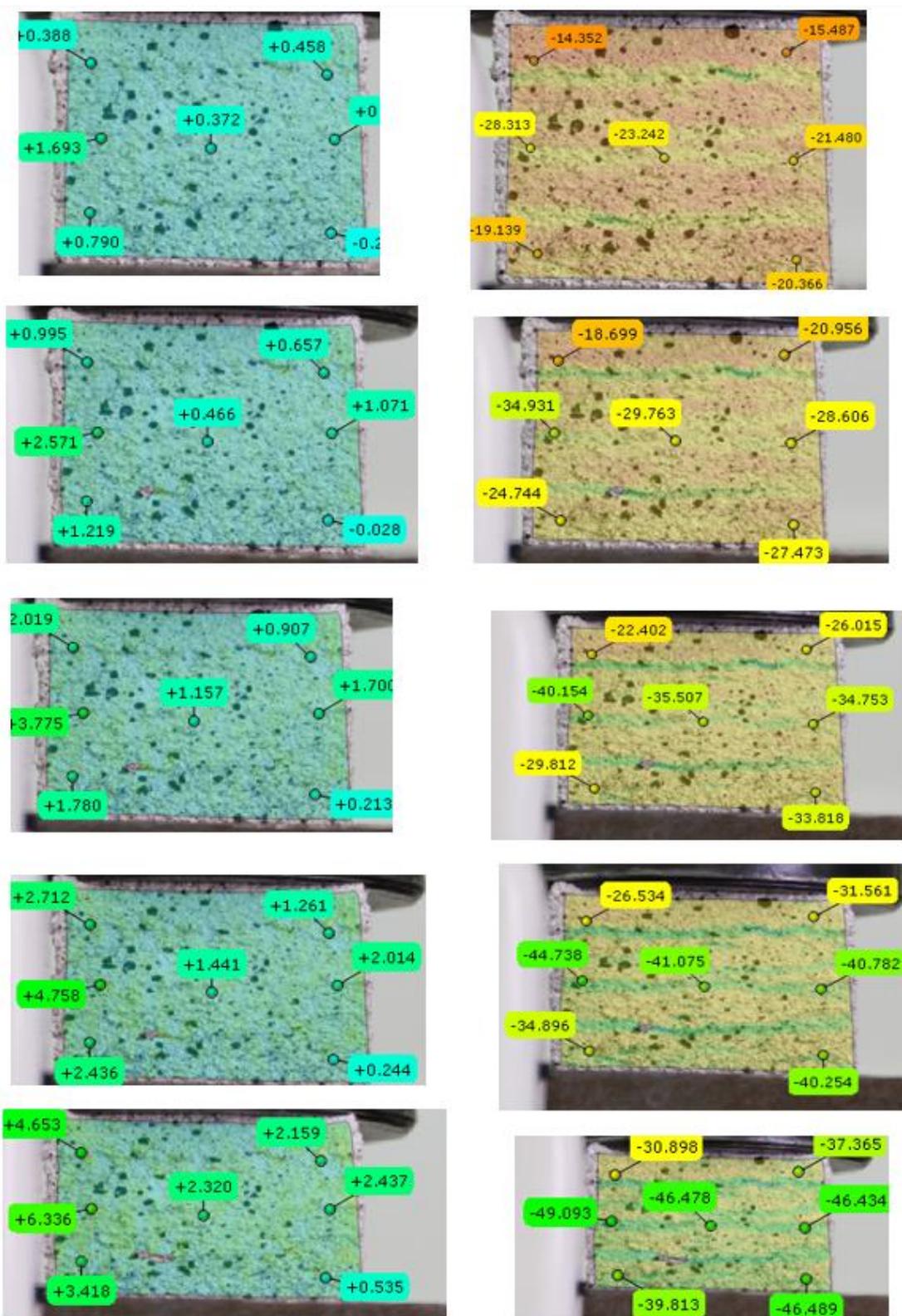


Figura 91

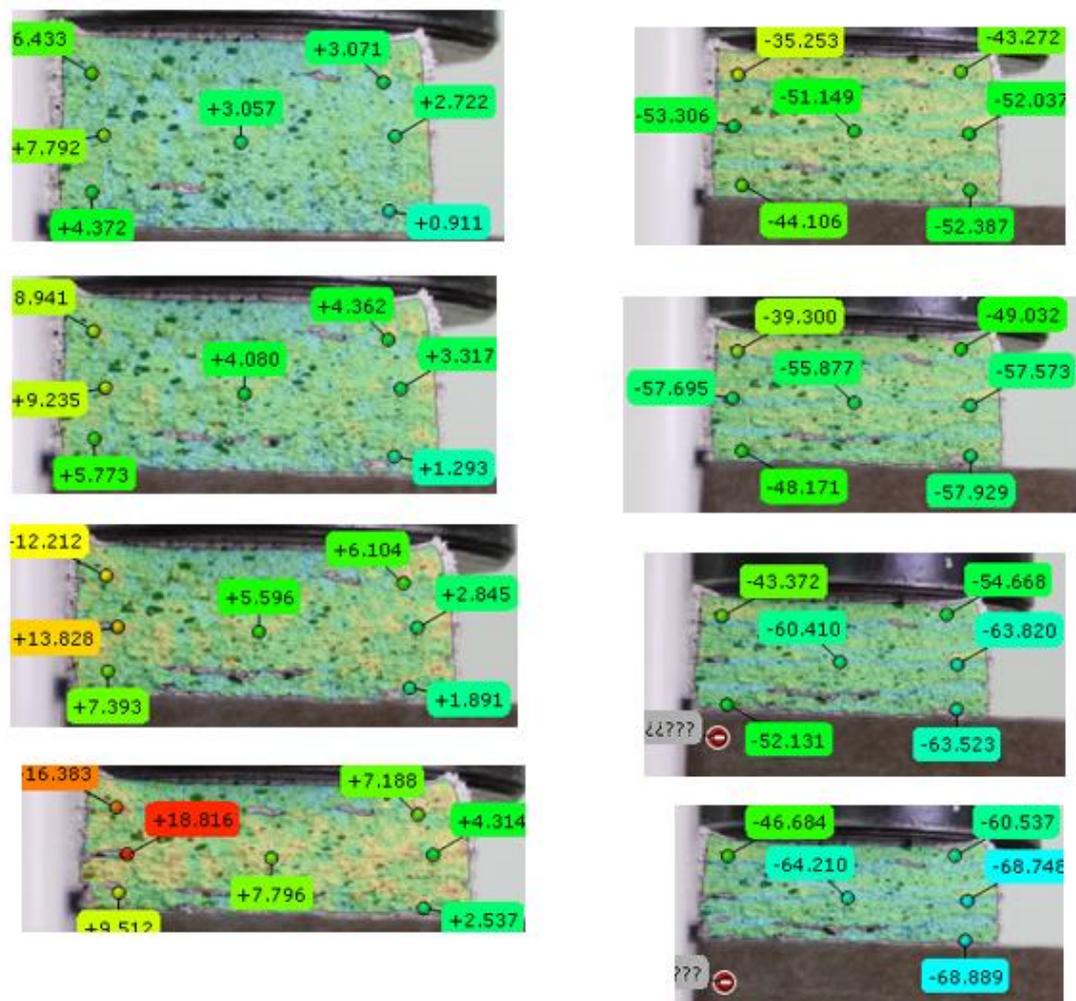


Figura 92

## L Anexo Manual GOM Correlate

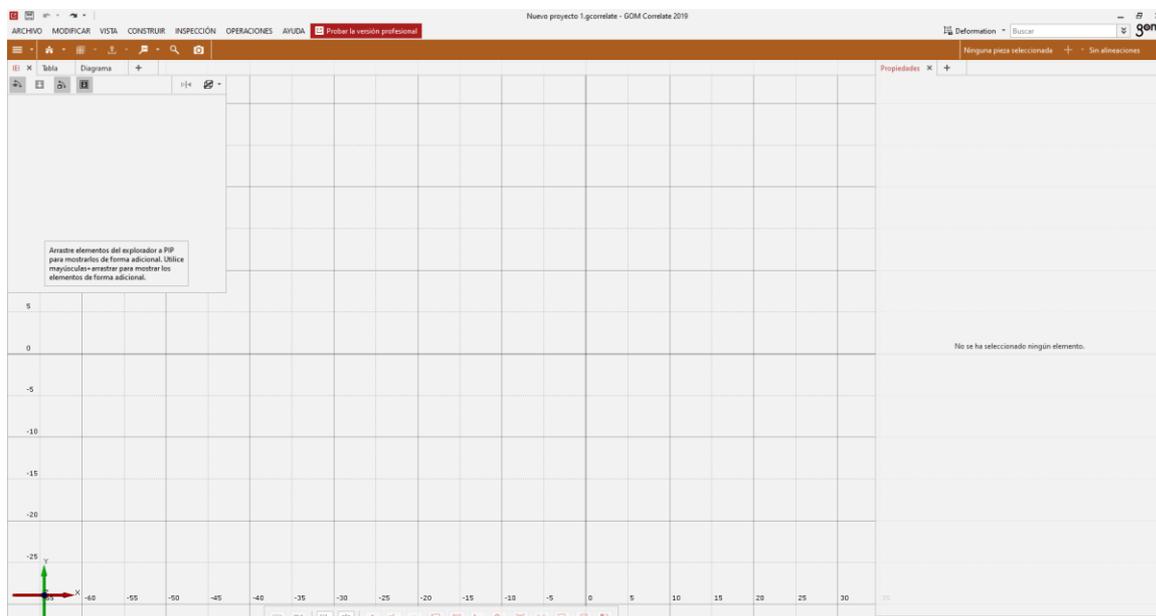


Figura 93

Al abrir el programa y elegir un nuevo proyecto nos encontraremos esta ventana. En el recuadro de arriba a la derecha, siguiendo las instrucciones ahí descritas, seleccionaremos las fotos de la carpeta/directorio/dispositivo donde las tengamos almacenadas y las arrastraremos hasta ahí. Para realizar la selección podemos usar el control y el clic-izquierdo del ratón. Manteniendo el control botón control apretado y clicando una a una en las imágenes, después pulsando en una imagen y manteniendo pulsado (ya sin apretar la tecla control) seleccionaremos todo el grupo, y podremos moverlo al programa. Otra opción es hacer clic-izquierdo y extender el recuadro de selección sobre todos los elementos

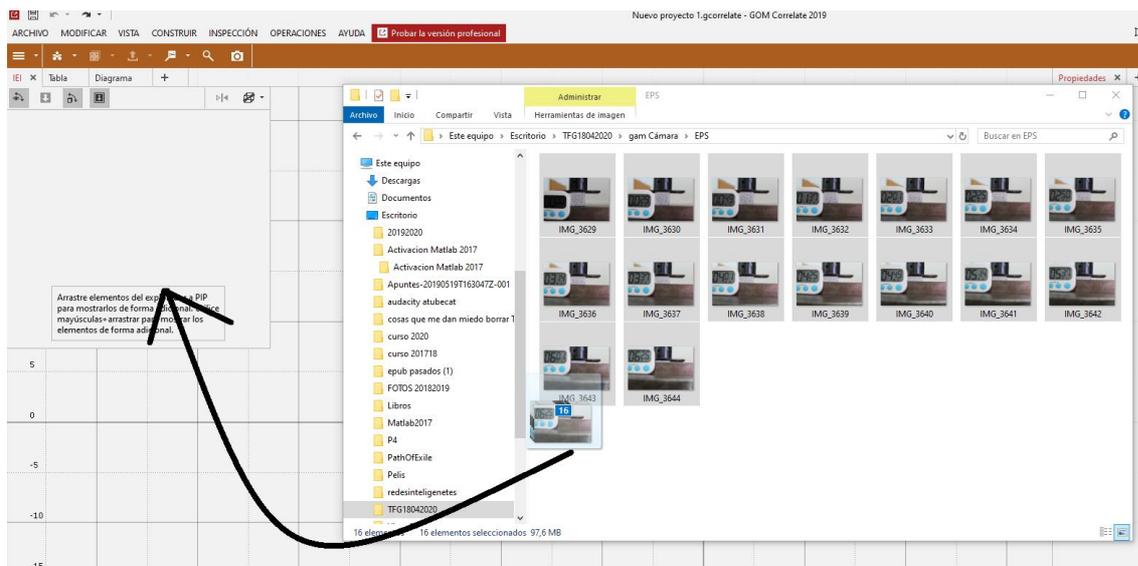


Figura 94

Cuando hayamos llevado las imágenes sobre el cuadro y soltemos el clic-derecho nos aparecerán dos opciones, “Imagen de deformación” e “Imagen de informe”. Nosotros seleccionaremos la primera, “Imagen de deformación”.

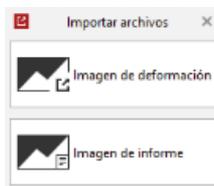


Figura 95

Veremos como cambia la pantalla, apareciendo en la imagen central nuestra foto, esta pantalla contendrá distintos elementos y partes que vamos a revisar a continuación.



Figura 96

- 1- Escala. Nos permite seleccionar la escalá, aunque el objetivo es obtener  $e_x$  y  $e_y$ , los cuales son valores adimensionales y que se corresponden con la variación de la longitud respecto de la longitud inicial, será necesario incluirla para que el programa nos permita obtener los parámetros.
- 2- Definir componente. Esta opción nos permite seleccionar la superficie de estudio, como se ve en la pantalla el programa detecta todo y queremos que unicamente escoja la pieza que tiene el patrón.
- 3- Barra de herramientas. Esta barra irá variando en función de la operación a realizar, o en el menu que estemos.
- 4- Línea de evolución. Aquí aparecen las distintas fotos que hemos tomado como si de fotogramas de una película se tratase, desplazarnos por esta herramineta haciendo clic-derecho sobre cualquier punto de su longitud nos permite avanzar o retroceder en las imágenes del ensayo, y por consiguiente en los diferentes estados de deformación.
- 5- Sistema de referencia. Nos mostrará el sistema de referencia empleado, y nos permitira girar la imagen.

Establecer escala.

Lo primero será introducir la escala de la imagen, esto se realizará en el menu que aparece al hacer clic-izquierdo en el icono escala (1), se abrirá una pantalla.

Vemos como aparece remarcado el “Punto1” por defecto, para introducirle tanto el punto 1 como 2, pulsaremos en nuestra imagen dos puntos cualesquiera con el clic-izquierdo manteniendo pulsado la tecla control en todo momento, estos puntos tienen que tener una distancia conocida en la realidad. En nuestro caso seleccionaremos las aristas de la probeta, ya que sabemos que miden 50mm.

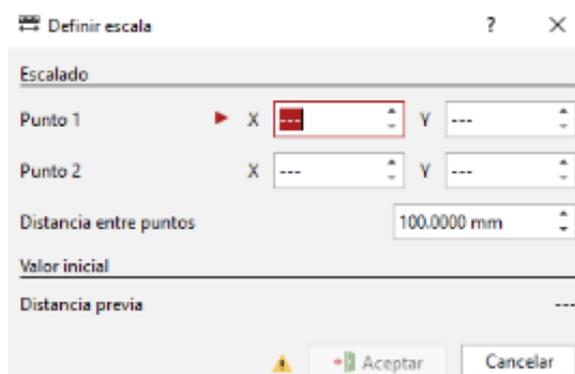


Figura 97

Y en el cuadro distancia entre puntos escribiremos la escala, 50mm en este caso.

Con esto quedará definida la escala de los elementos de la imagen. Y podremos proseguir con la selección de la superficie de estudio.

Selección de la superficie de estudio y evaluación de la calidad del patrón

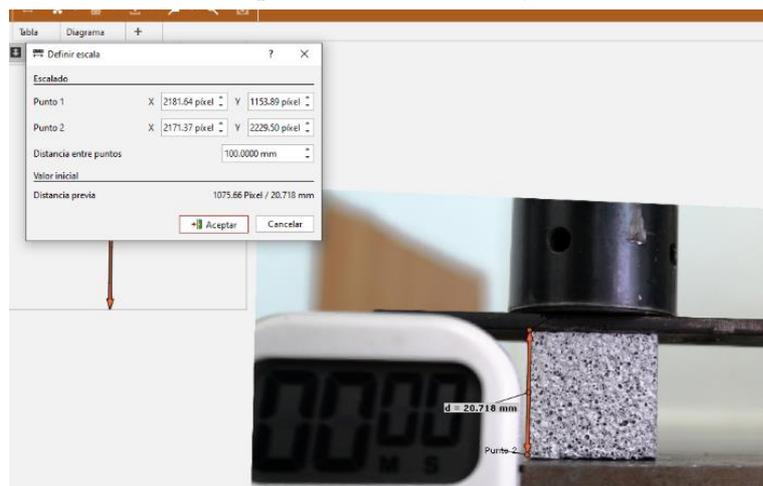


Figura 98

Este programa emplea imágenes con elementos que pueda emplear como puntos de referencia y hacer un traquin de estos elementos para ser capaz de ver como se desplazan, a mas densidad de estos aprones, mejor será la precisión.

Se recomienda patrones esféricos de tamaños pequeños y mas o menos constantes con una alta densidad.

No obstante cuando subimos las imágenes, solo una parte de la imagen se corresponde al patrón y hemos de indicarle donde mirar. Para ello haremos clic-izquierdo en el botón (2) “Definir componente” y despues en “Componente de superficie”. Se desplegará una ventana y veremos como los iconos de la barra de herramienta se han modificado.

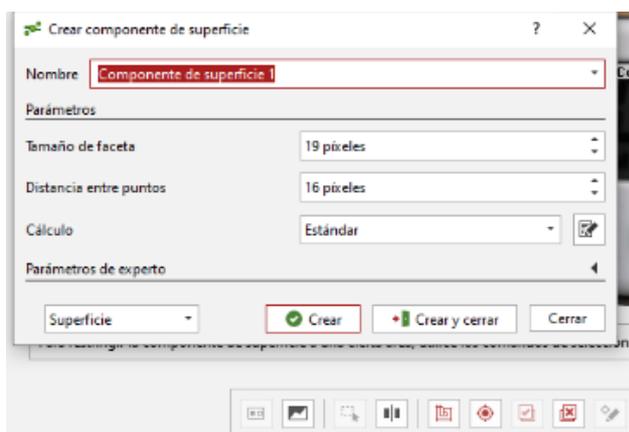


Figura 99

Abajo a la derecha, tendremos un desplegable en el que nos aparecerá la opción de calidad del patrón, la cual seleccionaremos. Al seleccionarla veremos como la imagen cambia, y aparece regiones sombreadas en distintos tonos, según la leyenda de la derecha como vemos en la leyenda de la derecha. Pero se ve como la superficie se extiende mas haya de lo que sería la probeta y eso es lo primero que hay que corregir, para ello emplearemos las opciones de la barra

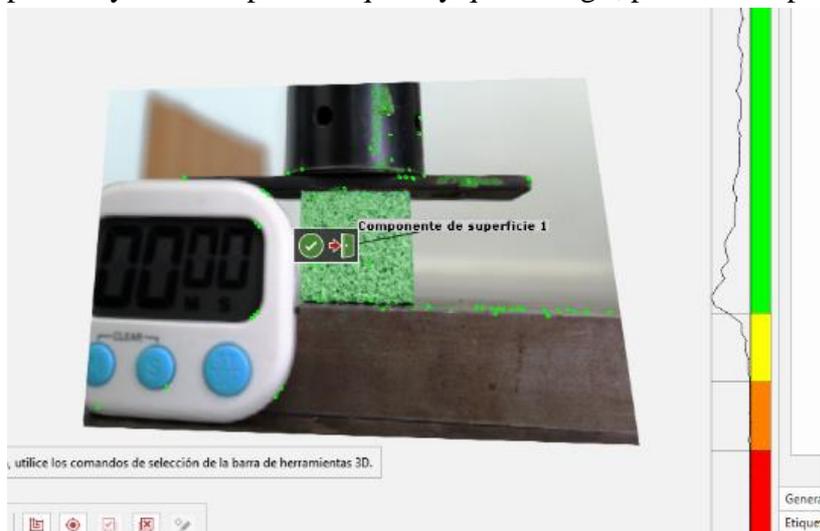


Figura 100

de herramientas (3). Con el botón 3.1 podemos definir una superficie, y con el botón 3.2 se puede eliminar todo el patrón.



Figura 101

Para seleccionar la superficie de estudio haremos primero clic-izquierdo sobre el icono 3.2 para eliminar la selección automática que ya había, después haremos clic-izquierdo sobre el icono 3.1 y pulsaremos sobre las aristas de nuestra figura, una vez esta esté sombreada en verde, haremos clic derecho y sin levantar el botón desplazaremos el ratón hasta el símbolo de “+” y cuando este iluminado, en verde, soltaremos. En este momento podremos volver a la ventana y cambiar si queremos el nombre, después le daremos a crear y cerrar.

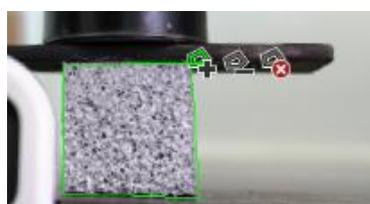


Figura 102

Nos aparecerá sobre la imagen un recuadro en el que aparece escrito “Componente de superficie1”, ahora ya podremos pedir al programa que nos calcule los parámetros que buscamos.

Cálculo de  $e_x$  y  $e_y$ .

Haremos clic en el icono “Comprobación de todos los elementos visibles reales” (6) y aparecerán una serie de opciones, seleccionaremos la de  $e_x$  y  $e_y$  según lo que queramos obtener. Vamos a ver el caso de  $e_x$ , pero el de  $e_y$  sería análogo.



Figura 103

Al seleccionar la opción  $e_x$  se aparecerá una ventana y la superficie que habíamos seleccionado en verde aparecerá en azul. Pulsaremos en aceptar y esperaremos que se procese el cálculo. Ahora clicando en la “Línea de evolución” (4) veremos como para las distintas imágenes va variando el color, y la leyenda. Esto se debe a que en un primer momento establece los valores

de deformación respecto a el estado anterior variando constantemente el rango de la leyenda. Para evitar esto basta con fijarlo.

Para fijar el rango de la leyenda pulsaremos sobre el valor del extremo e introduciremos el valor máximo con signo según se corresponda al sistema de referencia definido.

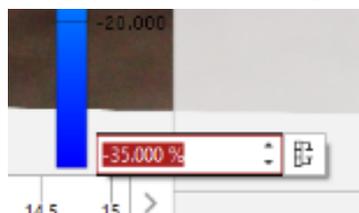


Figura 104

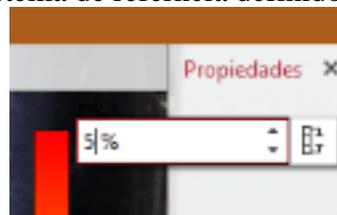


Figura 105

Ahora ya podremos movernos por la “Línea de evolución” (4) y ver como varia.

Si queremos ver valores de puntos concretos podemos poner etiquetas haciendo clic-izquierdo en el icono (7) y después en “Etiquetas de desviación”. Siguiendo las instrucciones que nos aparecen en la ventana emergente y clicando sobre los lugares donde queremos establecerlas, contaremos con los valores concretos para la realización del informe posterior.

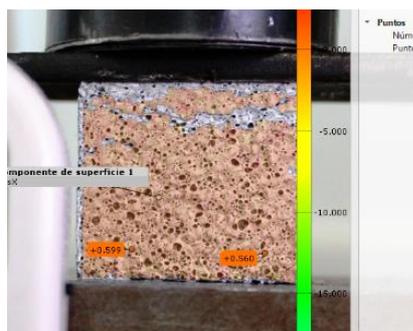


Figura 106

Modificación del sistema de referencia empleado.

Si queremos modificar el sistema de referencia, podremos hacerlo clicando en la esquina superior derecha de la pantalla donde aparece “Alineación original – Pieza”, clicaremos en el simbolo de suma. Seleccionando la opción de “3-2-1”.

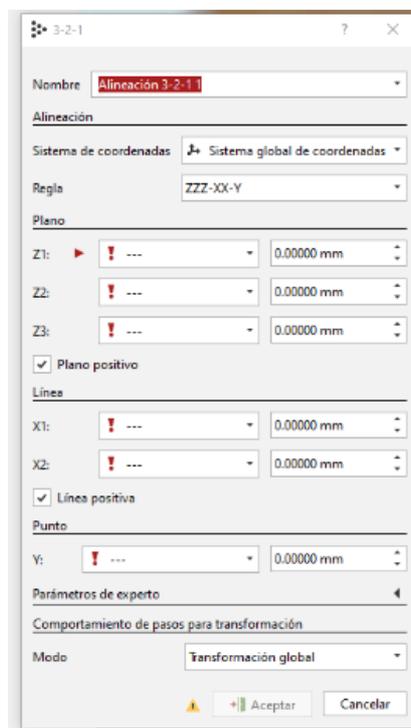


Figura 107

Se desplegará una ventana, con regla podremos cambiar la orientación del SR, para ello solo tendremos que tener en cuenta que nuestra superficie, la que vemos en la imagen y sobre la que operamos se corresponderá a la superficie cuya normal será el eje que definiremos con tres puntos, en el caso del ejemplo el Z.

Haciendo clic-derecho mientras mantenemos el control pulsado iremos estableciendo los puntos en nuestra superficie según salen en el menú.

## M Anexo Resultados ciclos de compresión.

M.1 WA295

M.1.1 Ensayos al 90%

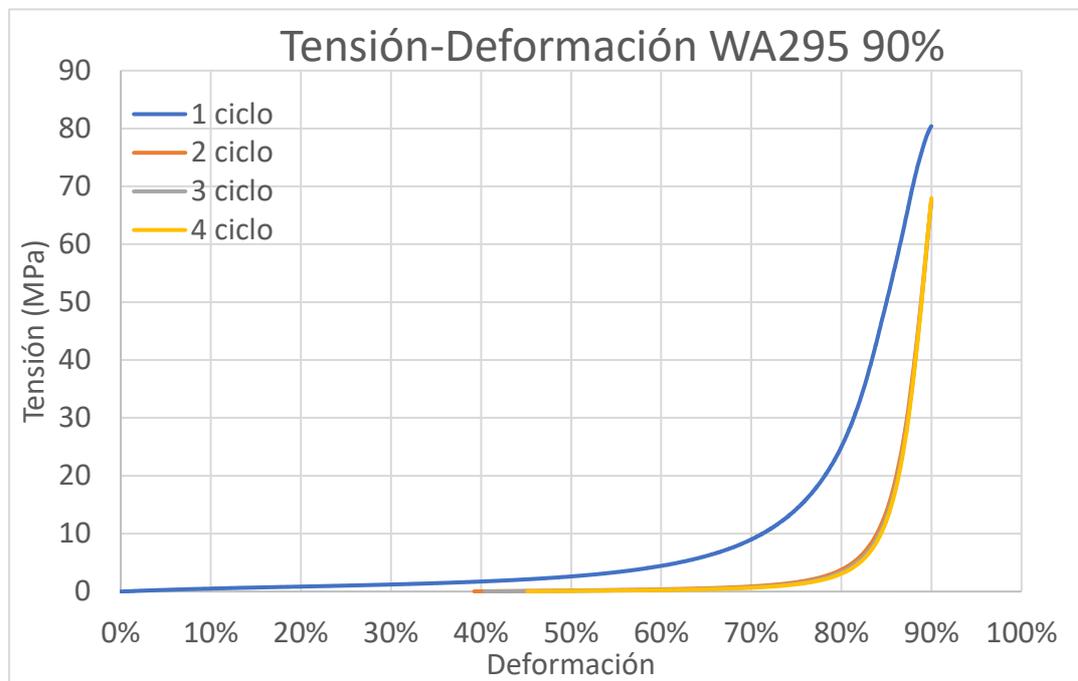


Figura 108

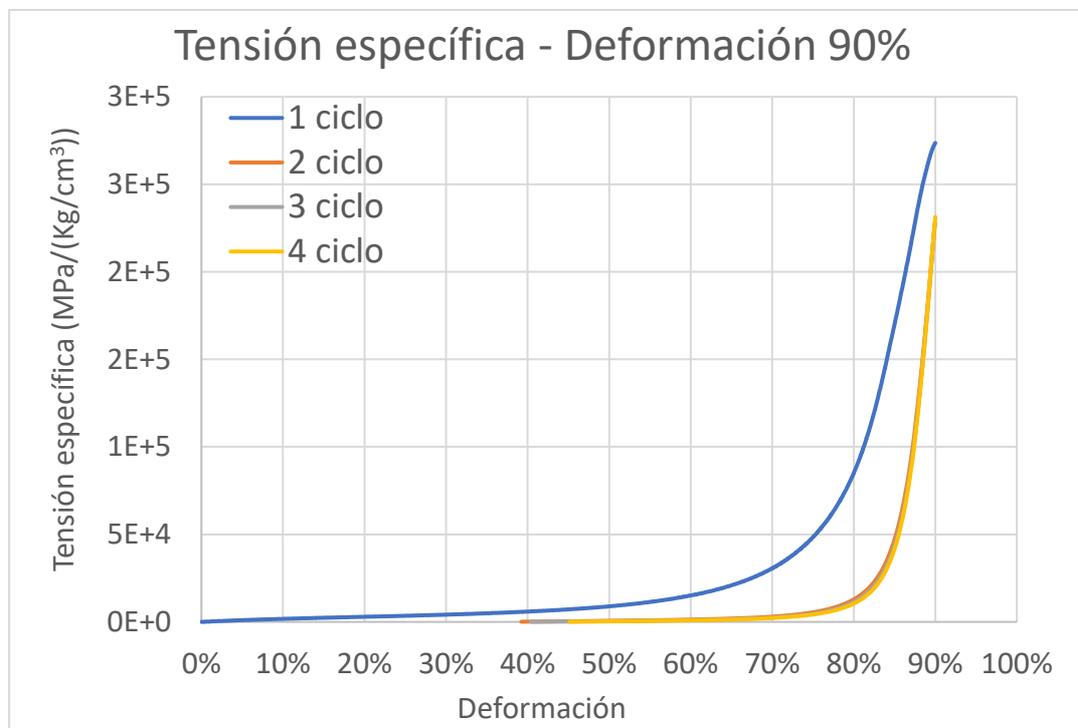


Figura 109

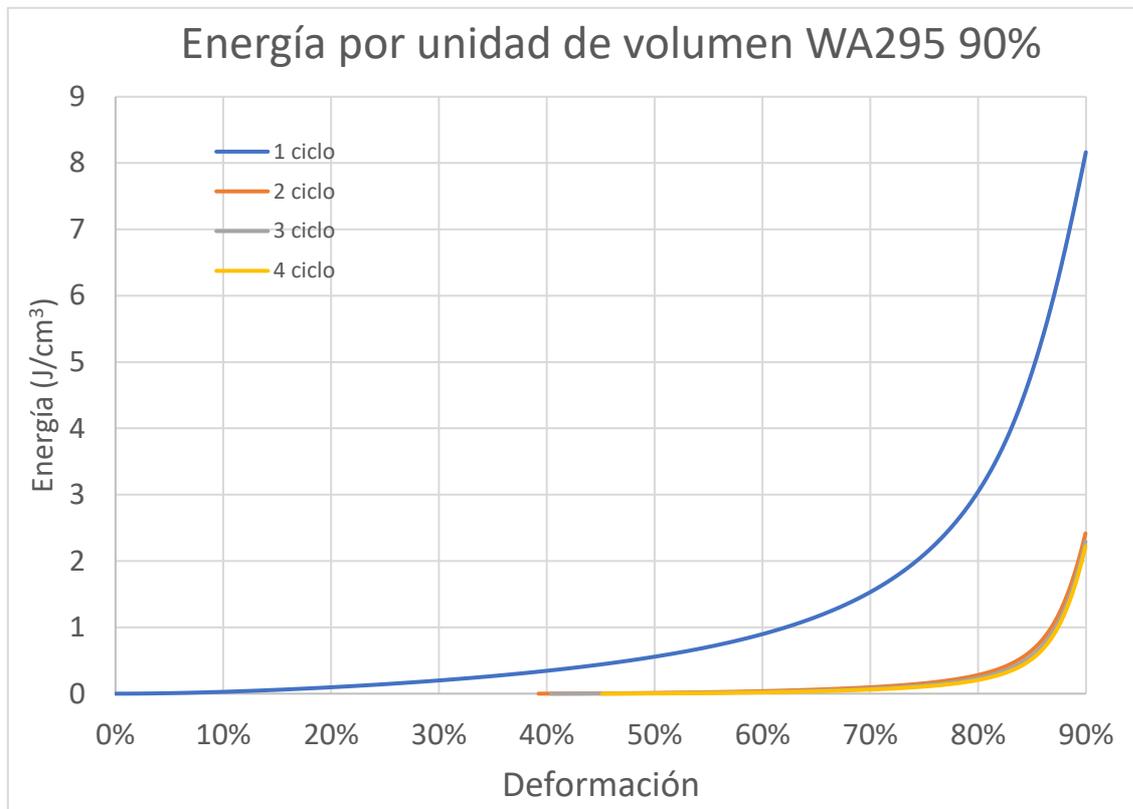


Figura 111

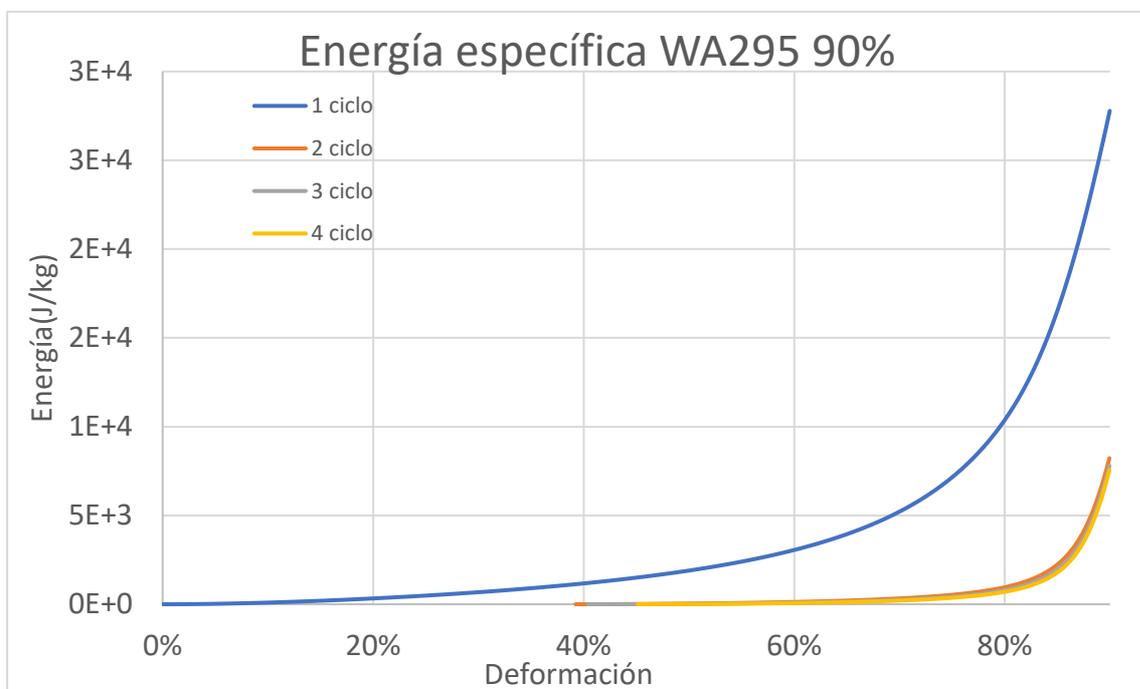


Figura 110

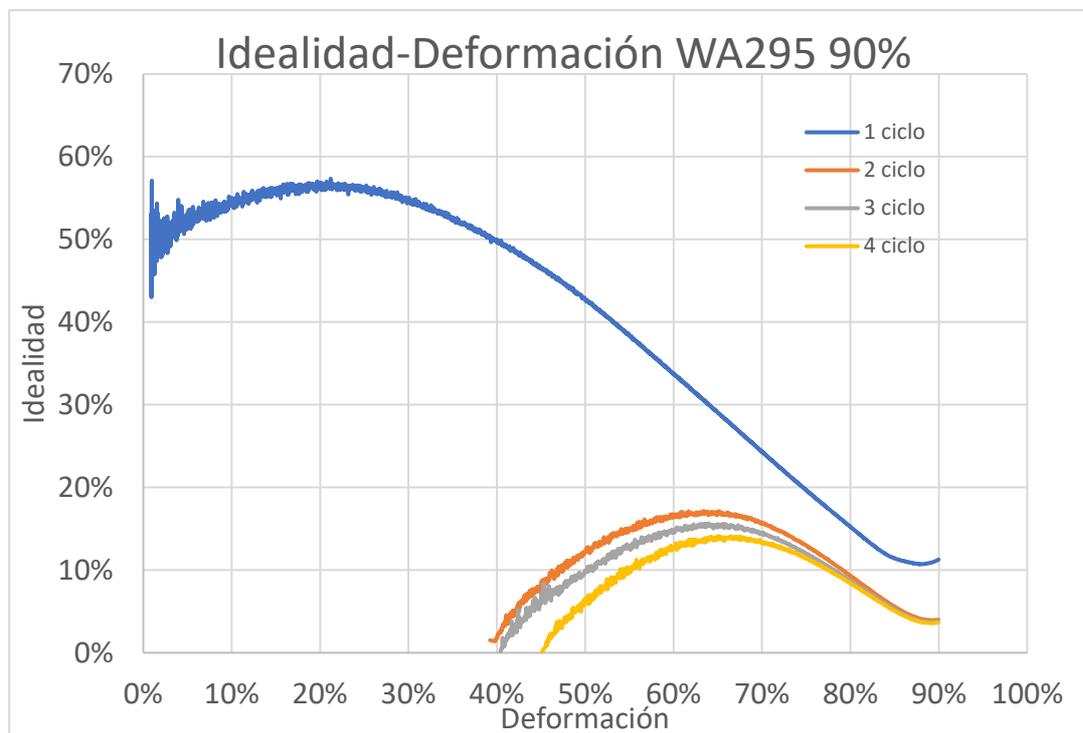


Figura 112

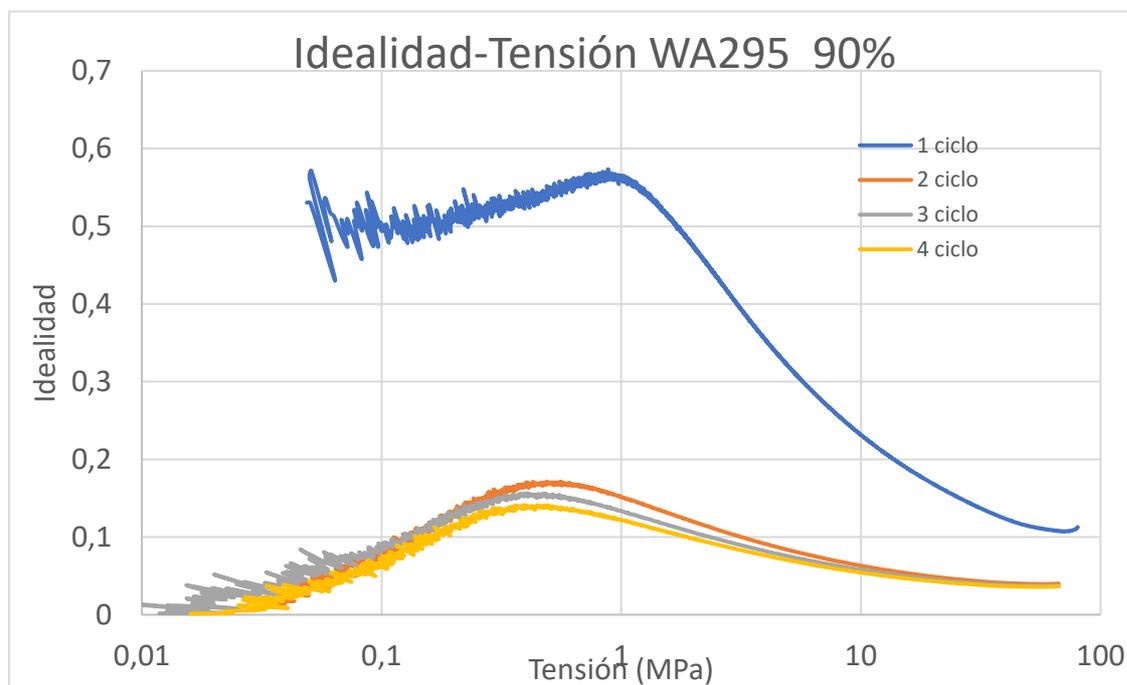


Figura 113

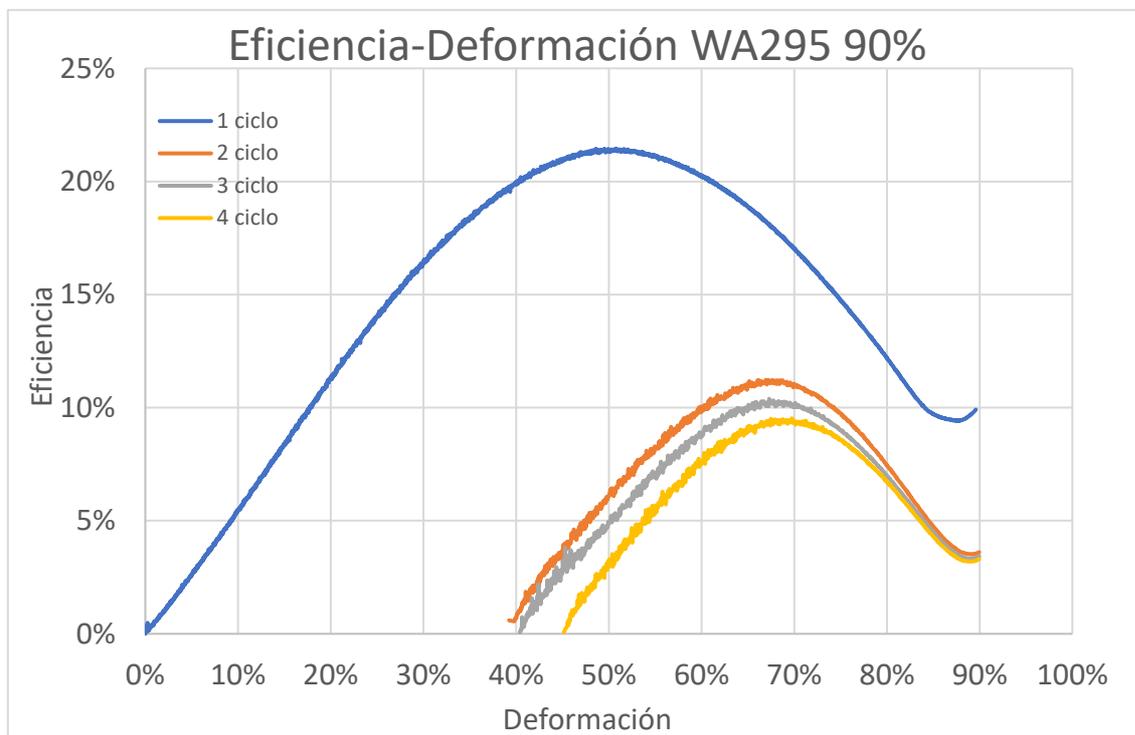


Figura 114

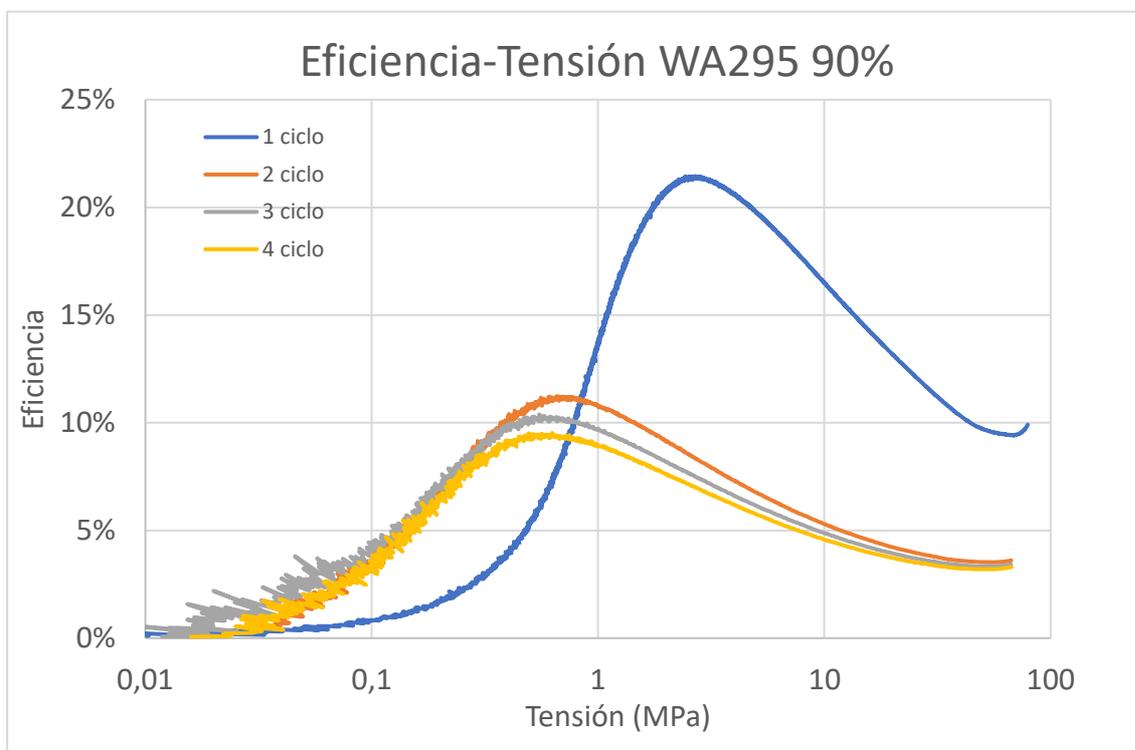


Figura 115

M.1.2 Ensayos al 75%

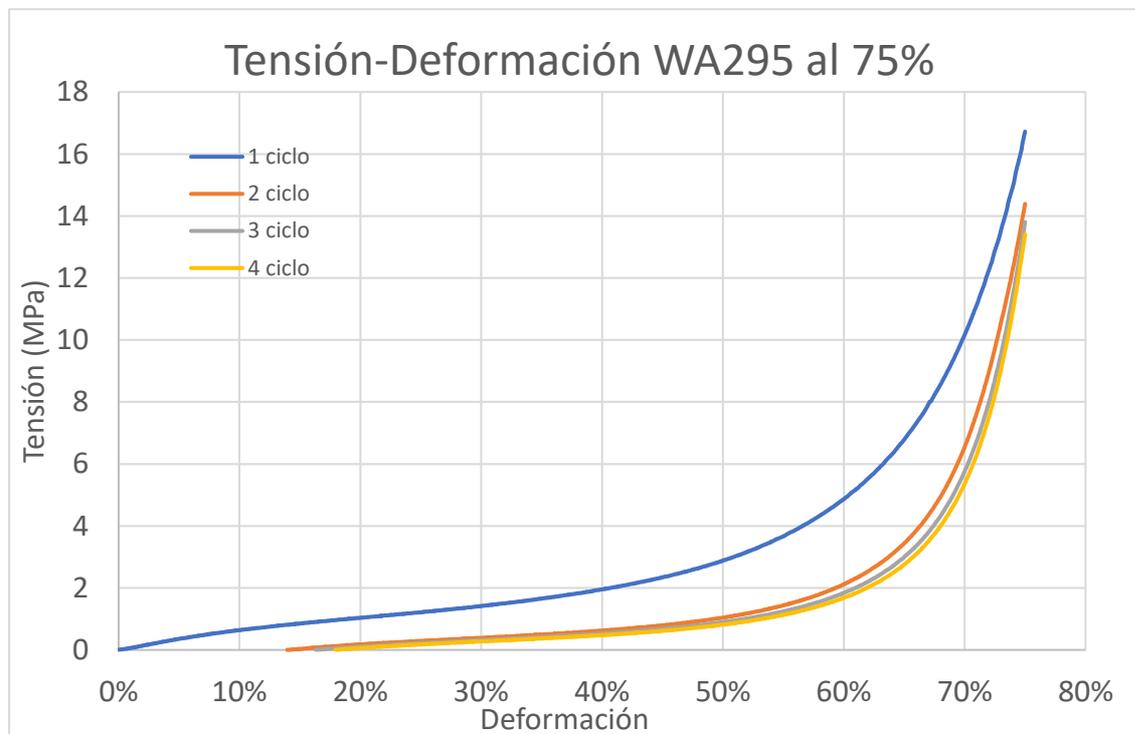


Figura 116

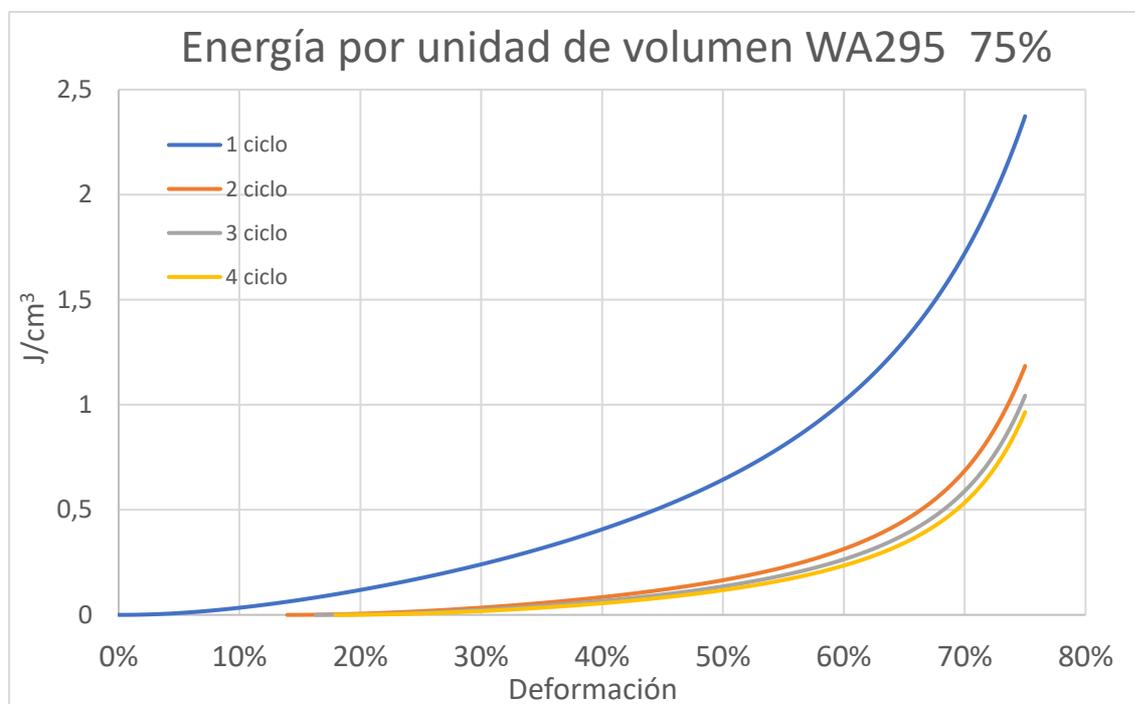


Figura 117

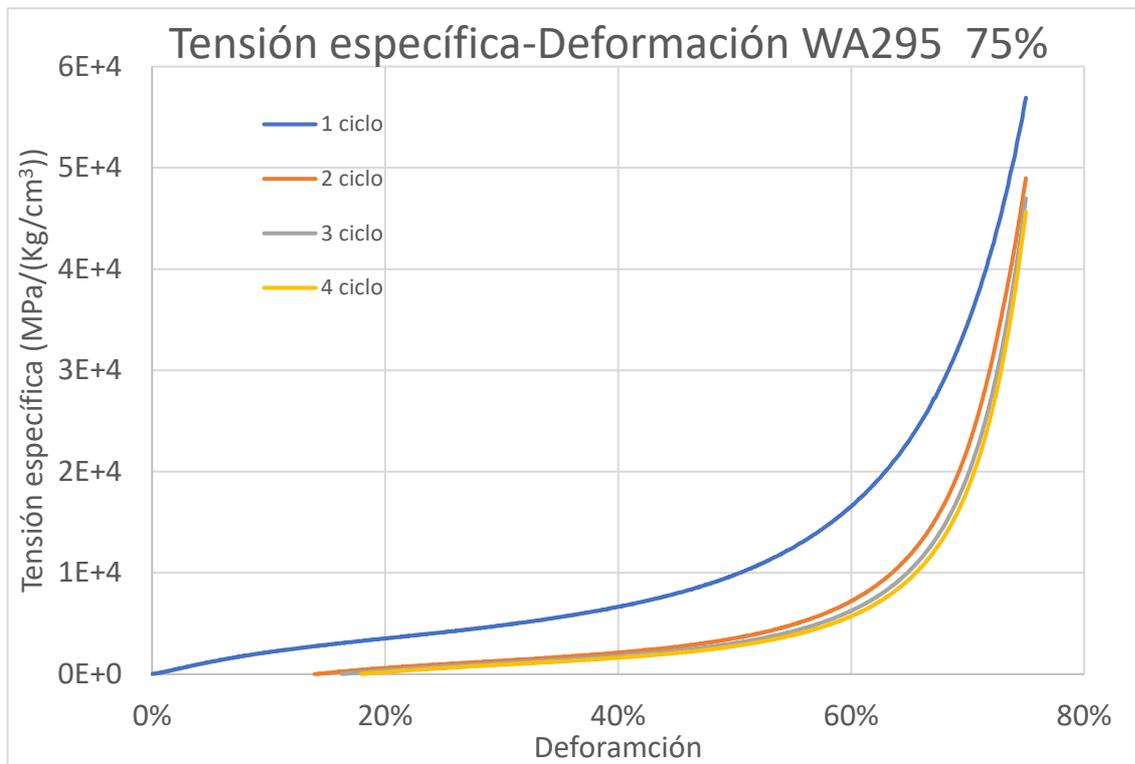


Figura 118

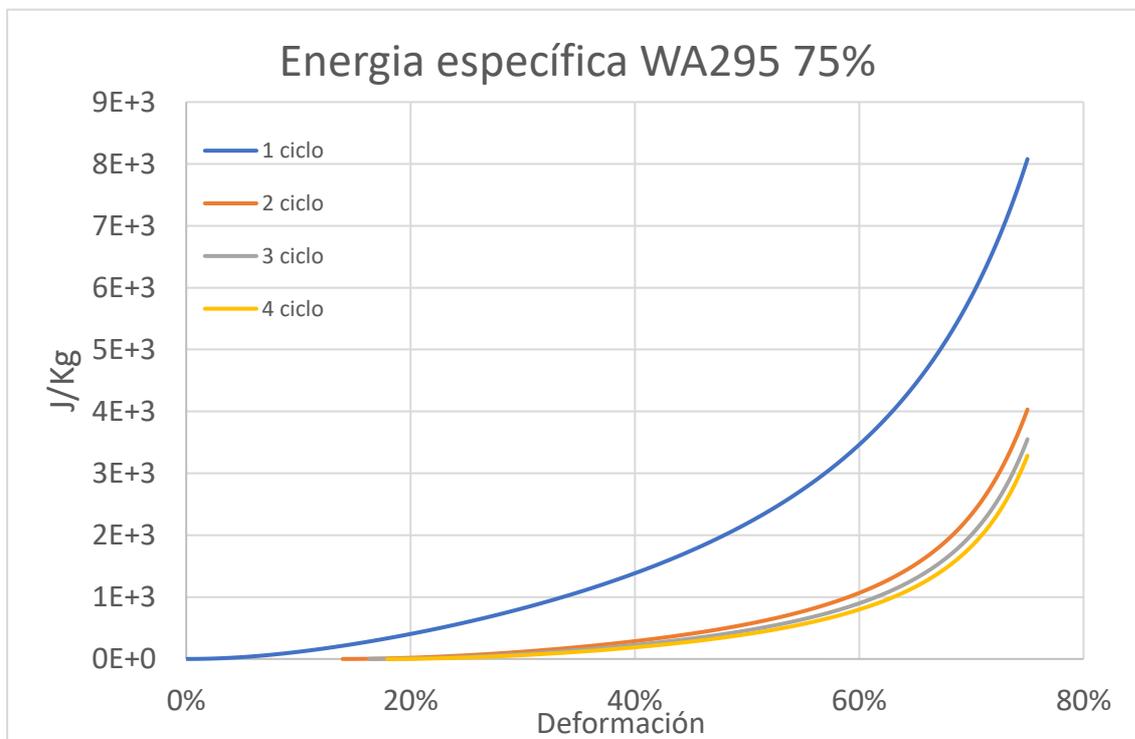


Figura 119

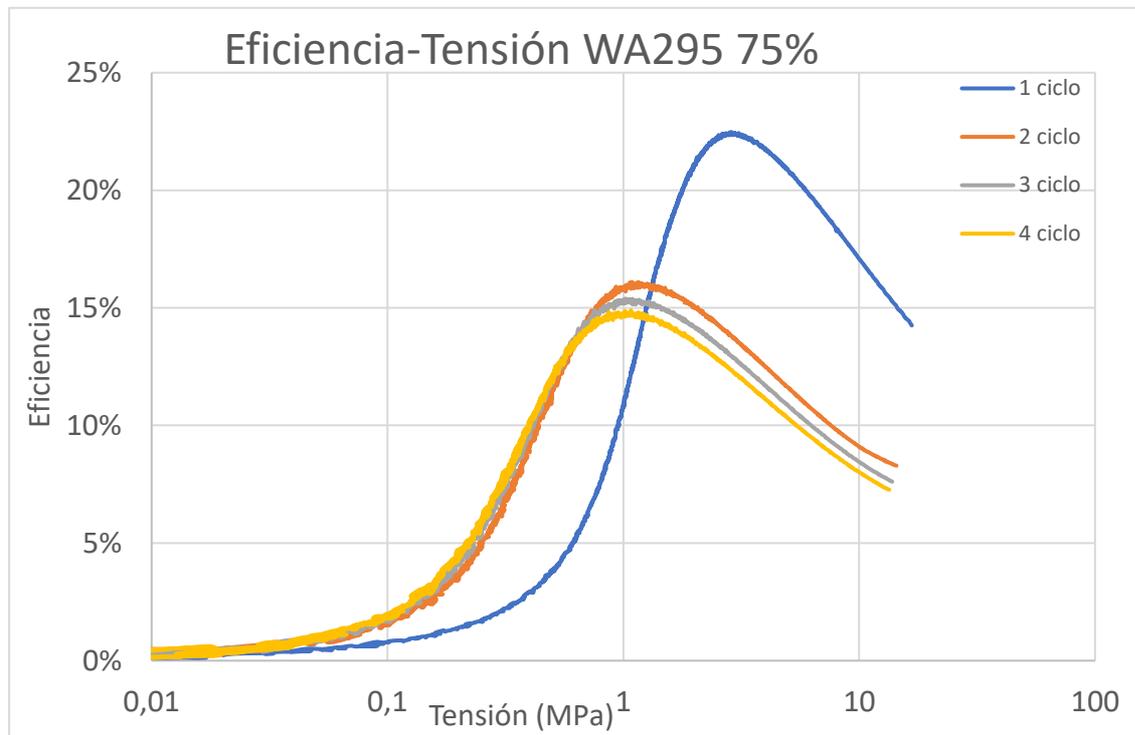


Figura 120

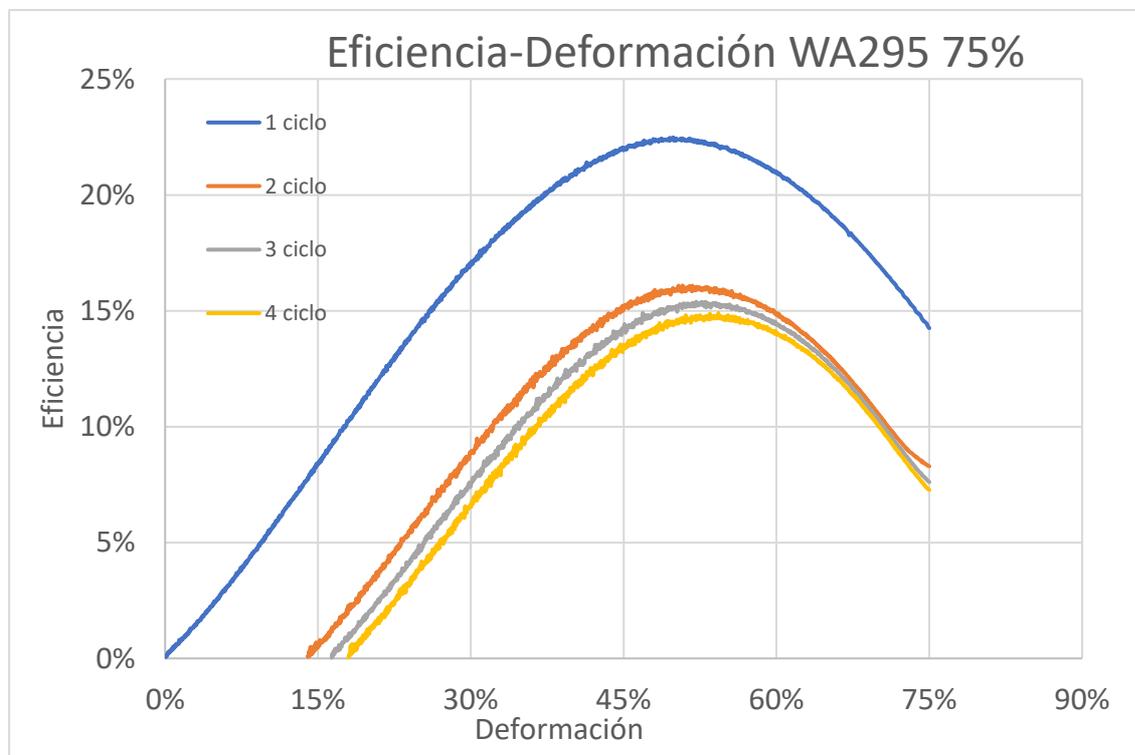


Figura 121

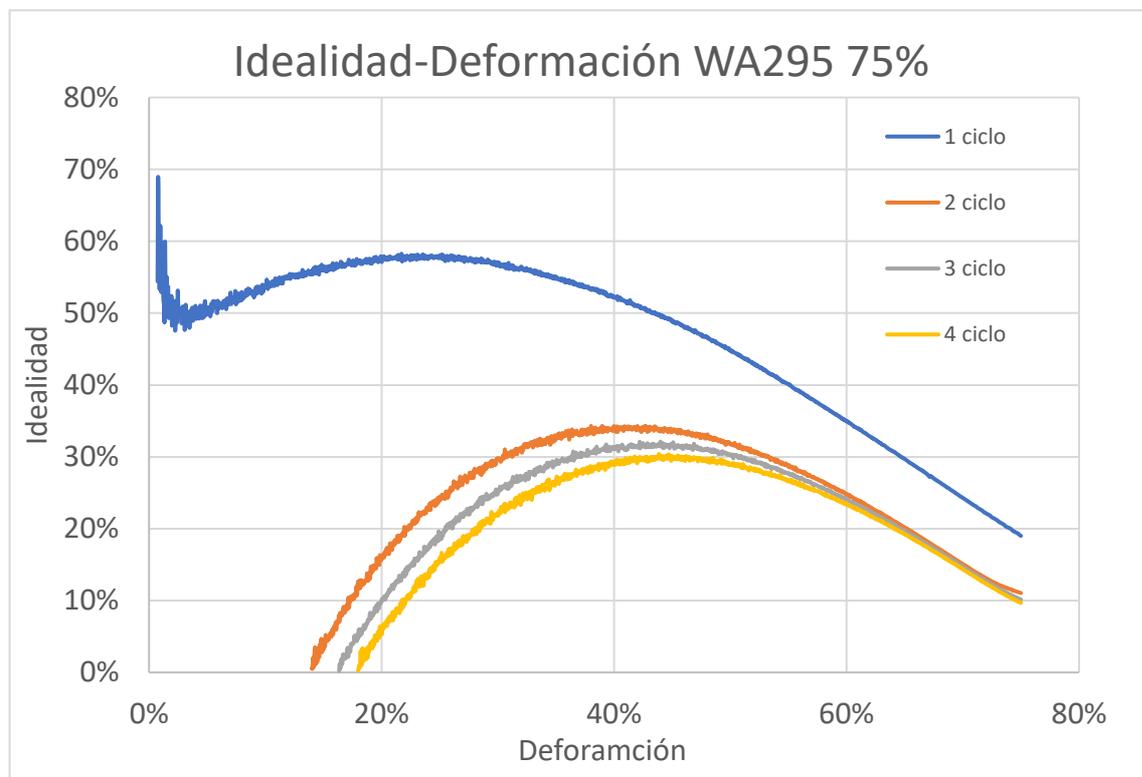


Figura 122

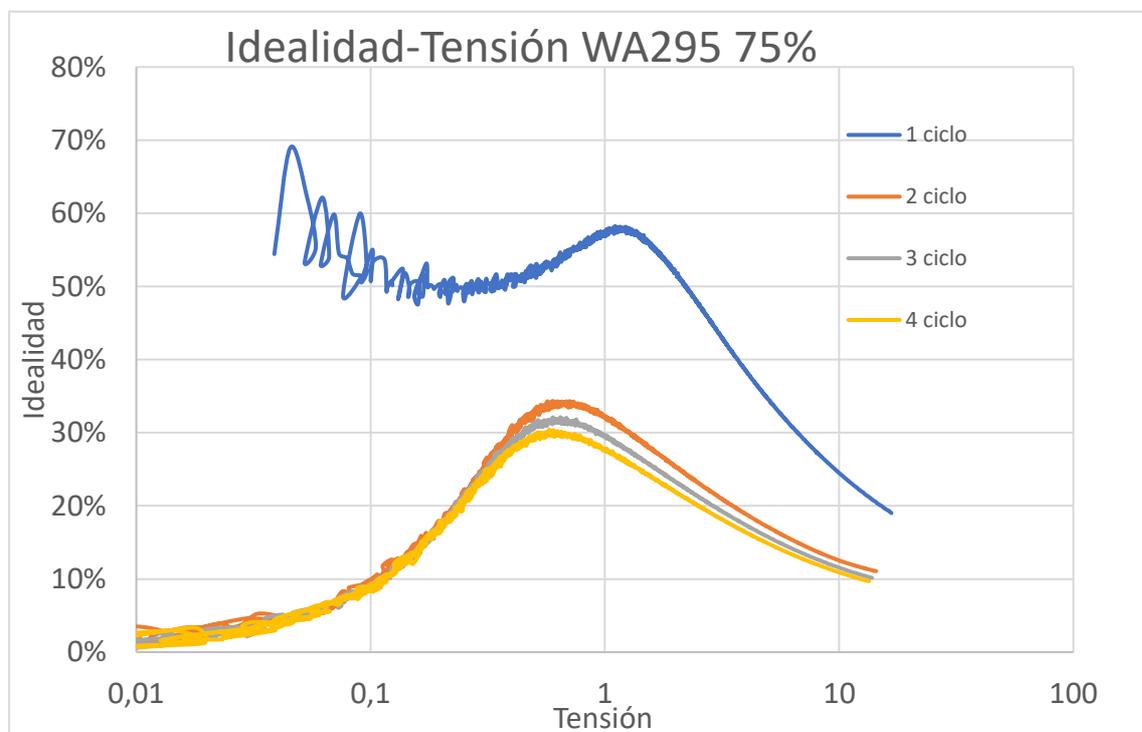


Figura 123

M.1.3 Ensayos al 62,5%

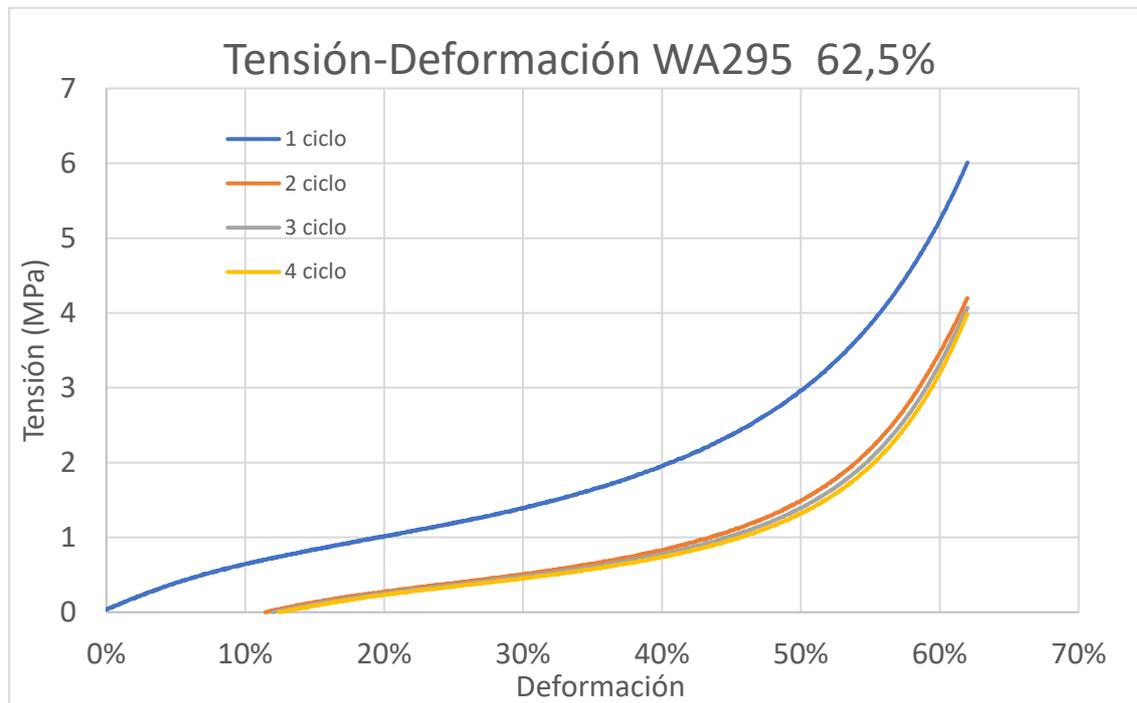


Figura 124

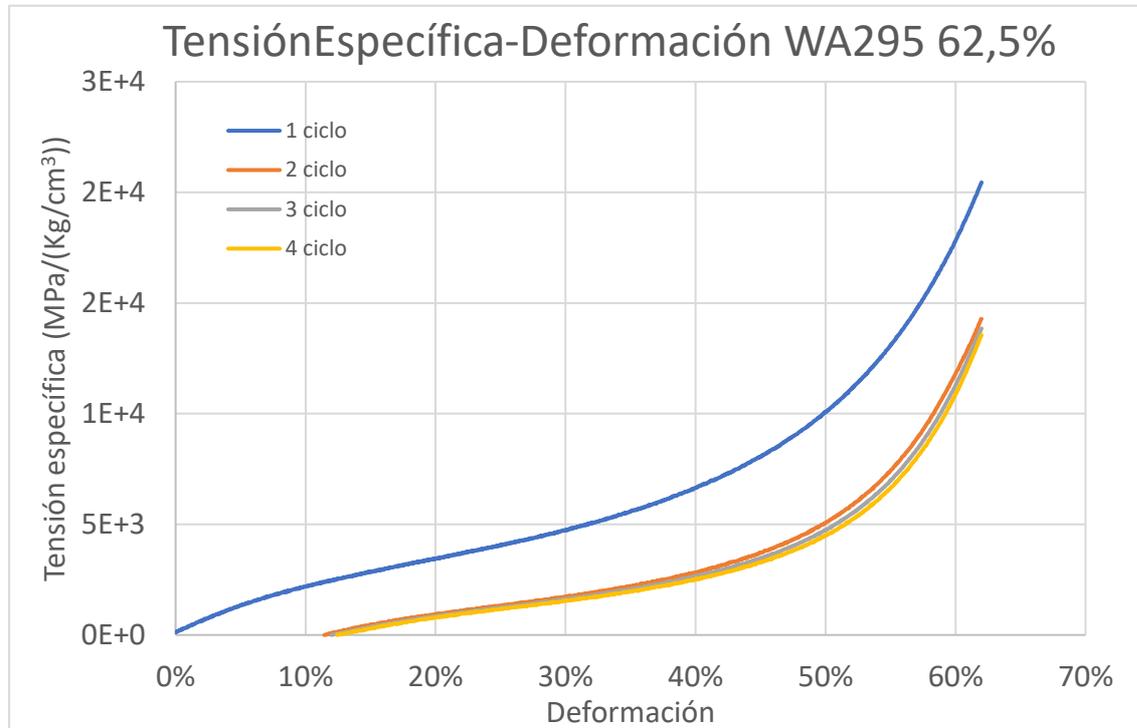


Figura 125

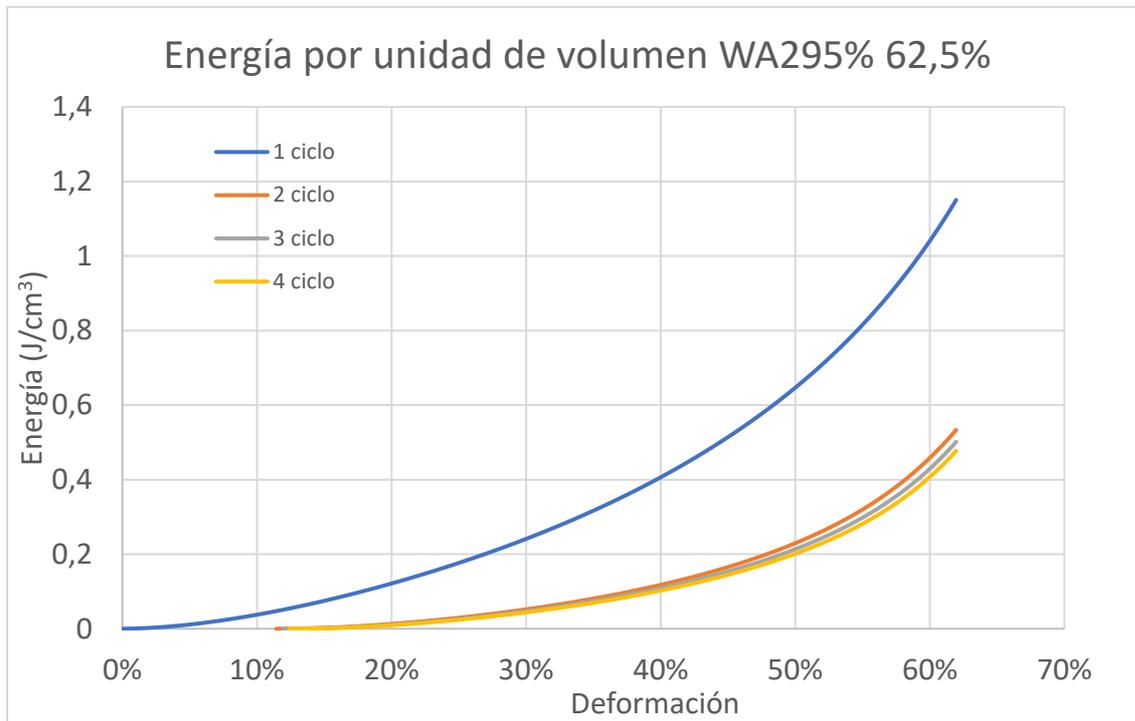


Figura 126

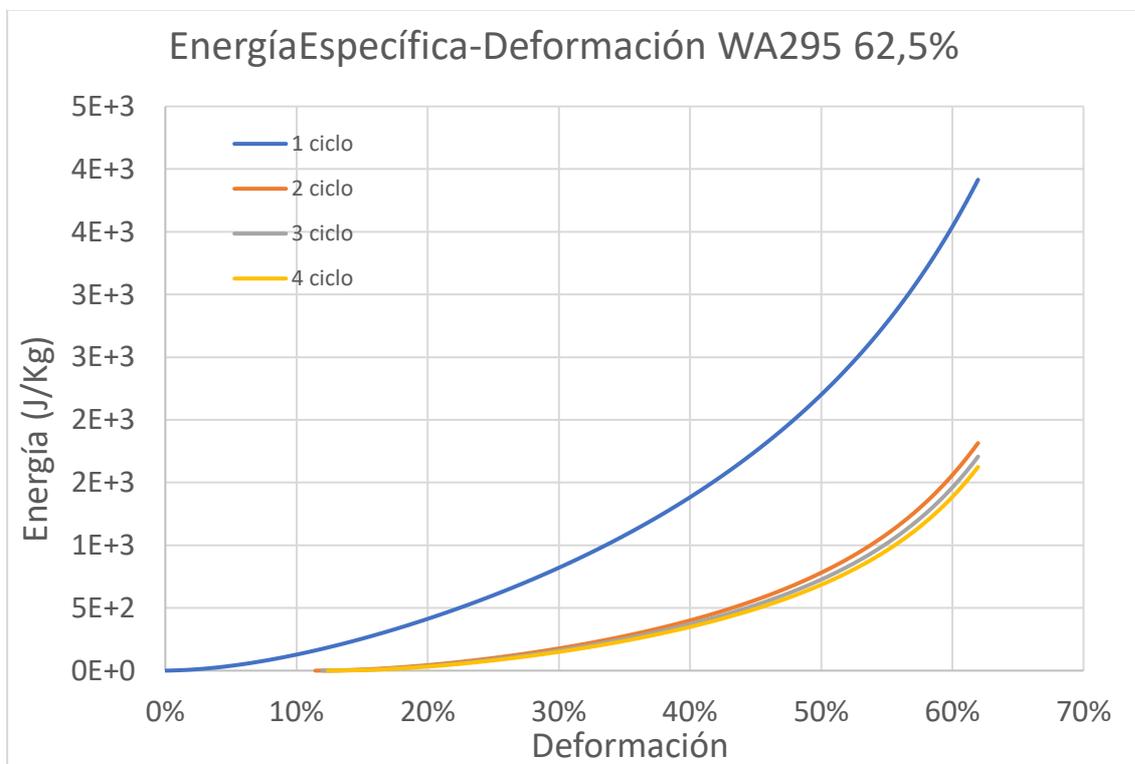


Figura 127

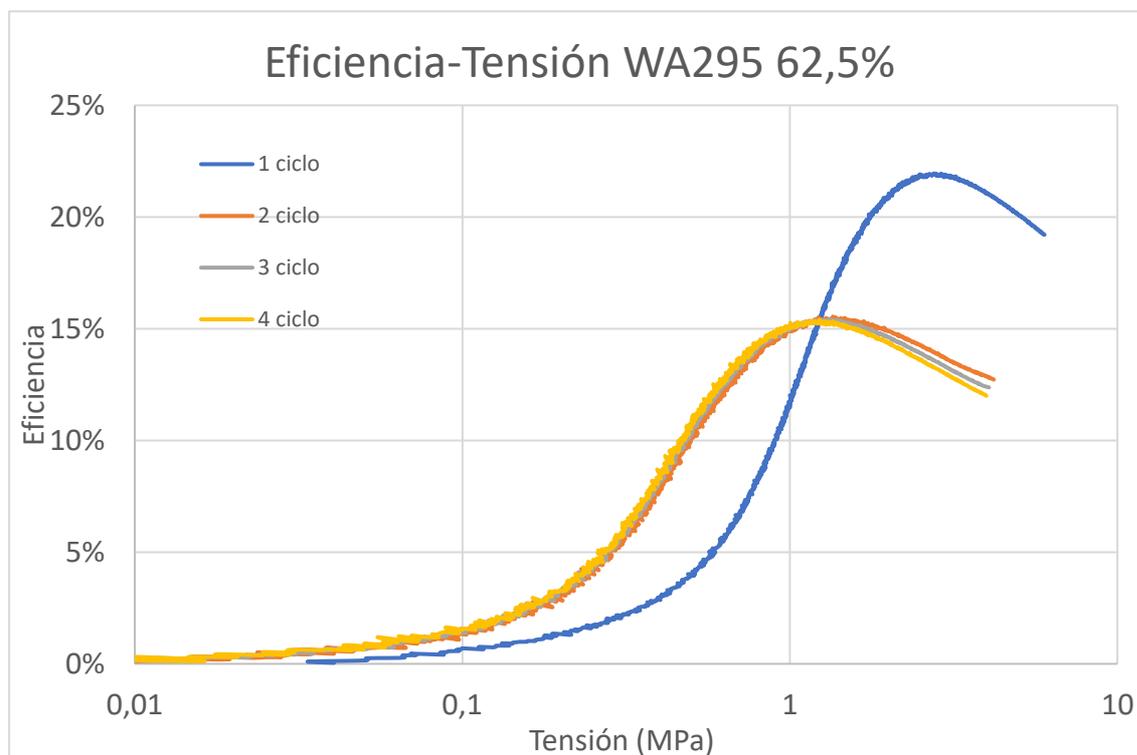


Figura 129

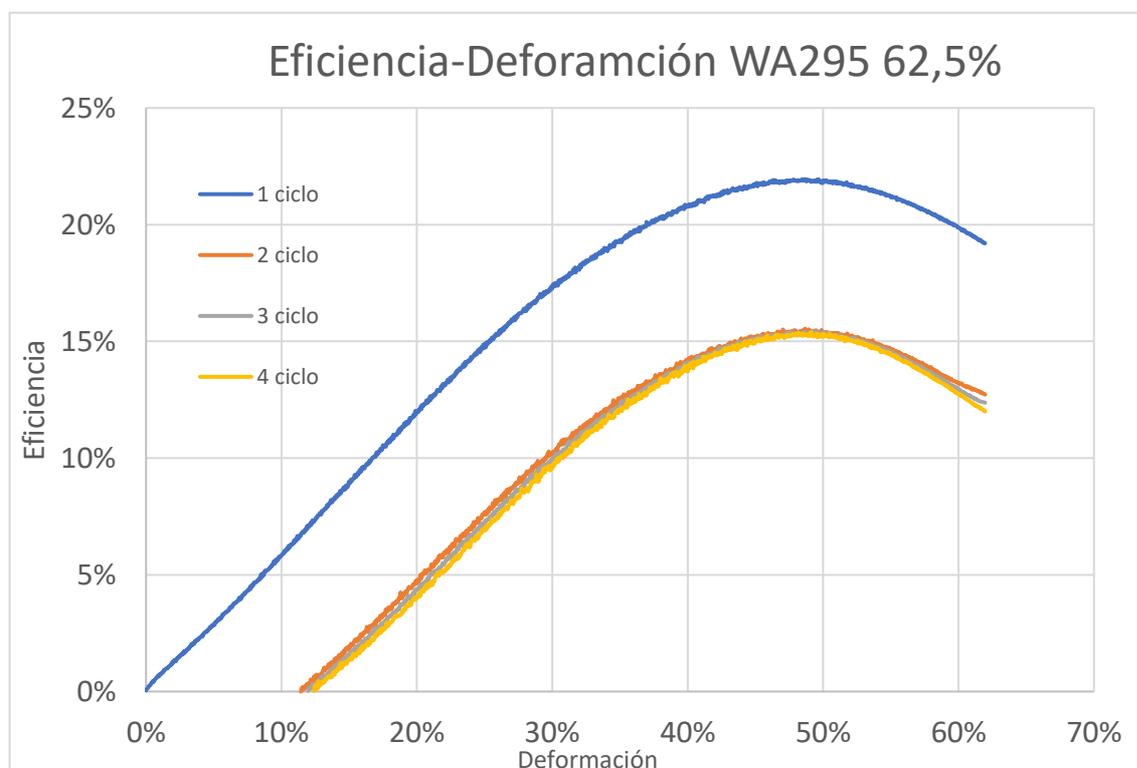


Figura 128

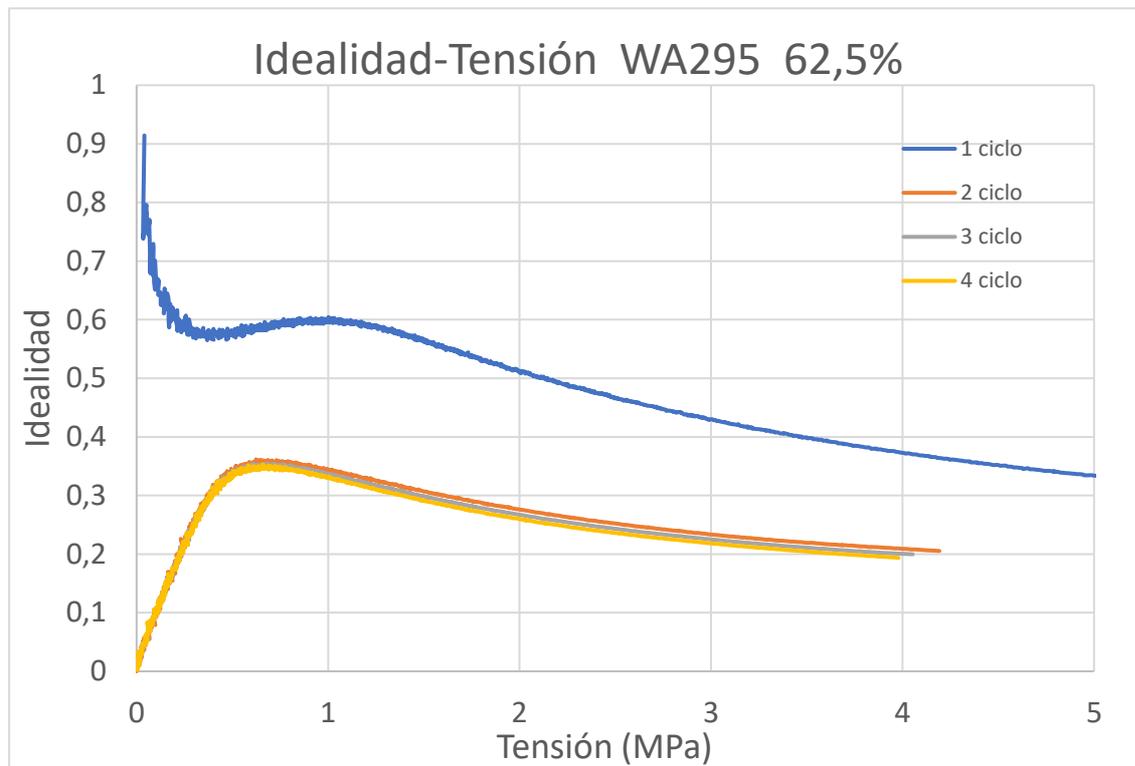


Figura 131

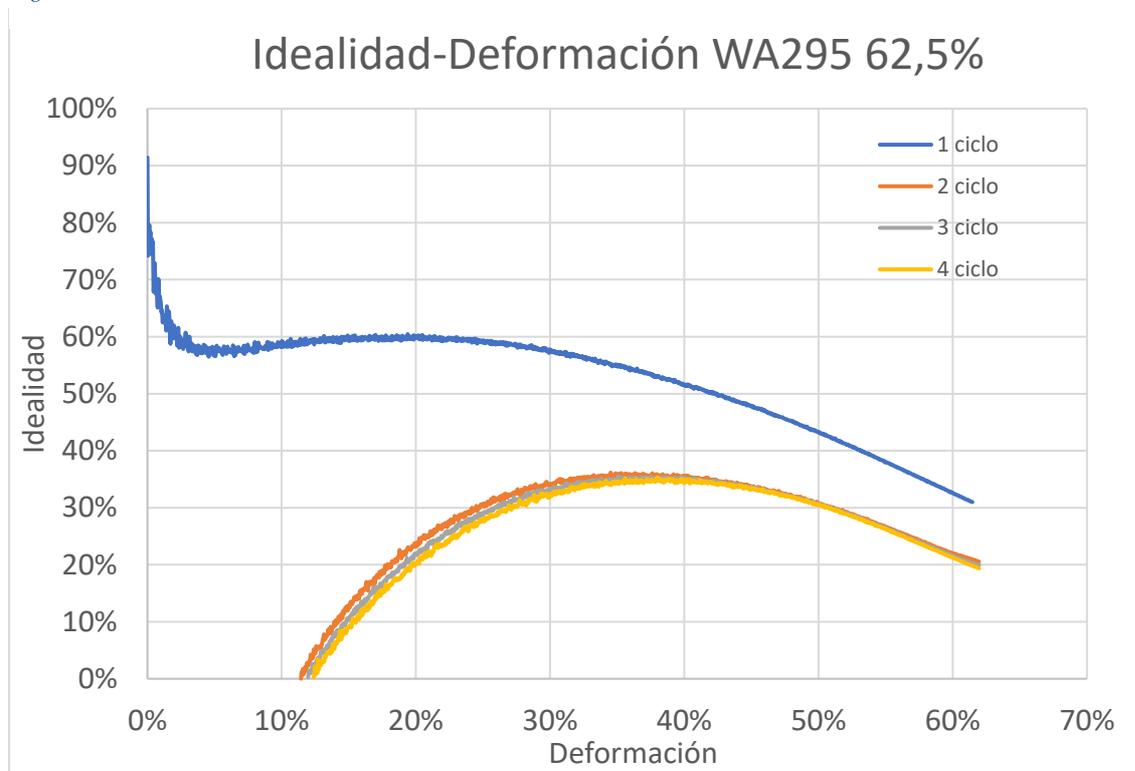


Figura 130

M.1.4 Ensayos al 50%.

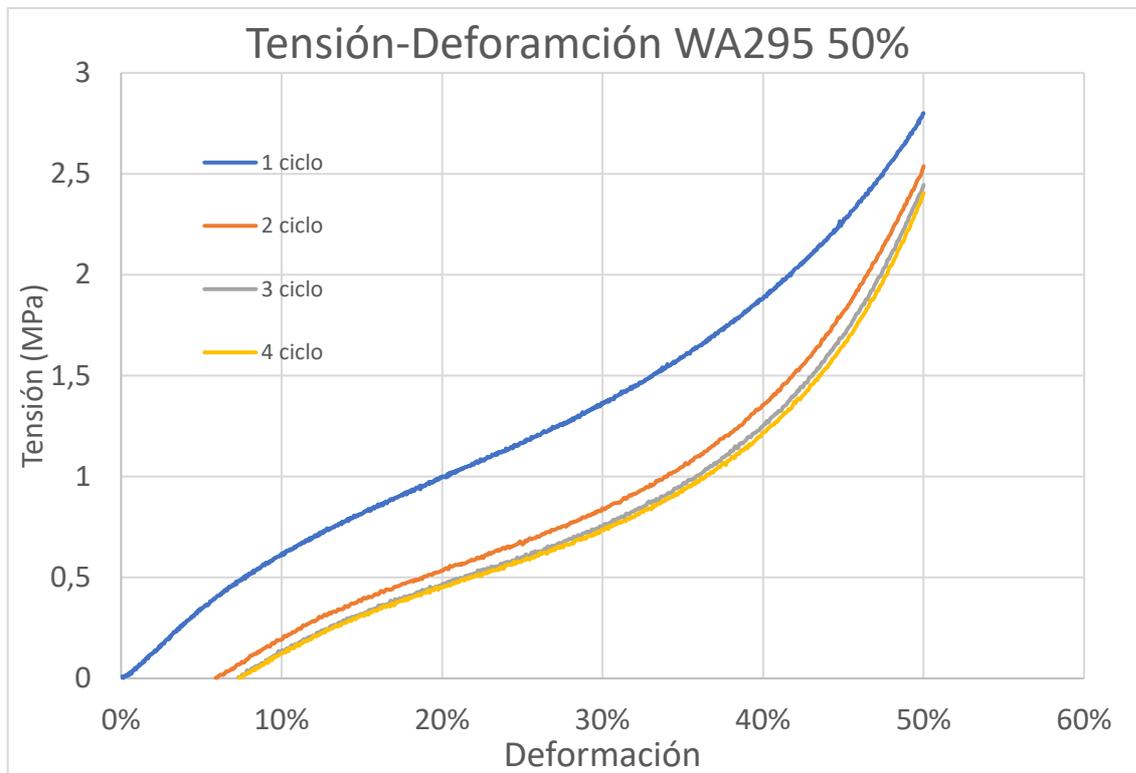


Figura 133

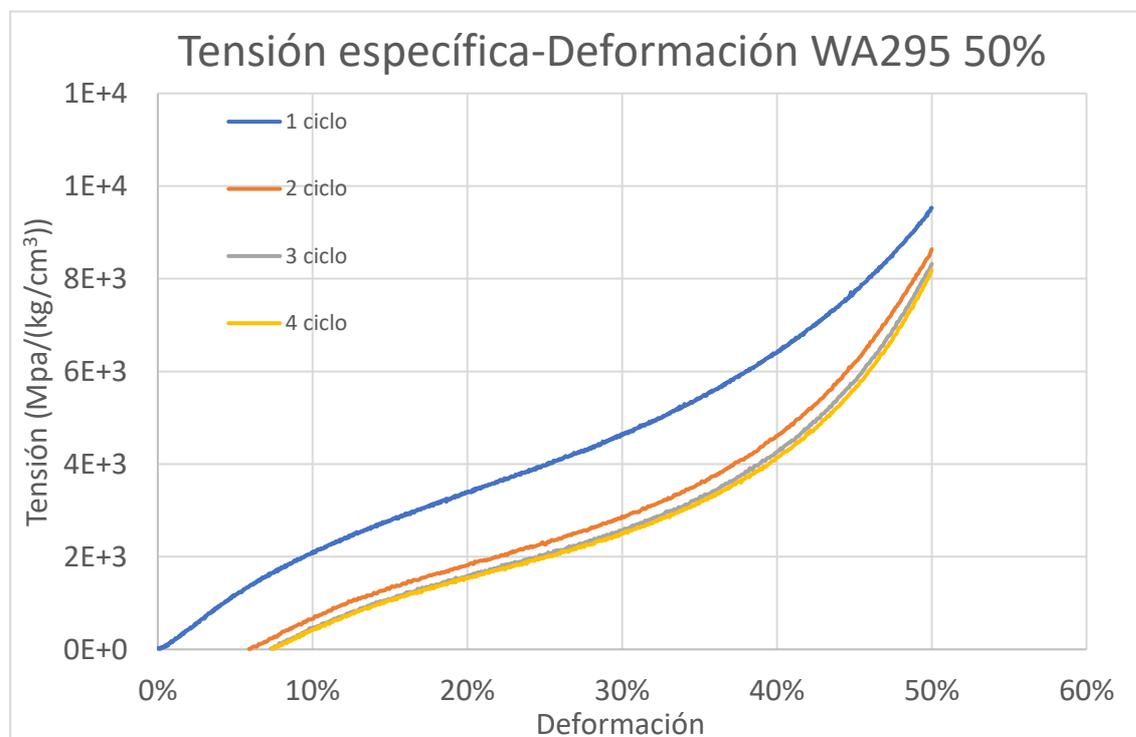


Figura 132

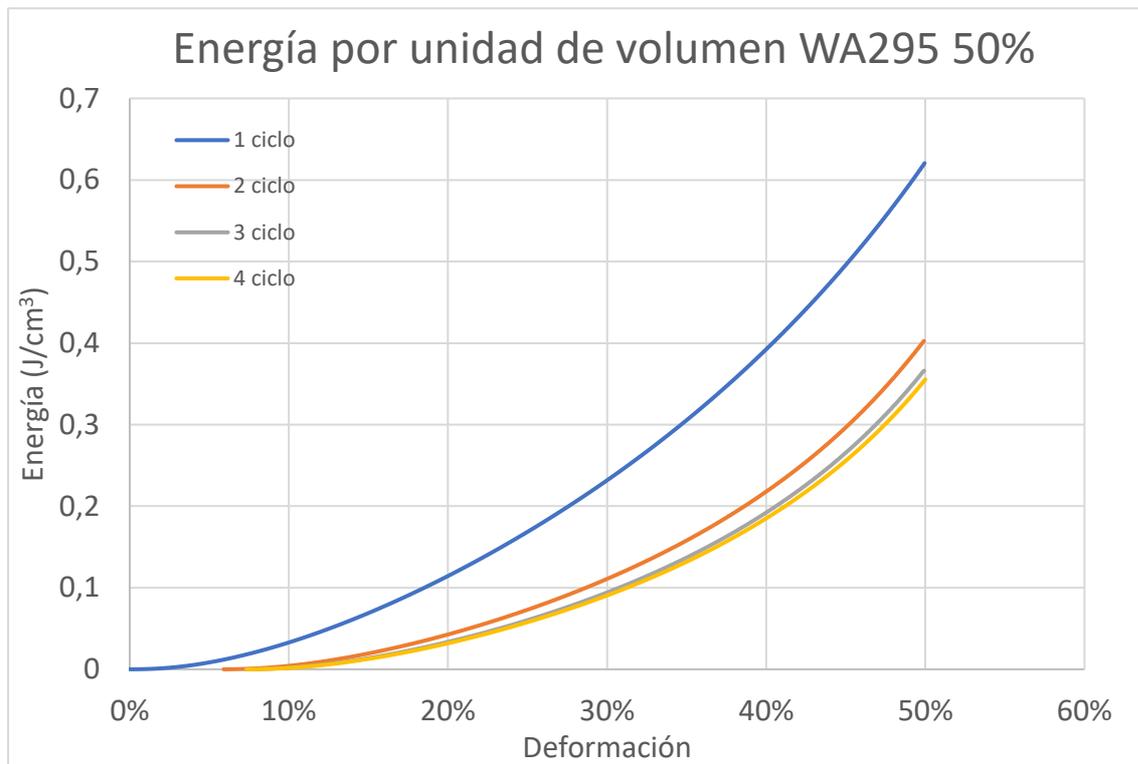


Figura 135

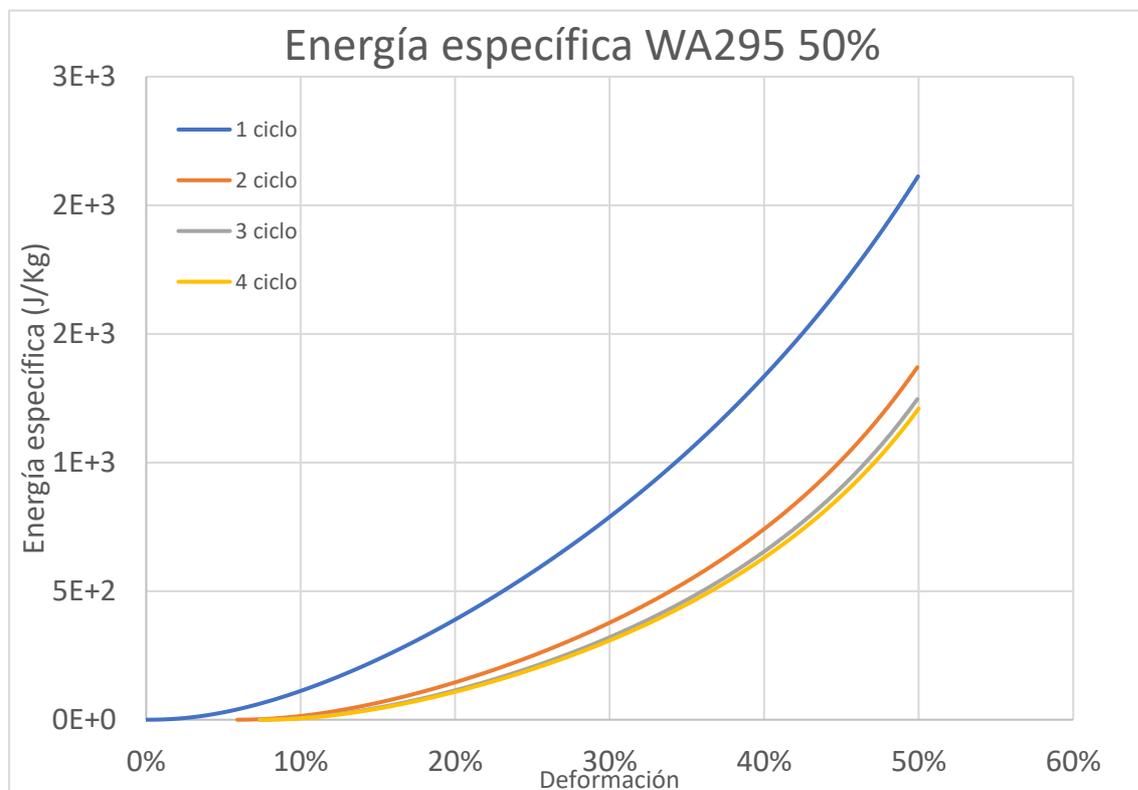


Figura 134

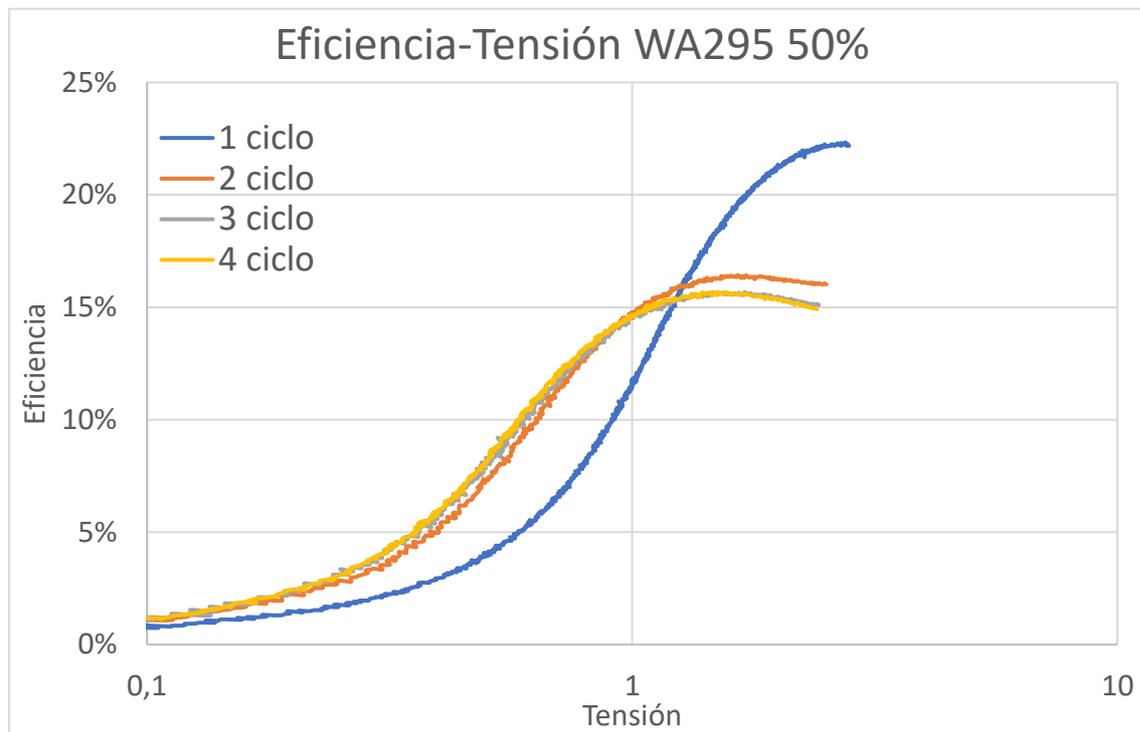


Figura 137

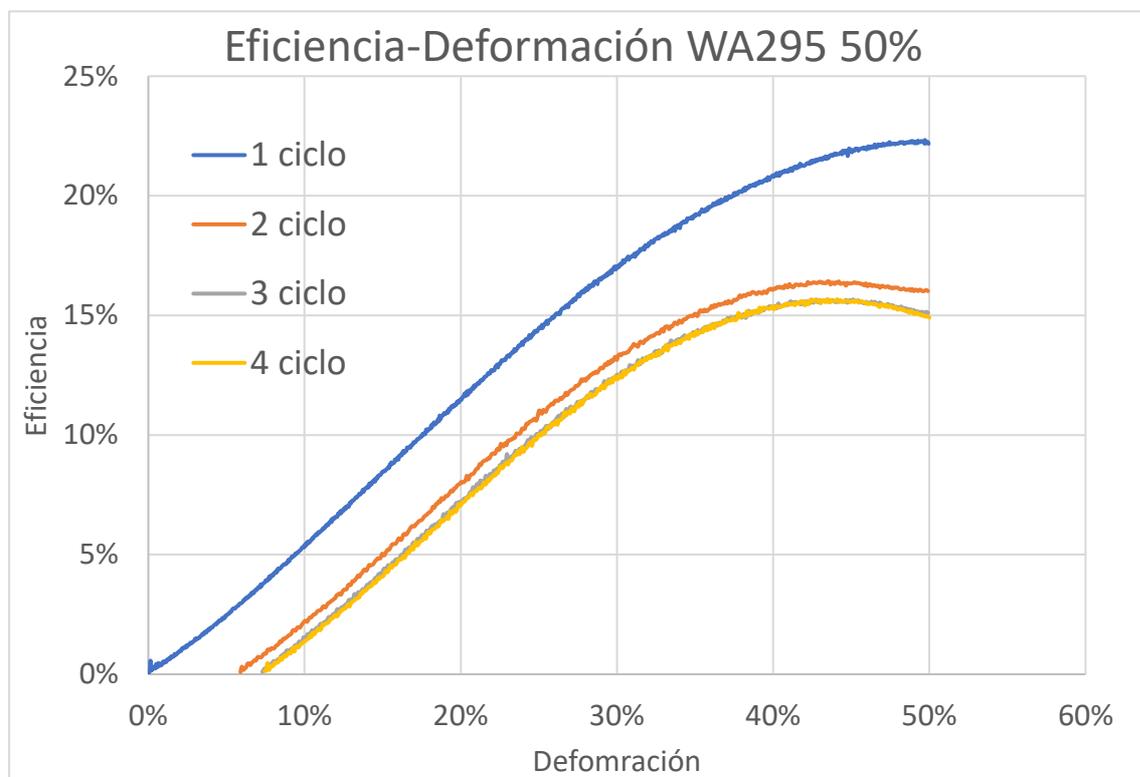


Figura 136

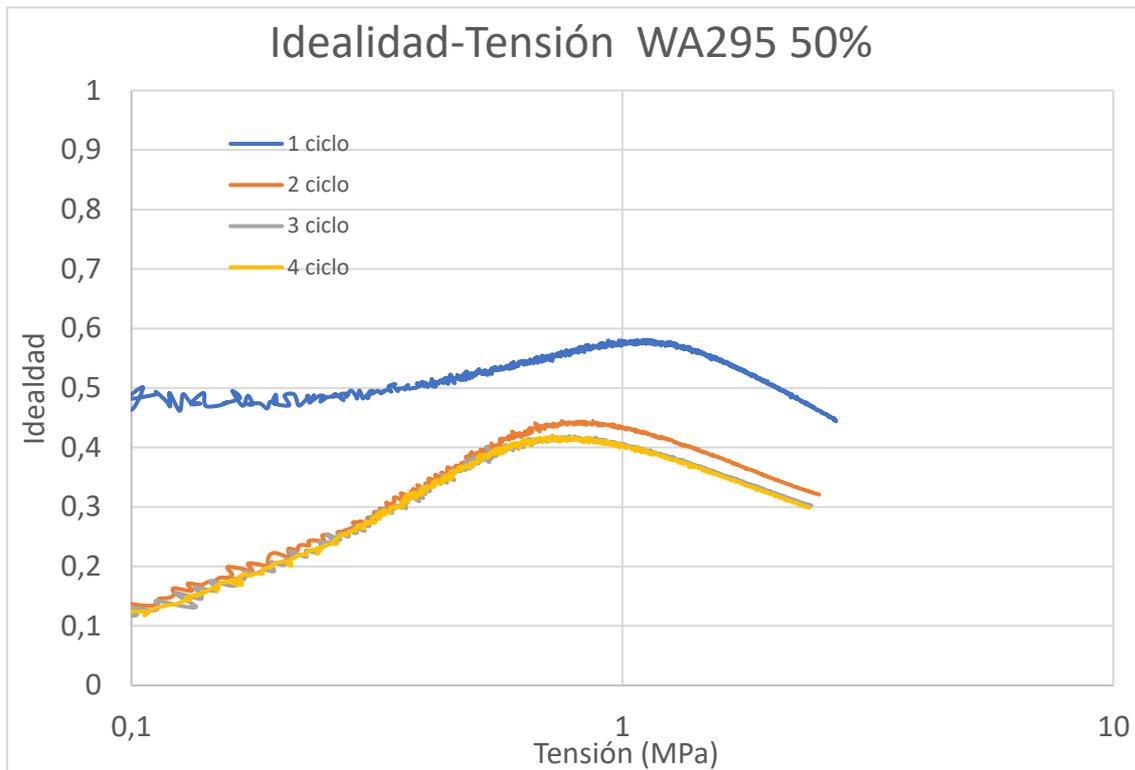


Figura 138

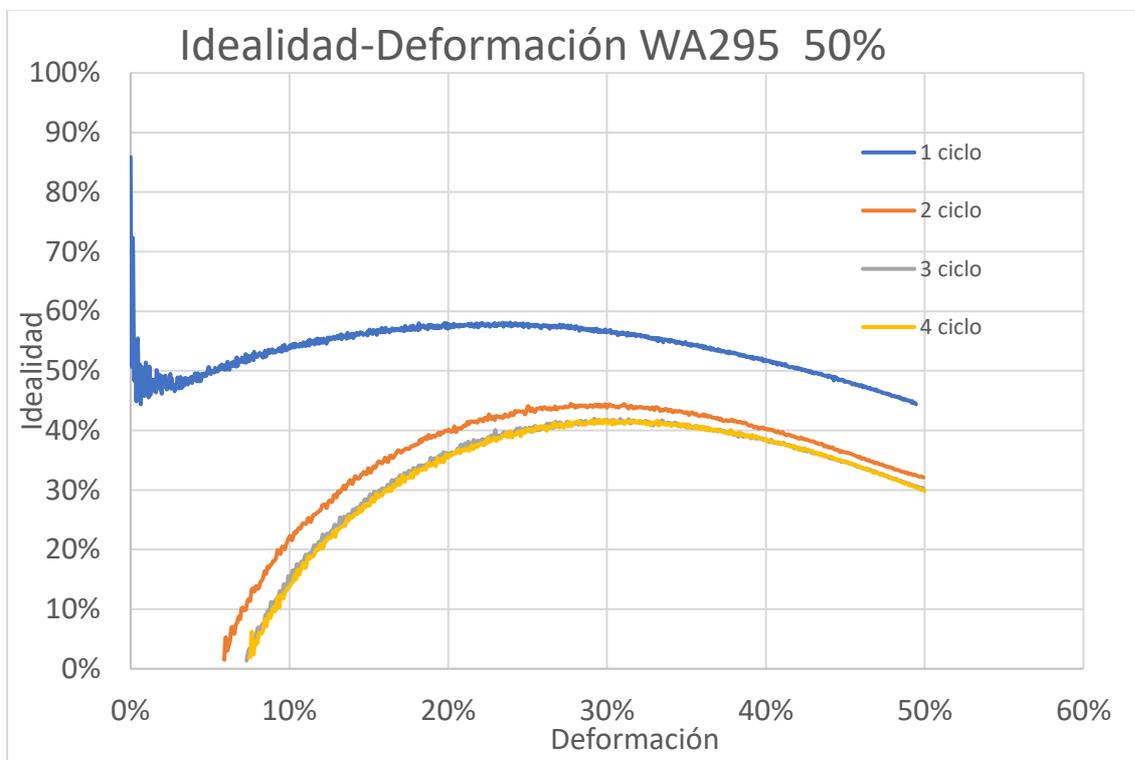


Figura 139

M.2 WA235

M.2.1 Ensayos al 90%

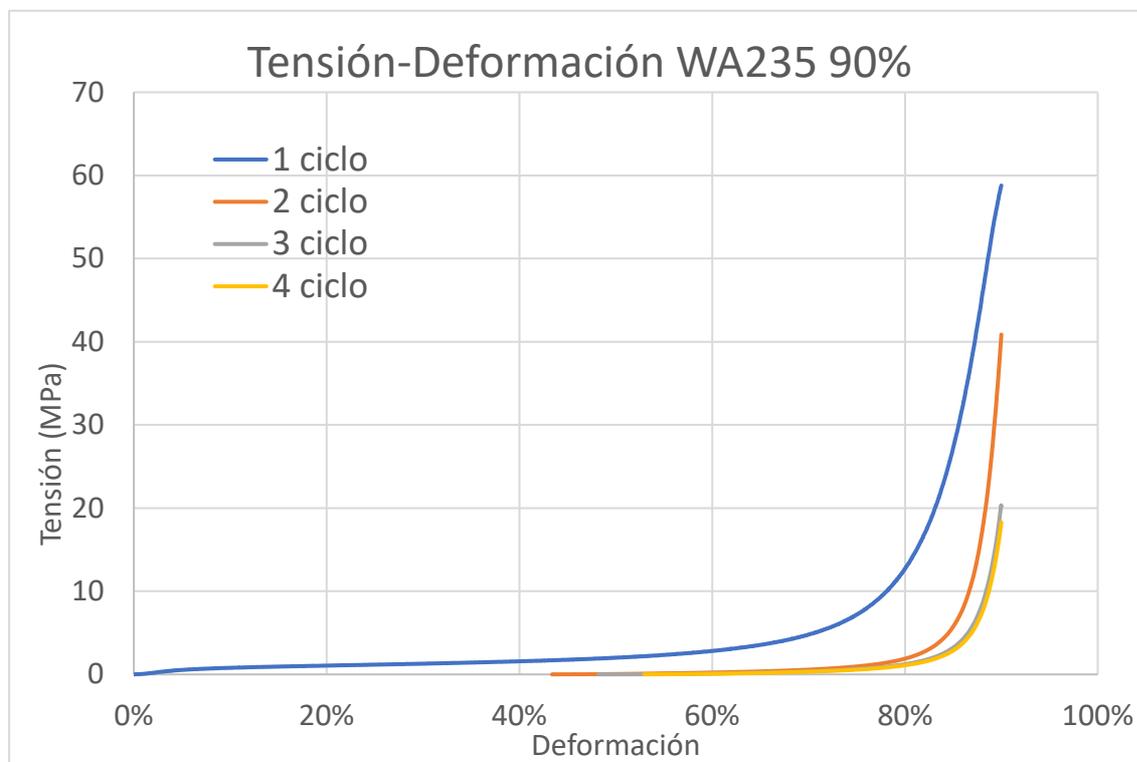


Figura 140

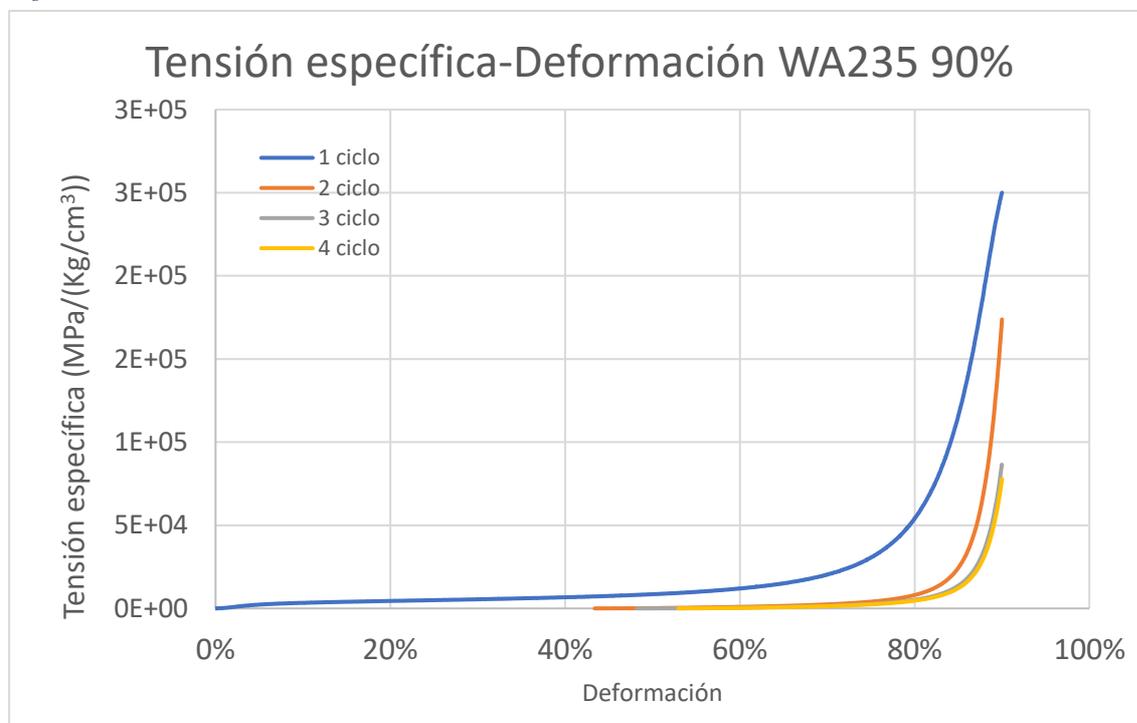


Figura 141

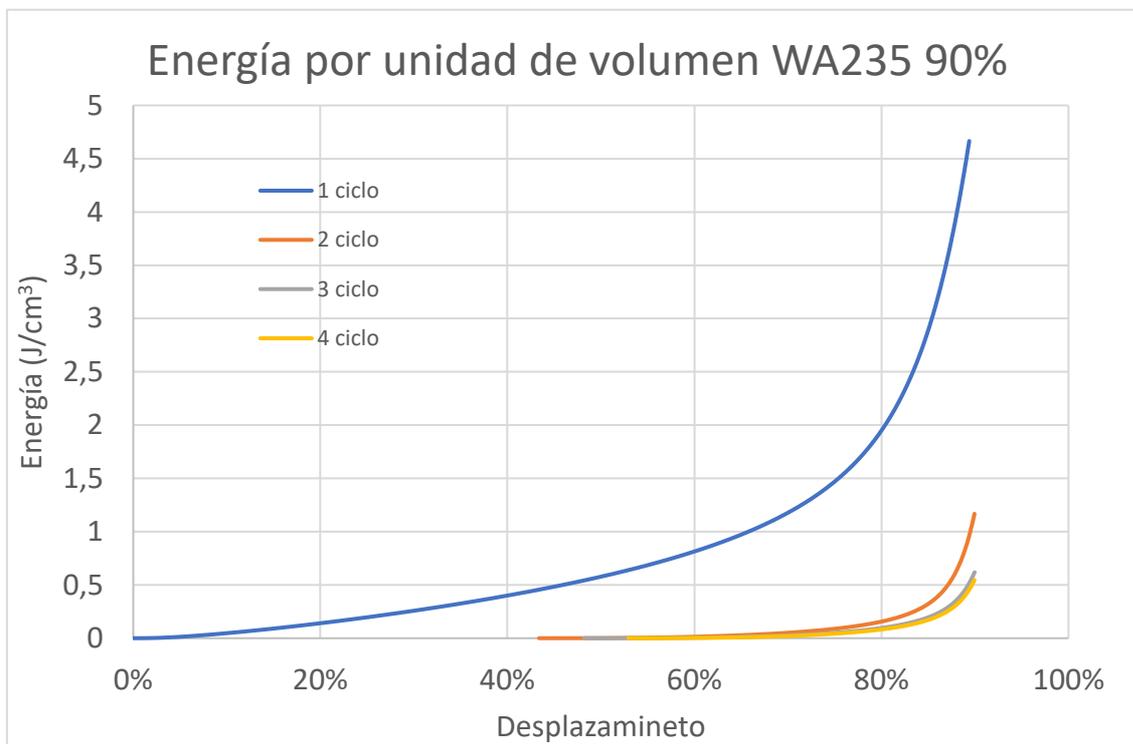


Figura 142

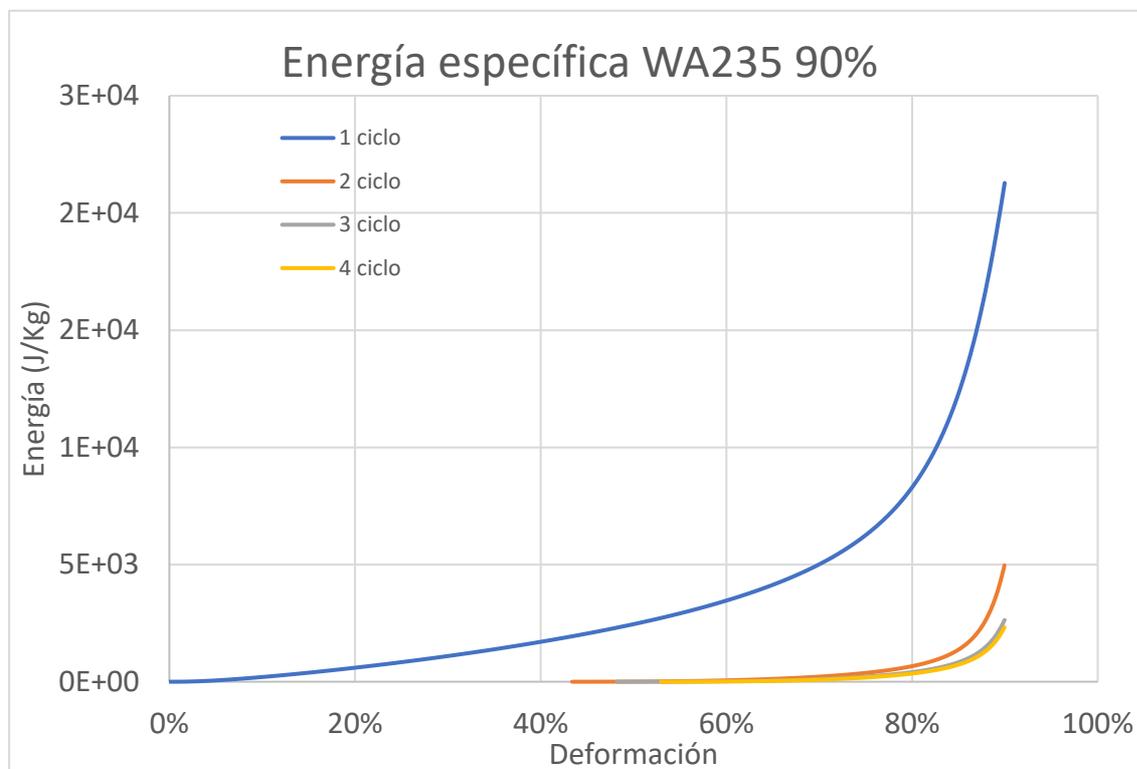


Figura 143

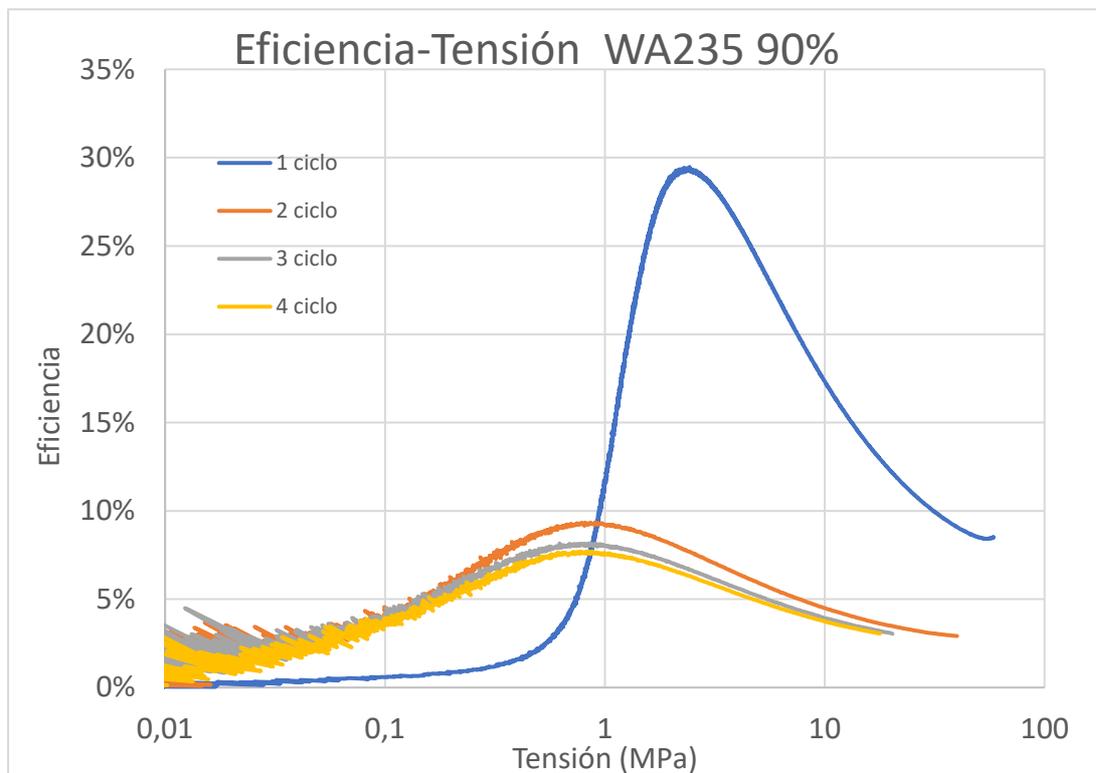


Figura 144

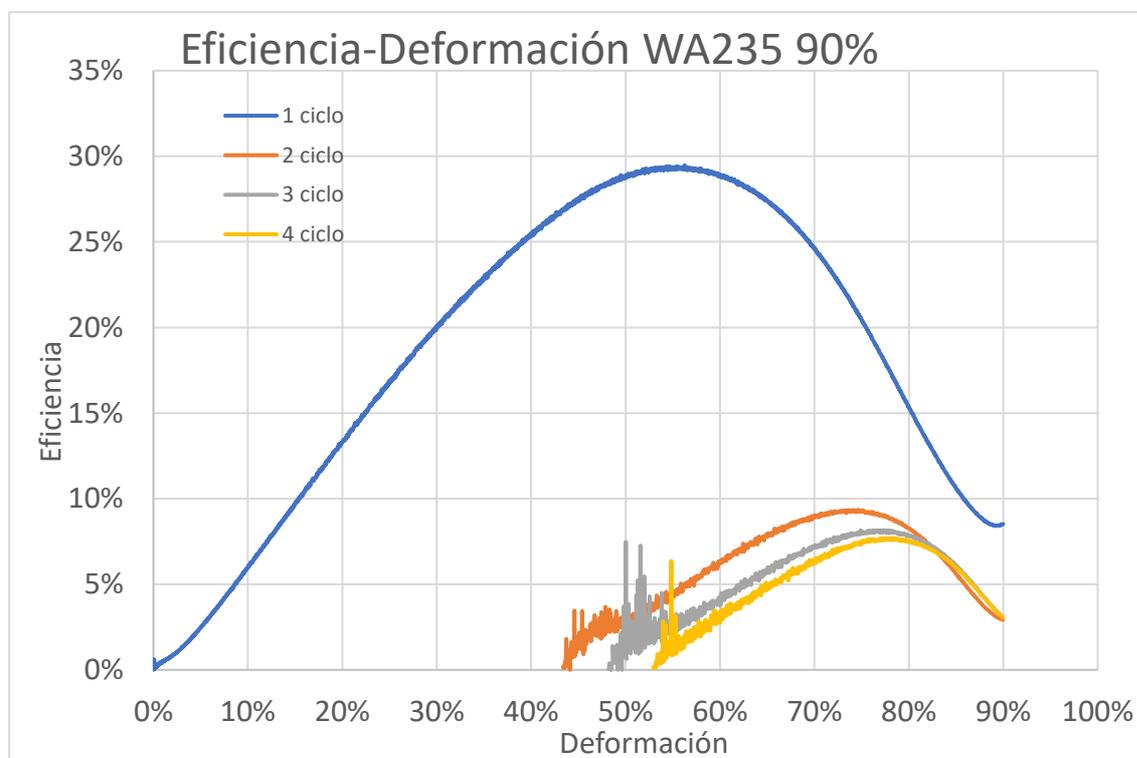


Figura 145

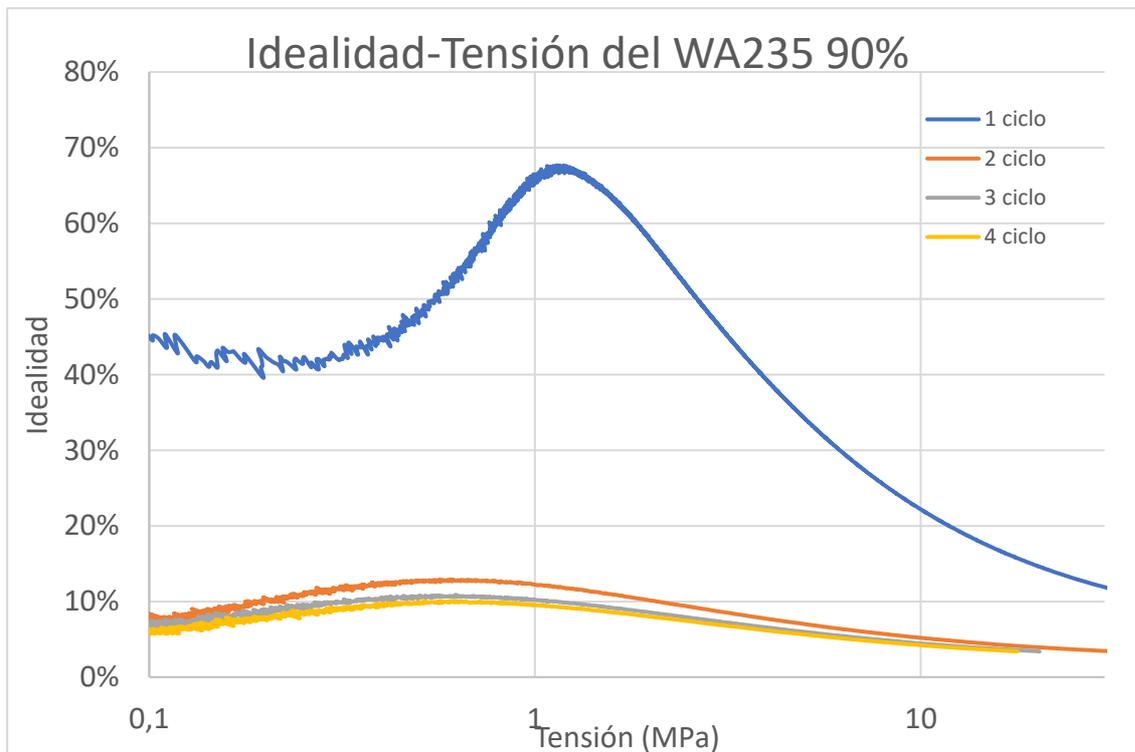


Figura 146

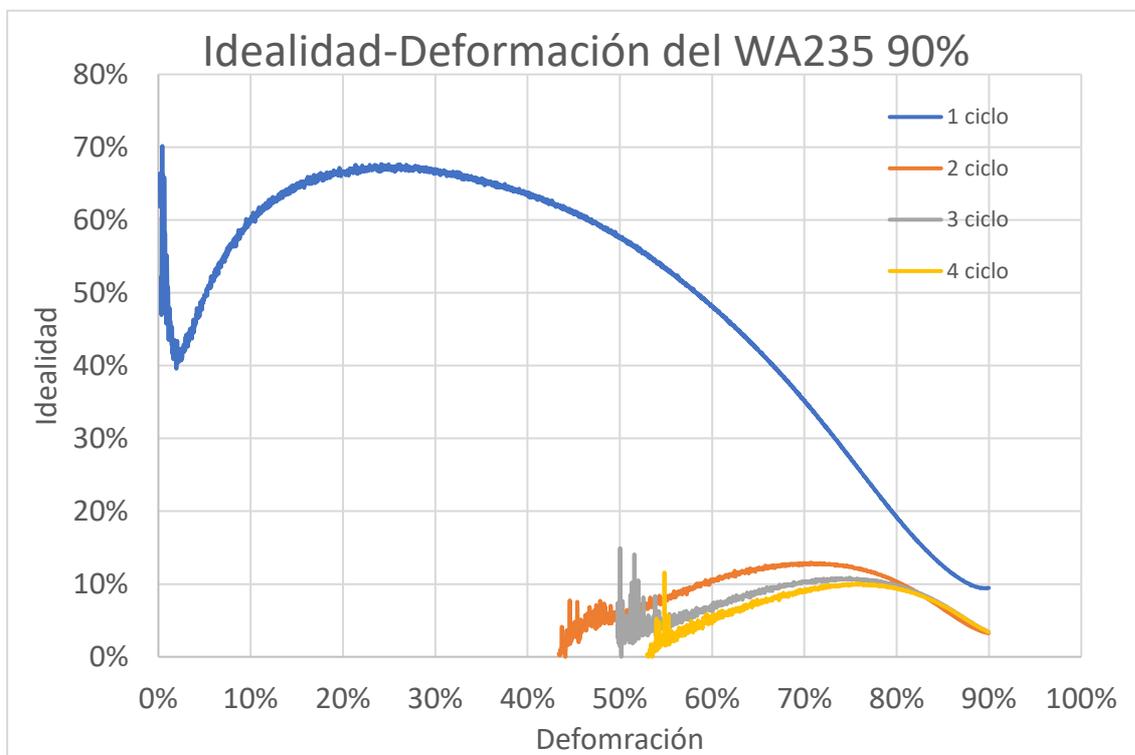


Figura 147

M.2.2 Ensayos al 75%

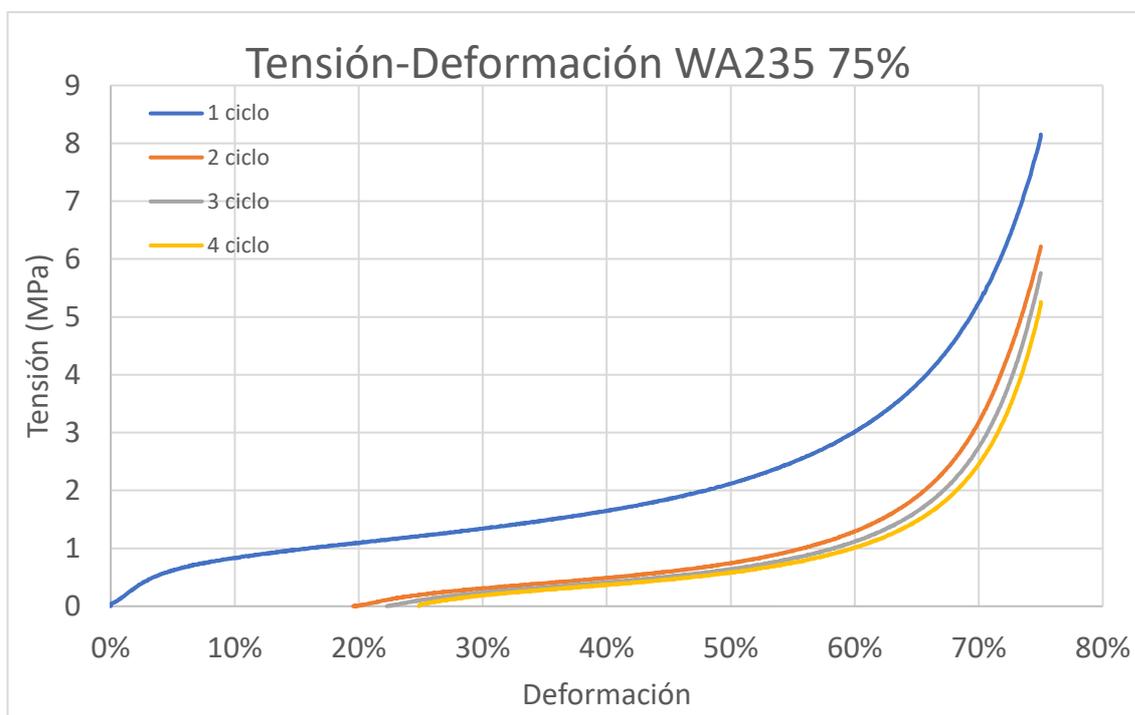


Figura 148

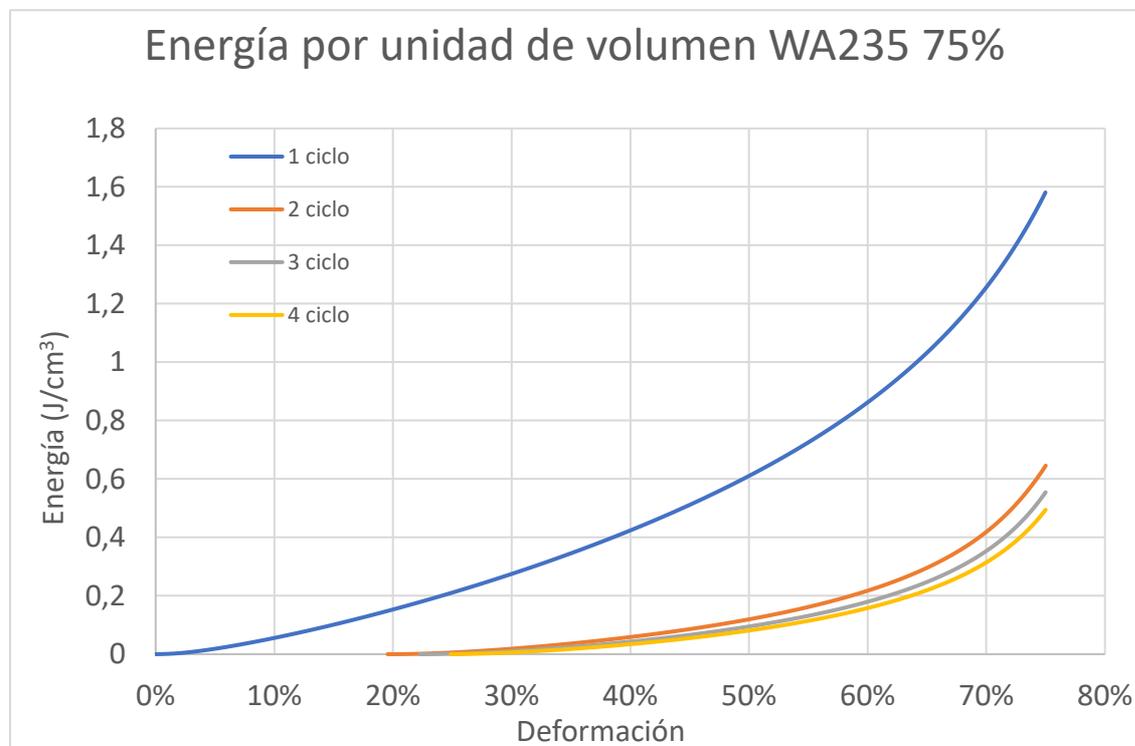


Figura 149

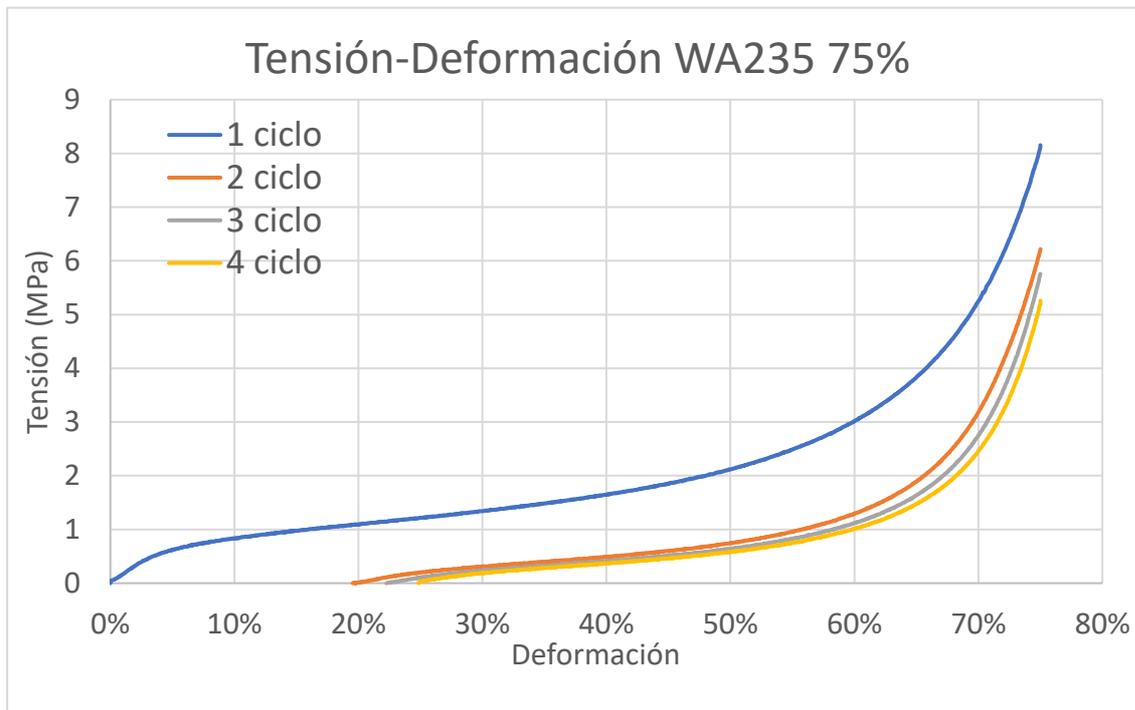


Figura 150

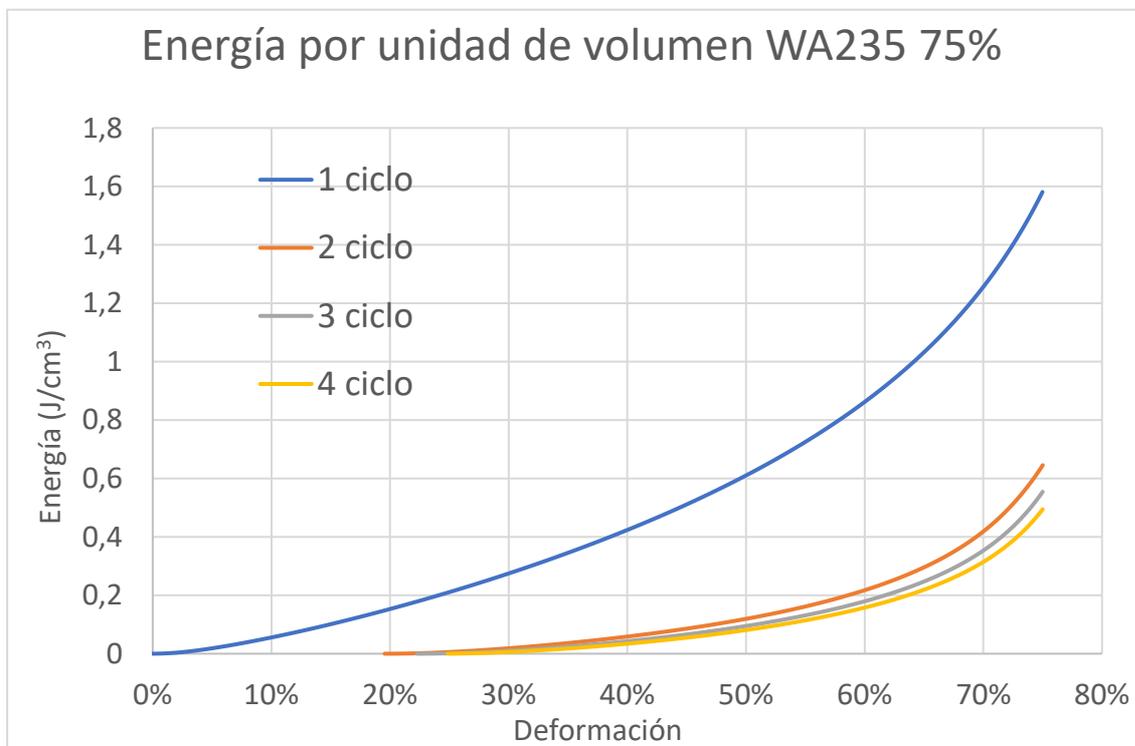


Figura 151

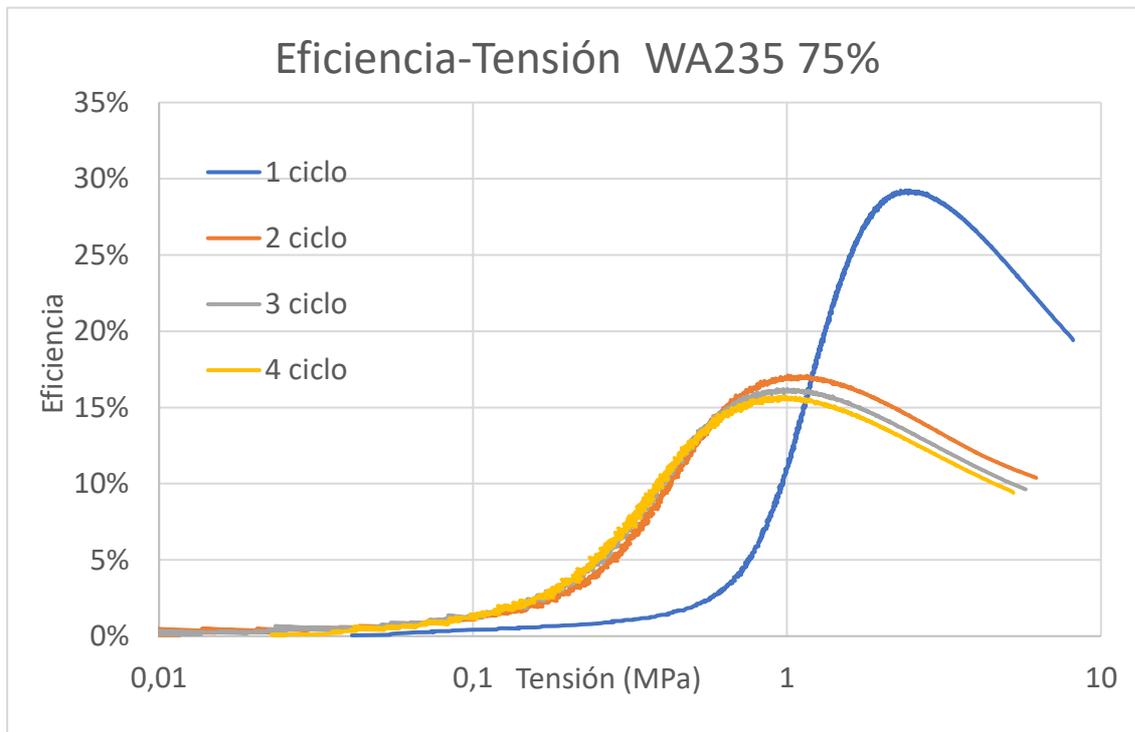


Figura 152

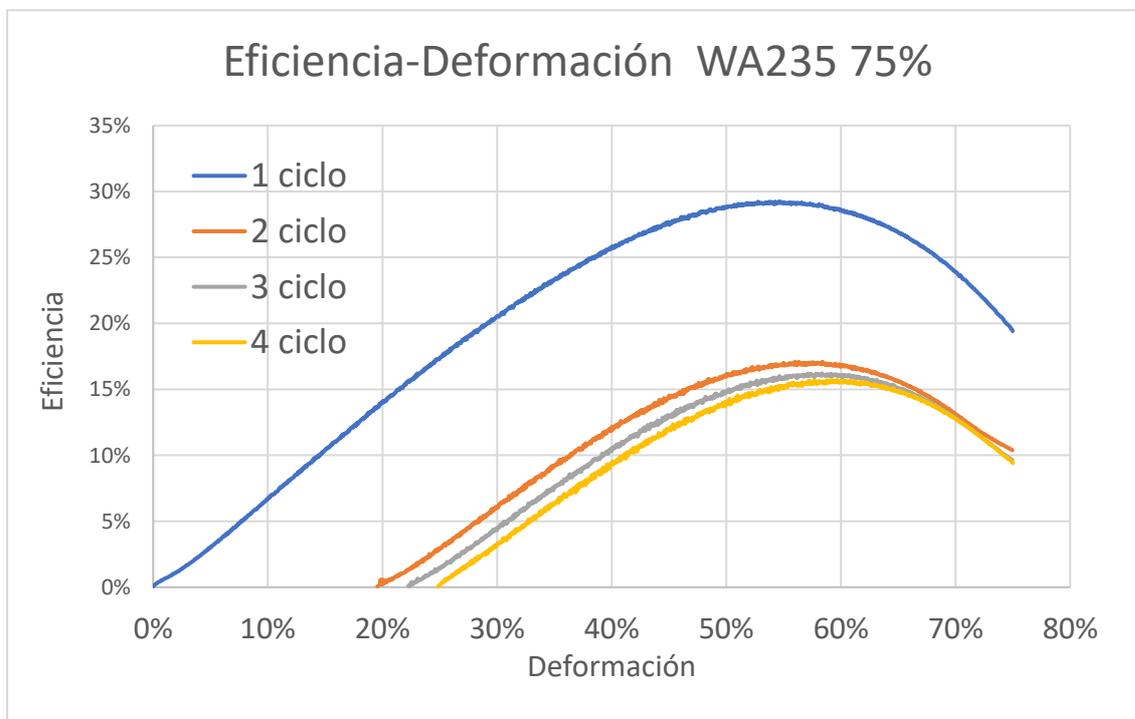


Figura 153

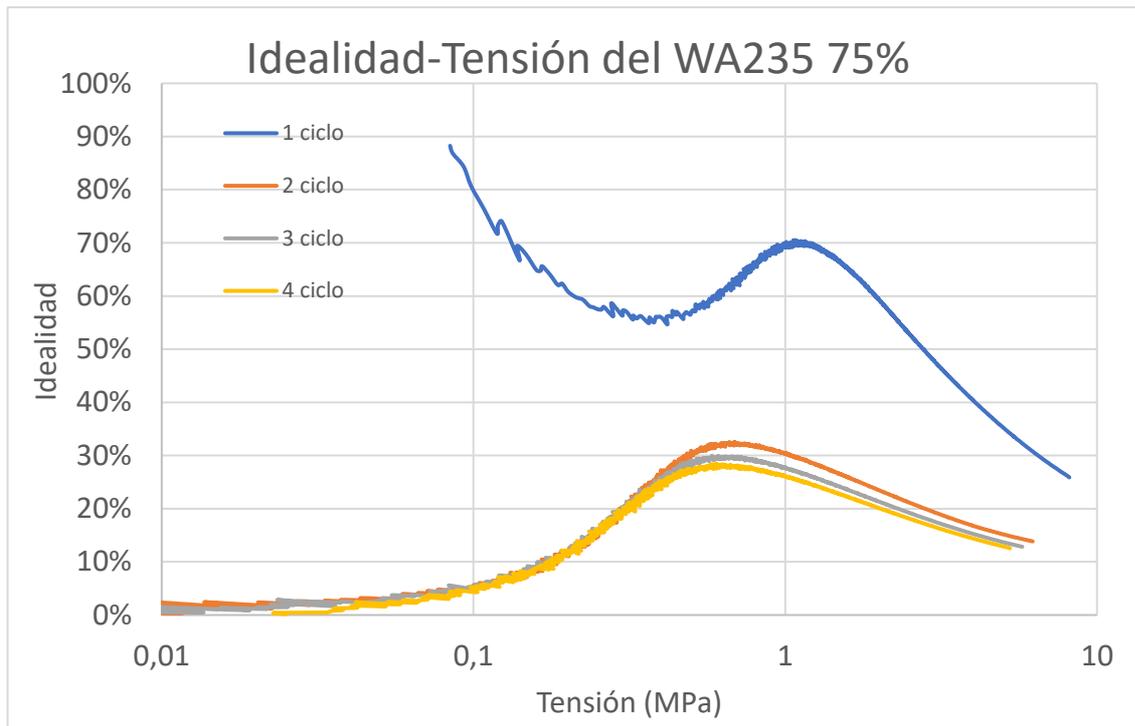


Figura 154

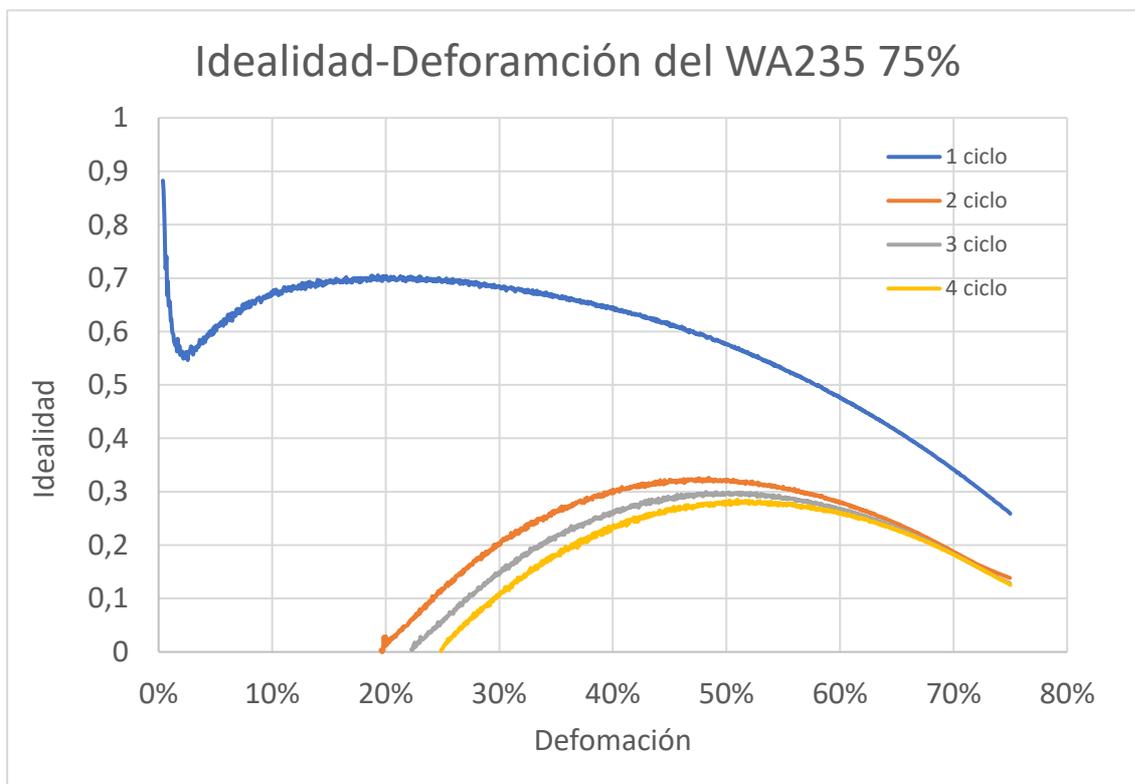


Figura 155

M.2.3 Ensayos al 62,5%

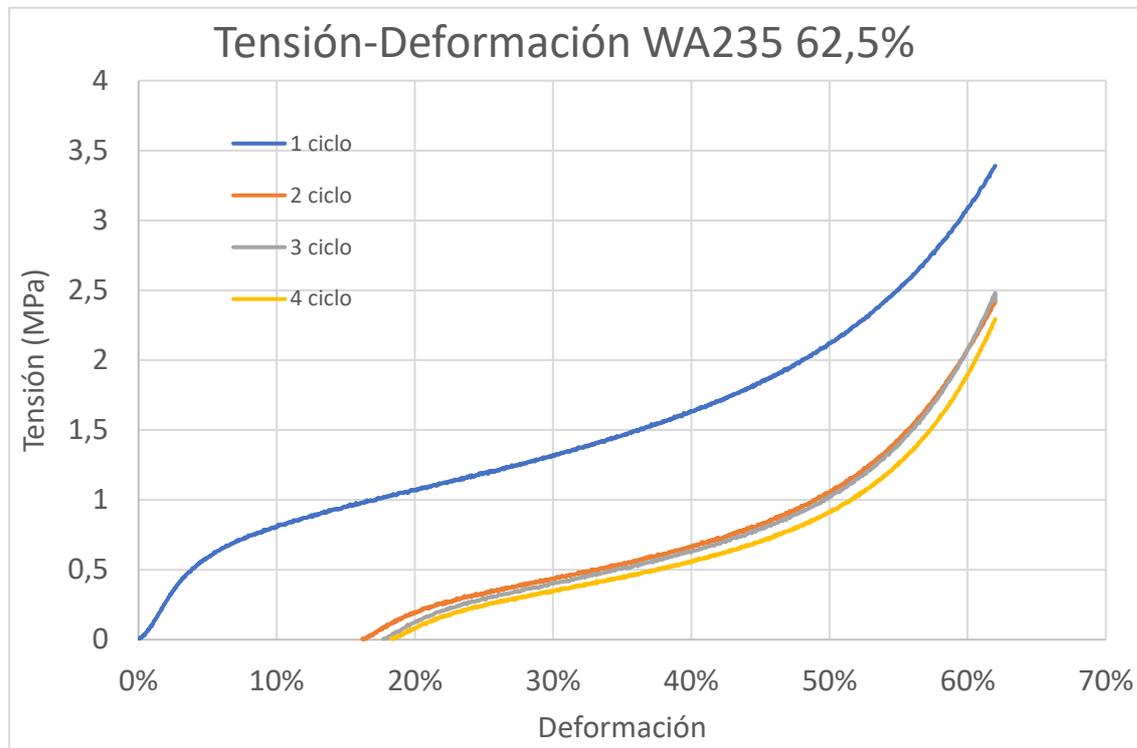


Figura 156

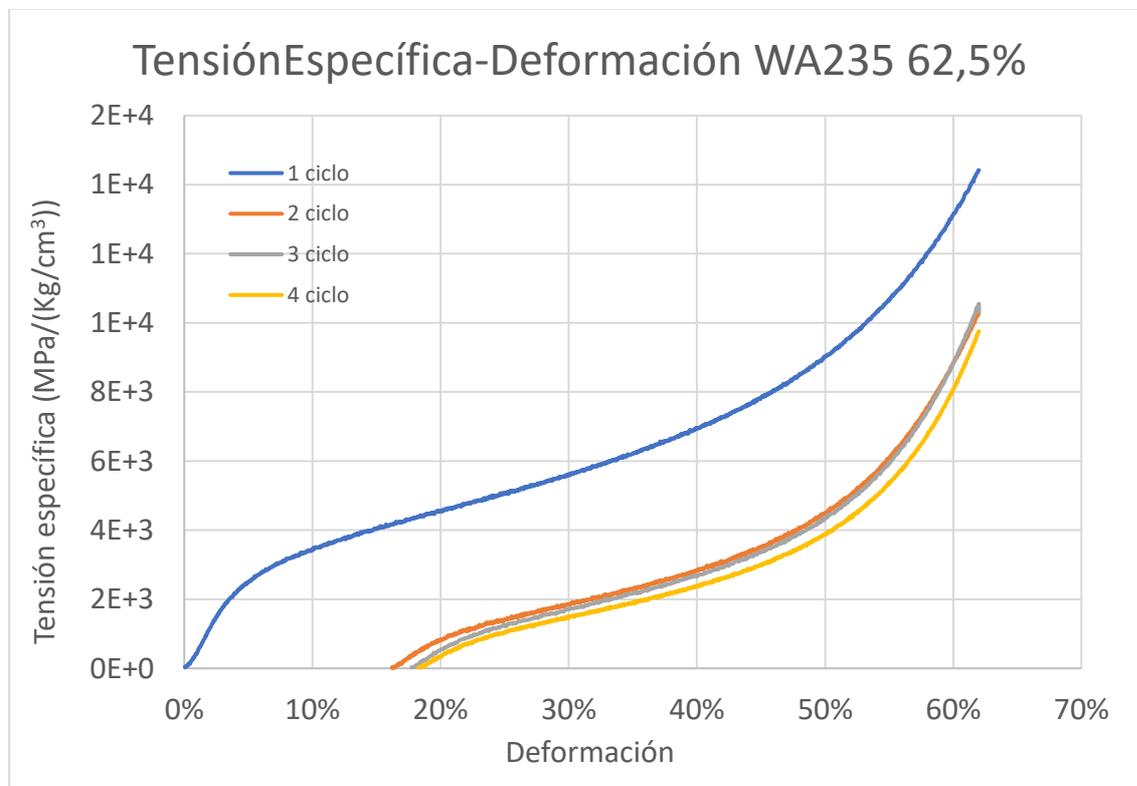


Figura 157

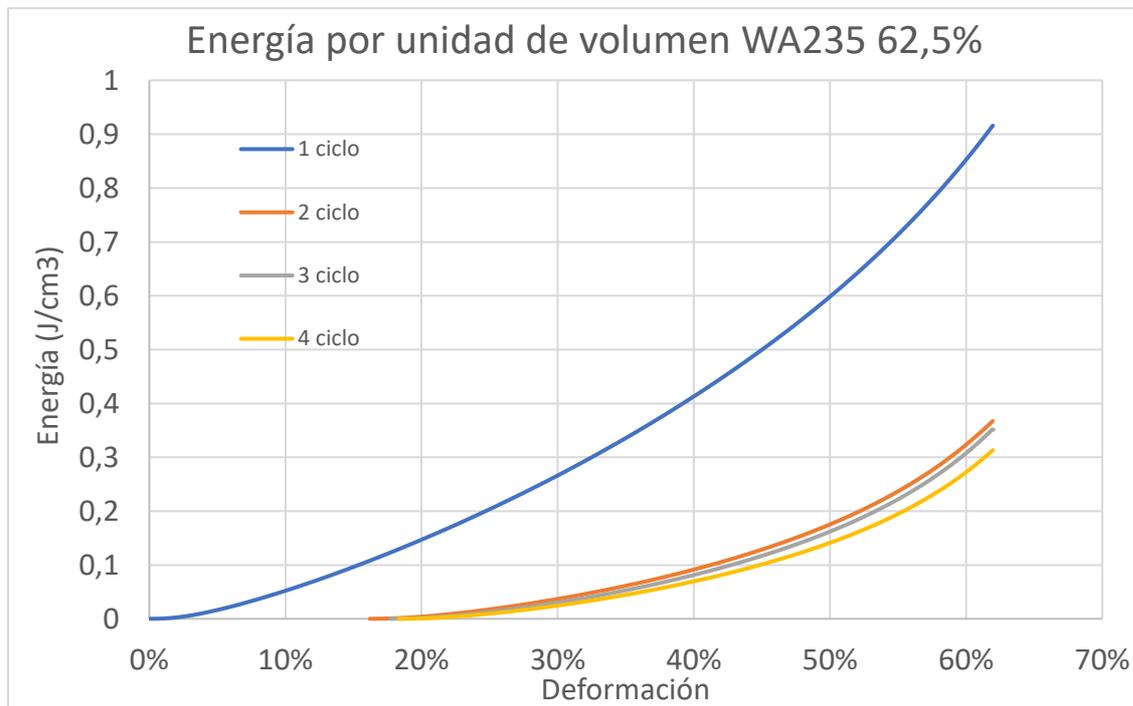


Figura 158

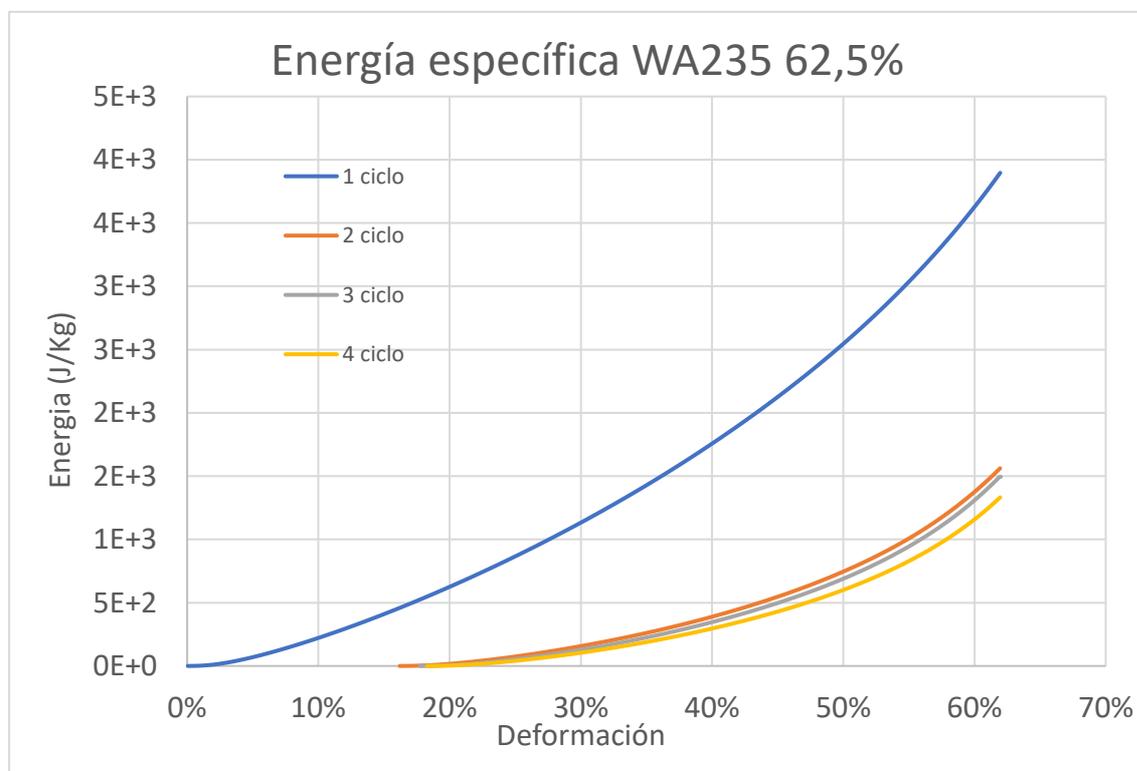


Figura 159

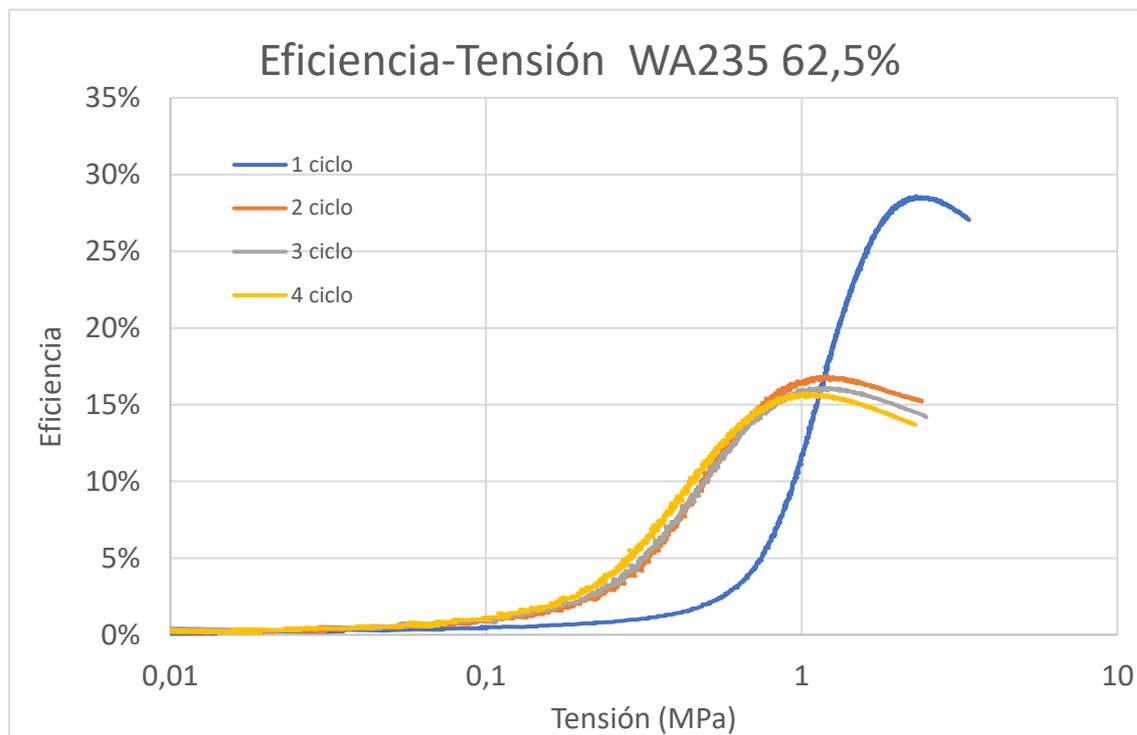


Figura 160

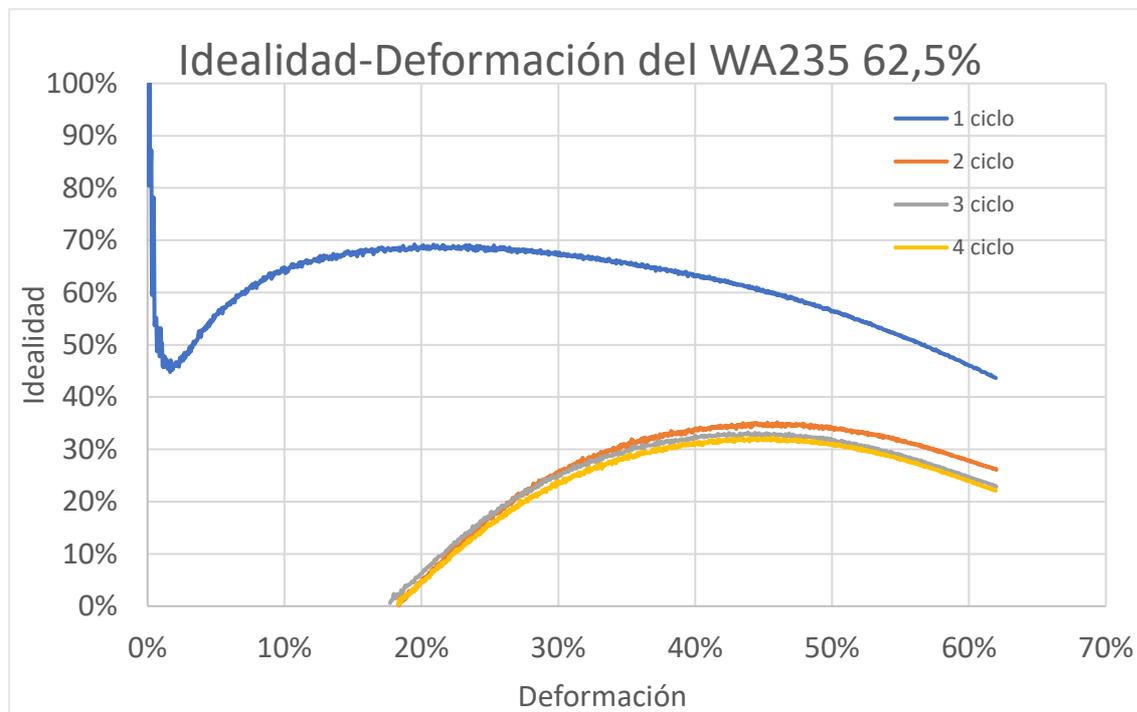


Figura 161

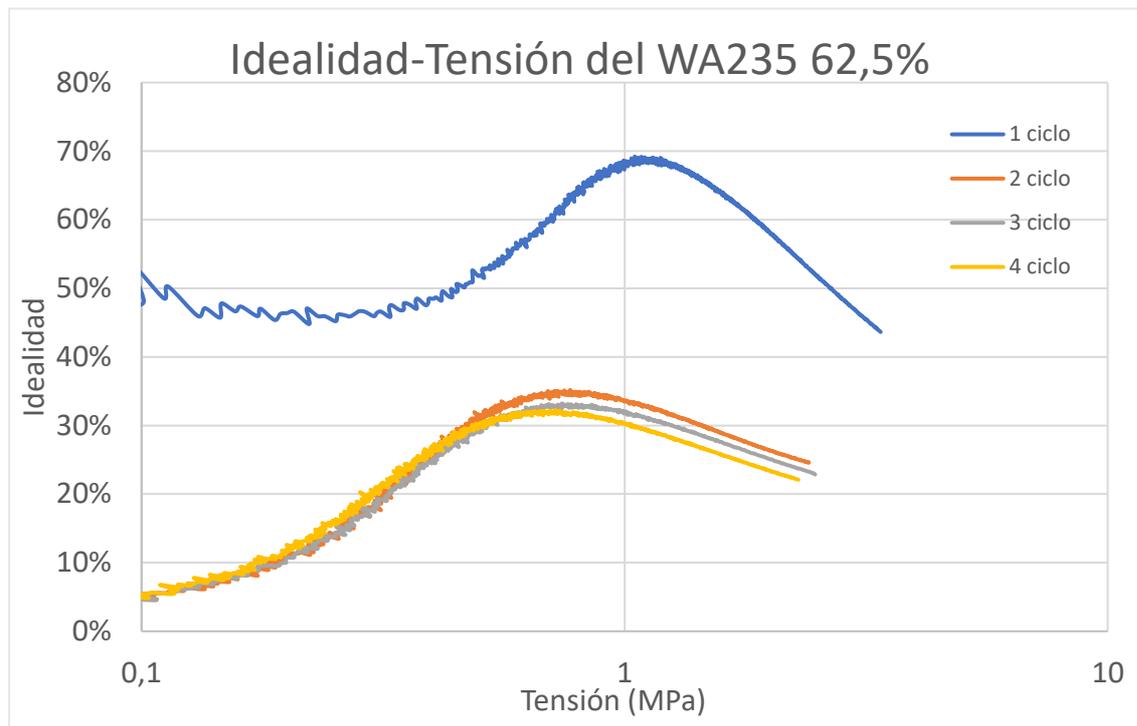


Figura 163

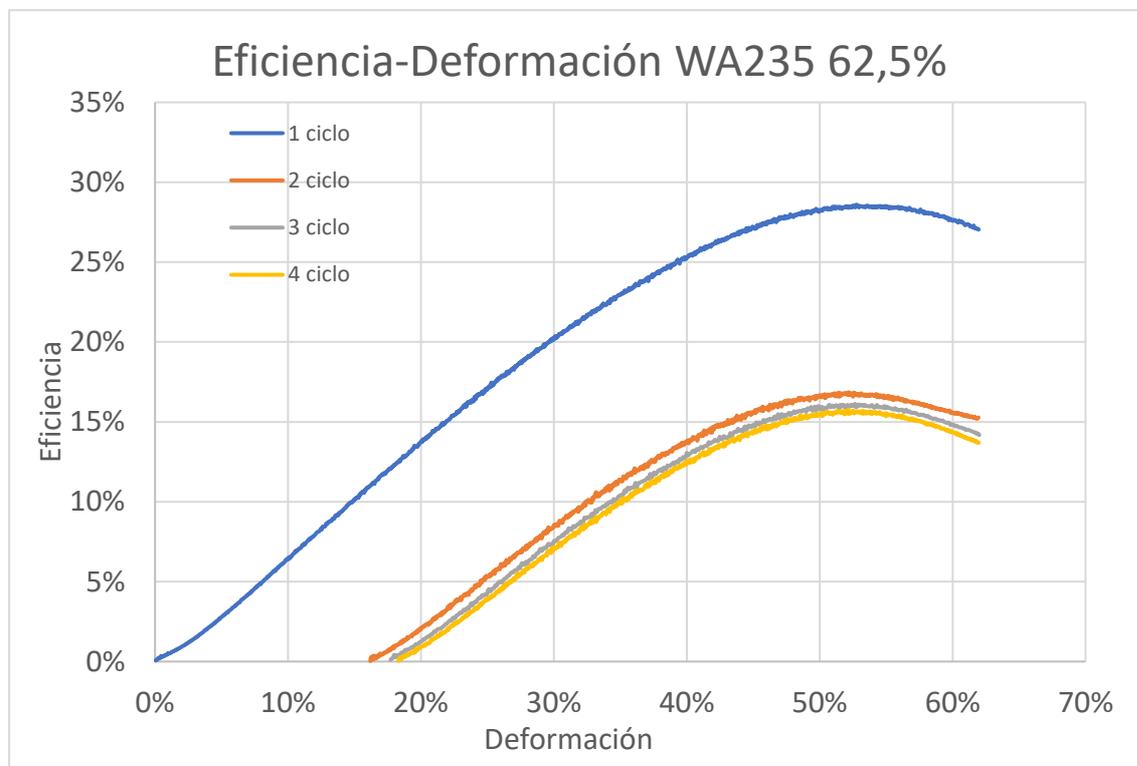


Figura 162

M.2.4 Ensayos al 50%

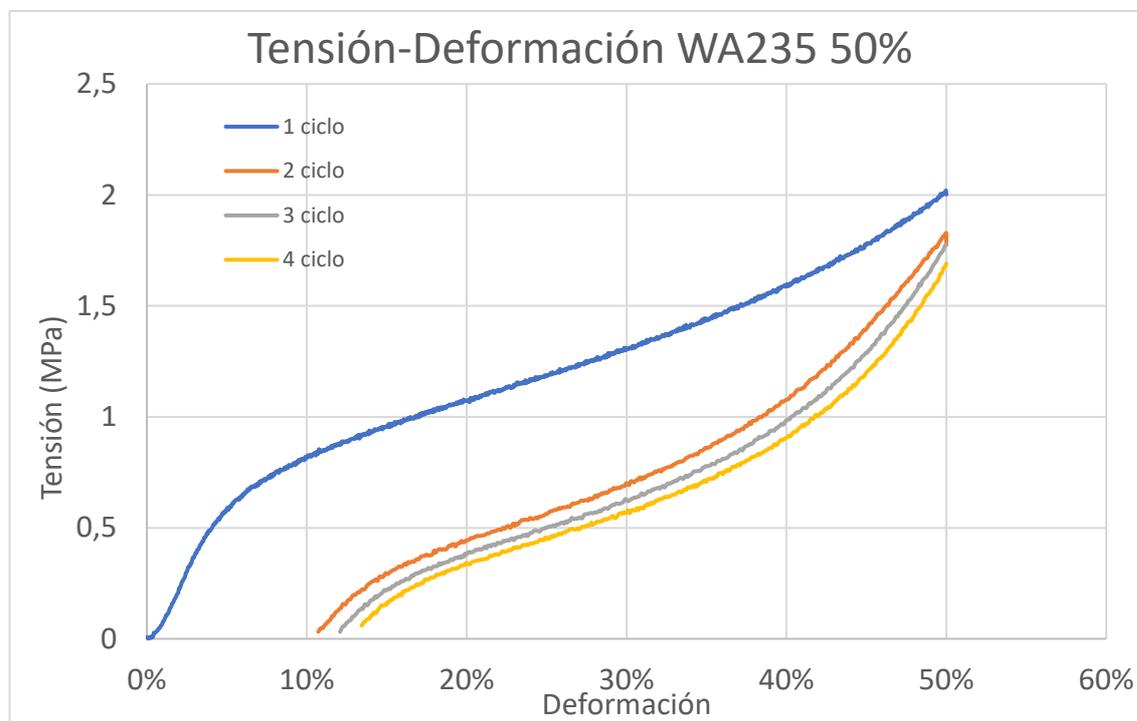


Figura 165

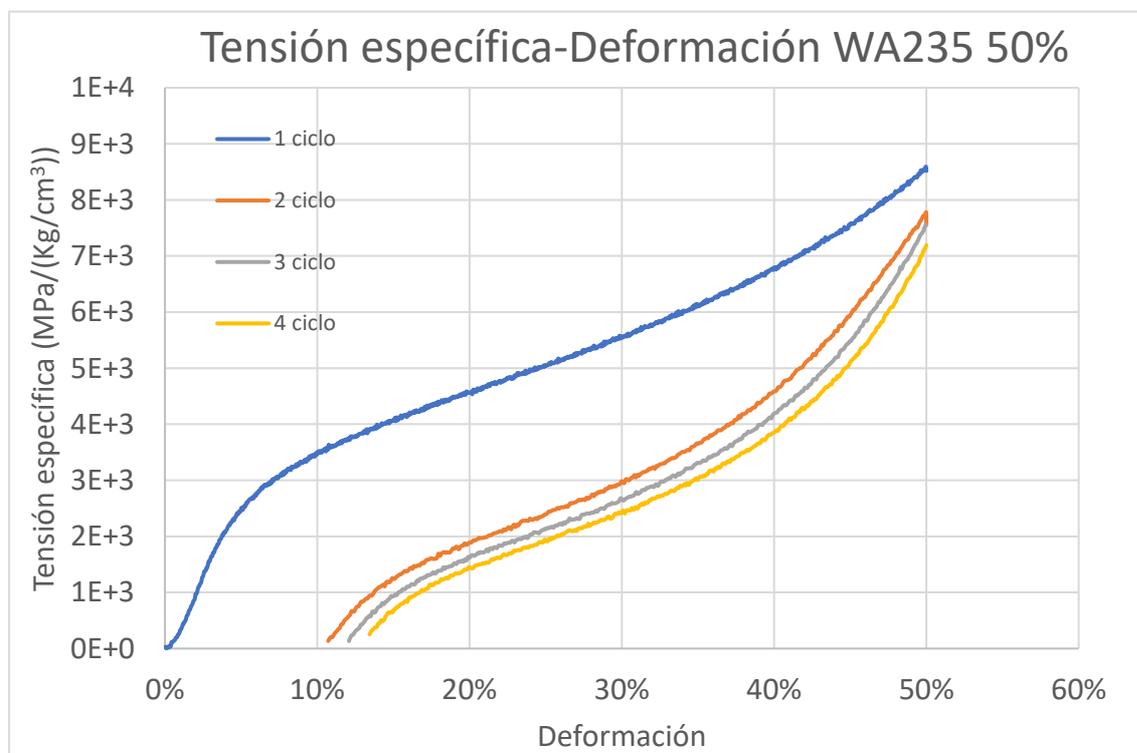


Figura 164

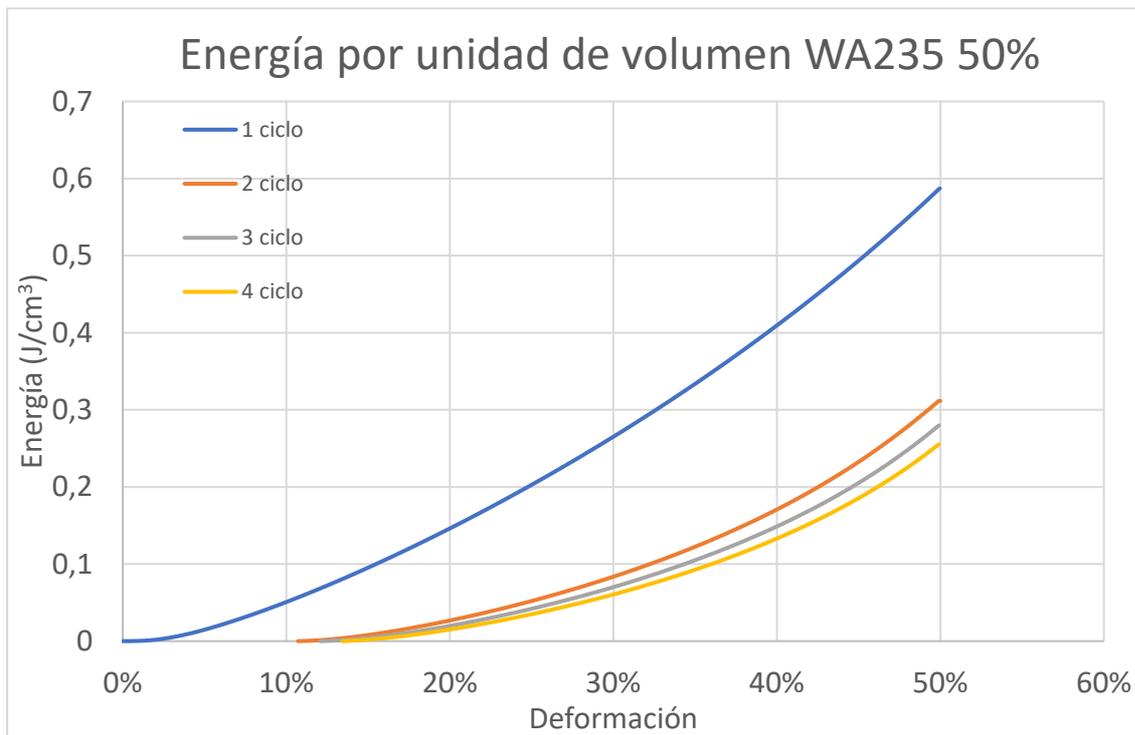


Figura 167

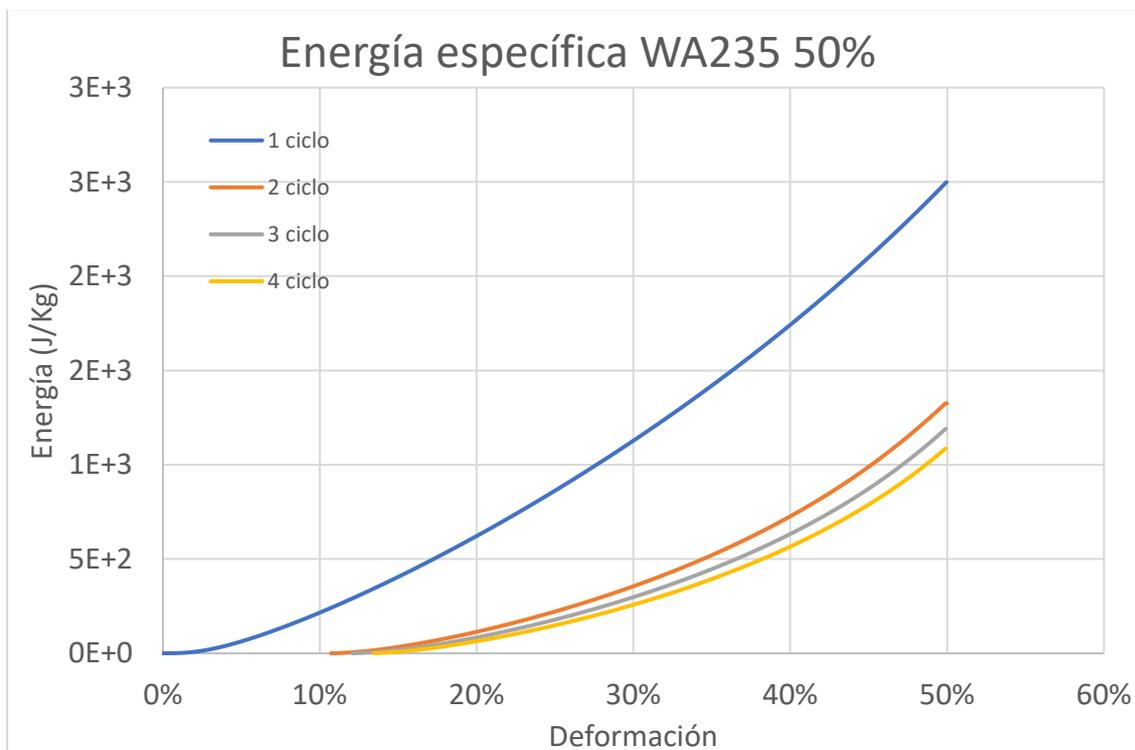


Figura 166

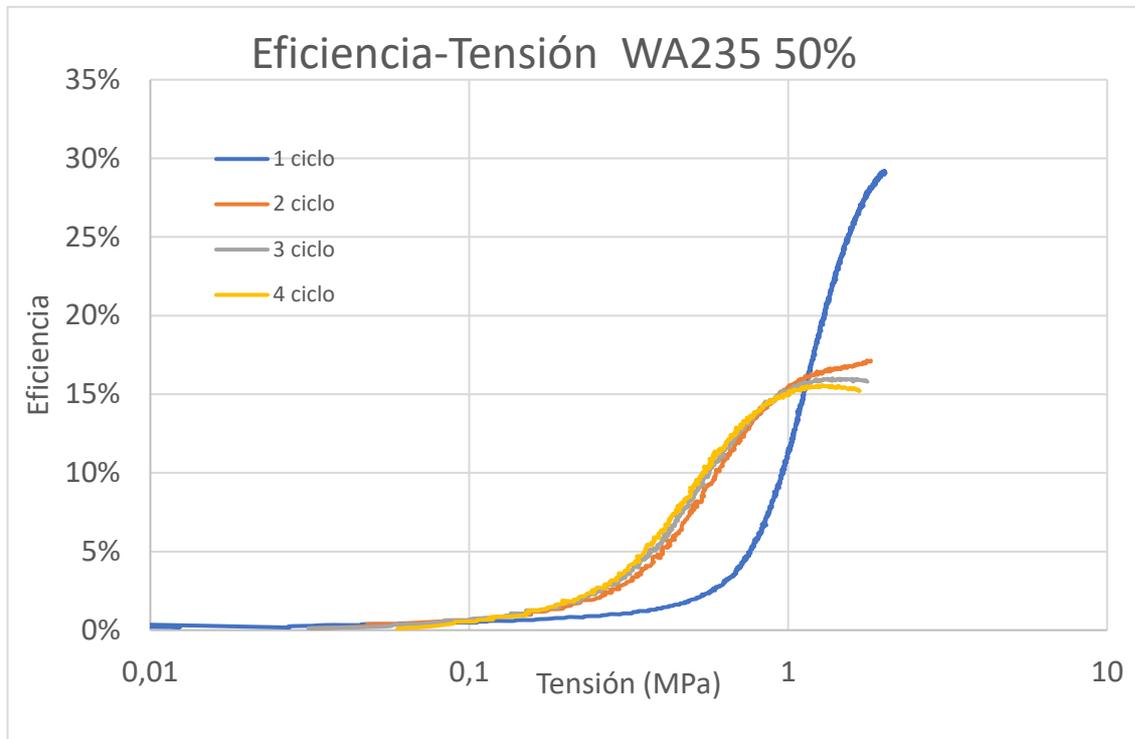


Figura 168

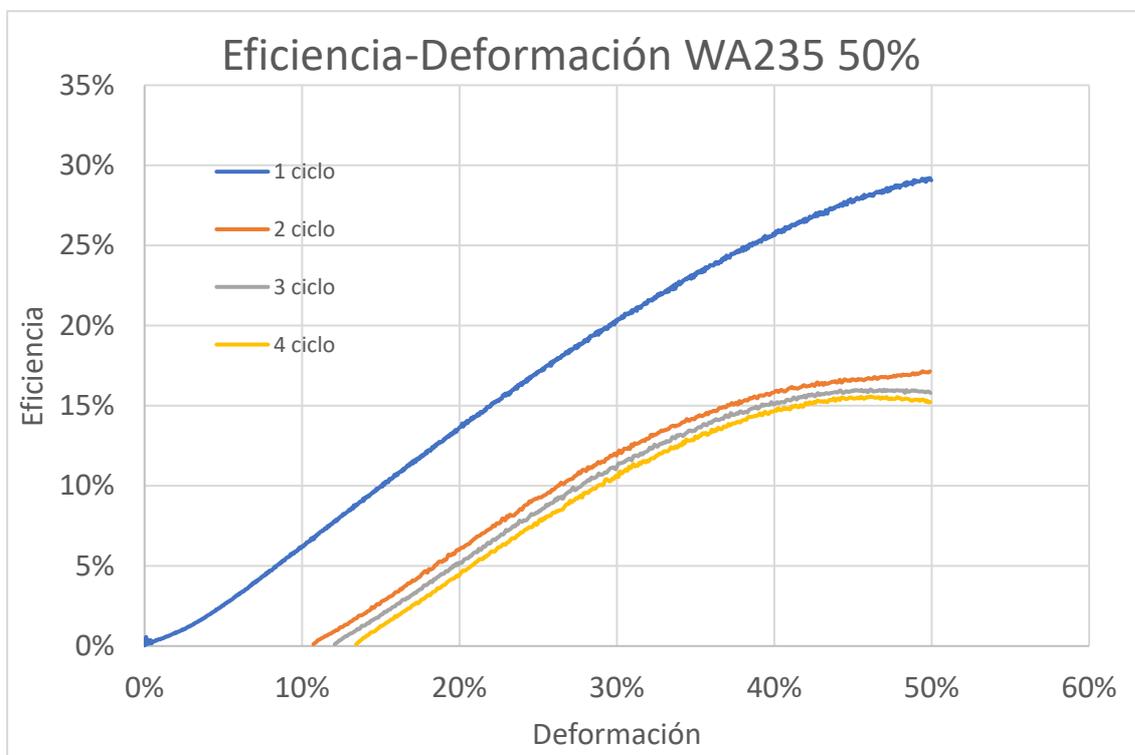


Figura 169

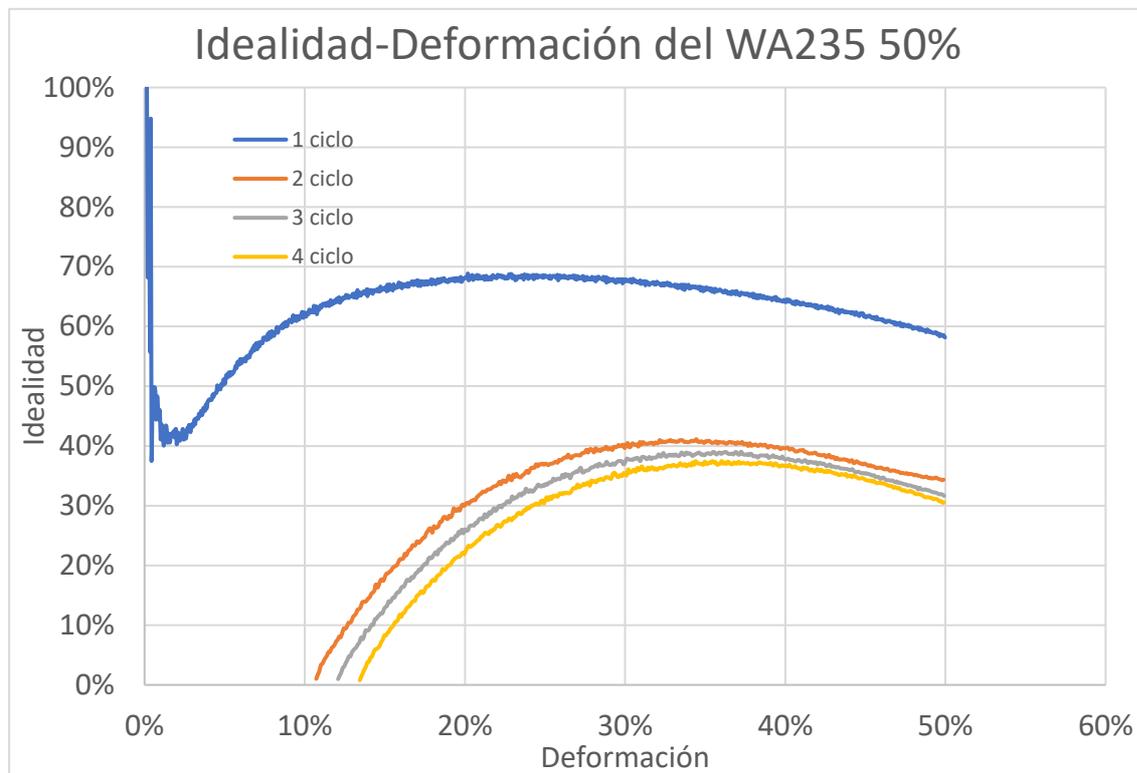


Figura 170

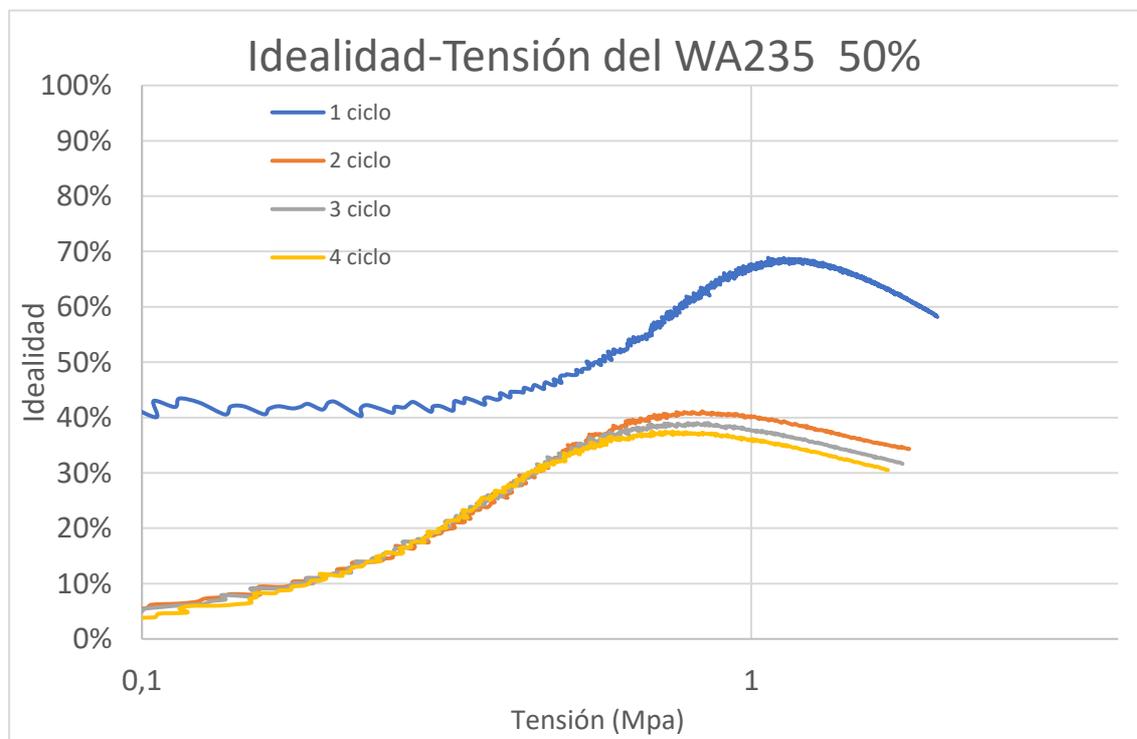


Figura 171

M.3 WA255

M.3.1 Ensayos al 90%

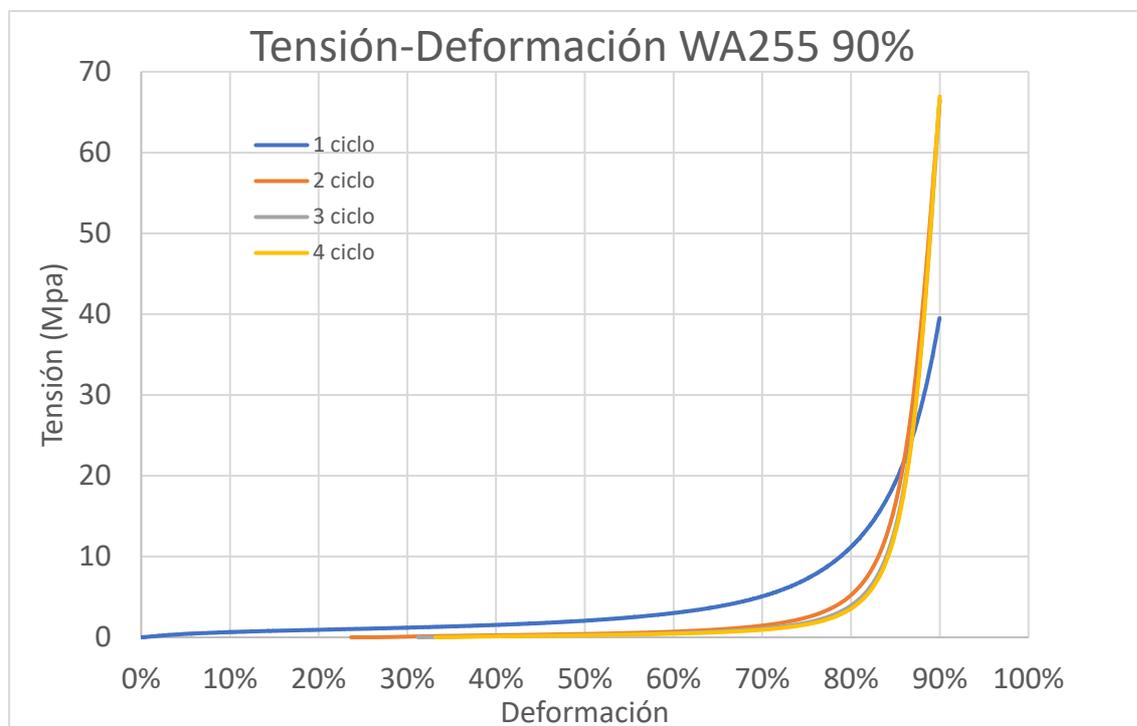


Figura 172

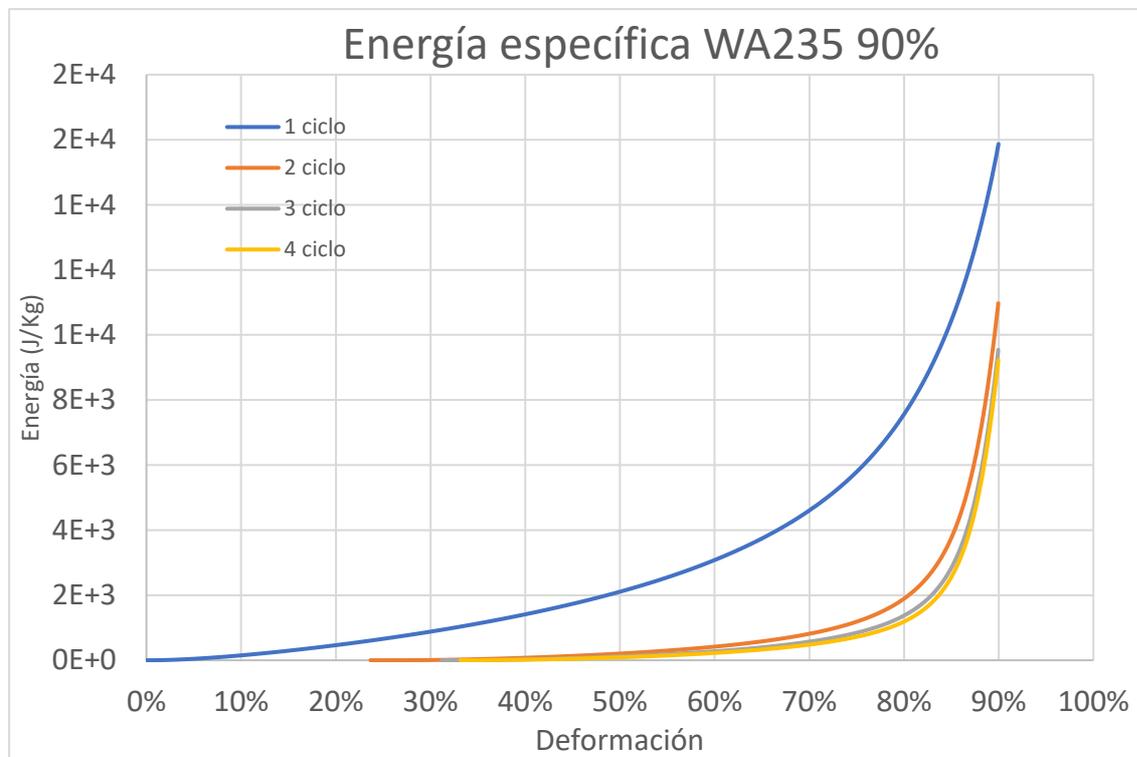


Figura 173

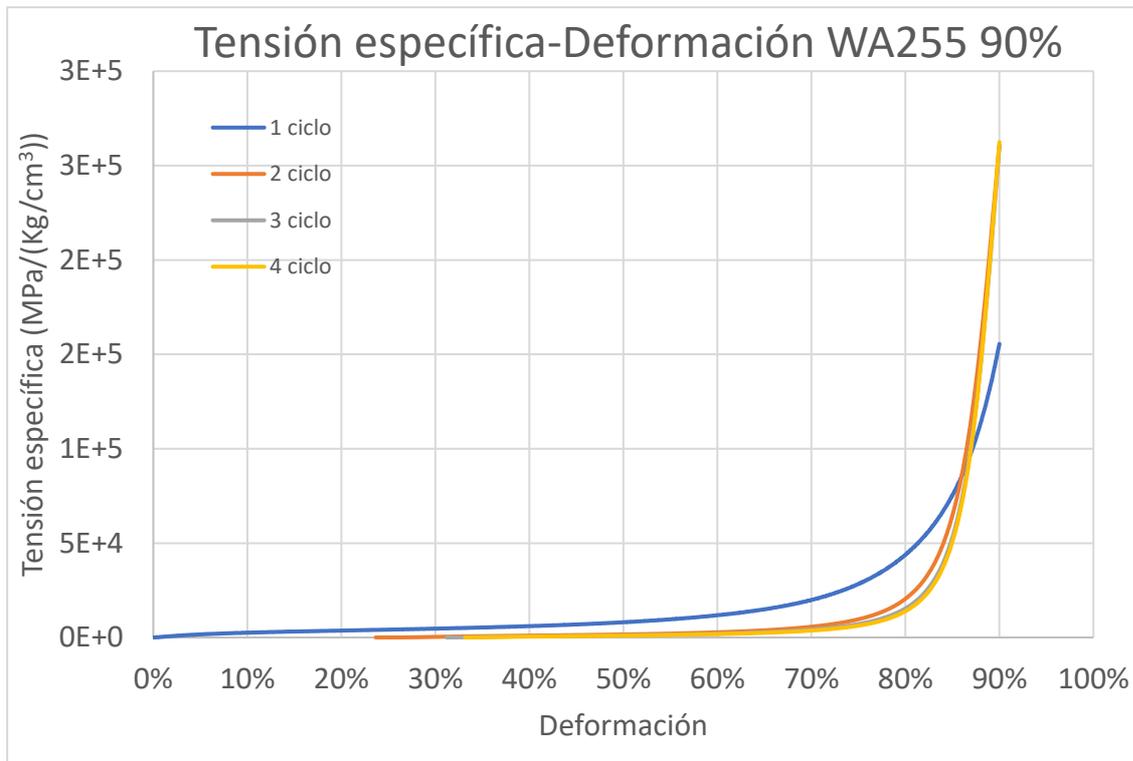


Figura 174

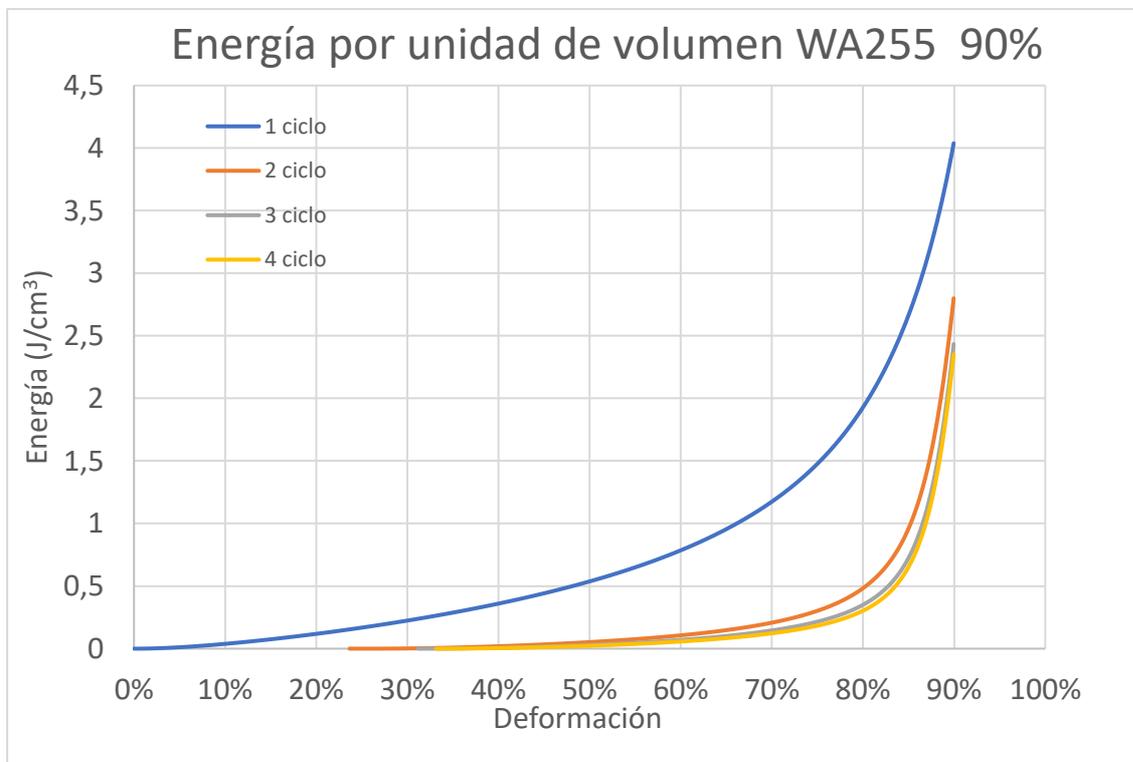


Figura 175

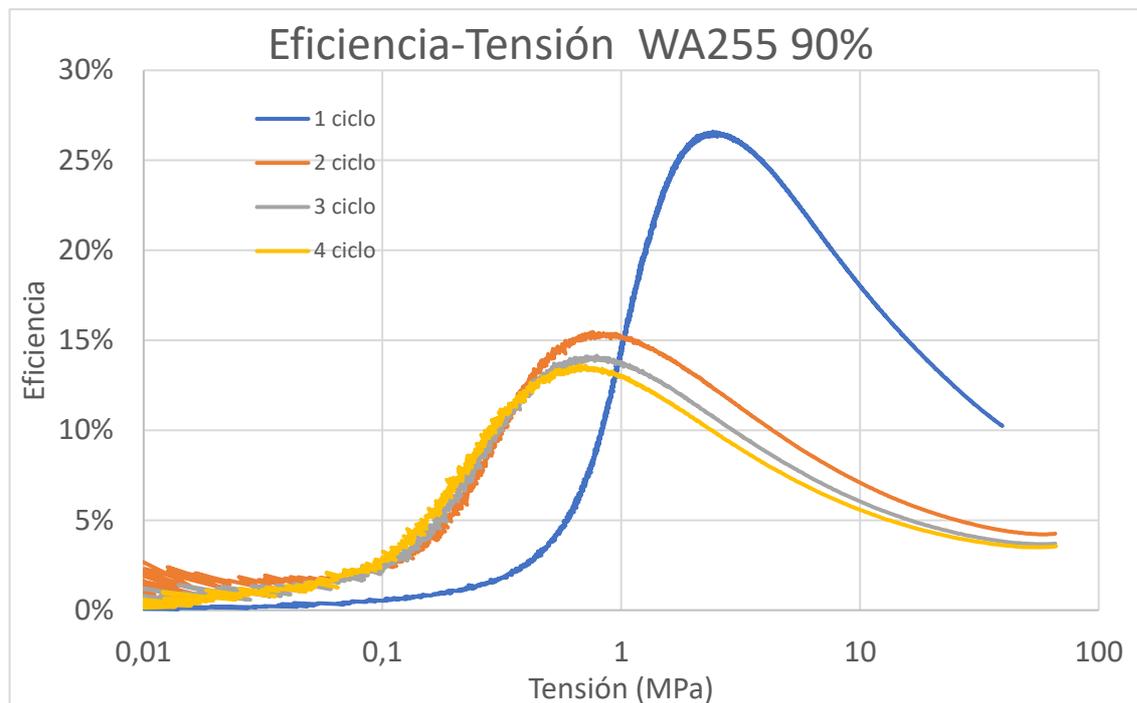


Figura 176

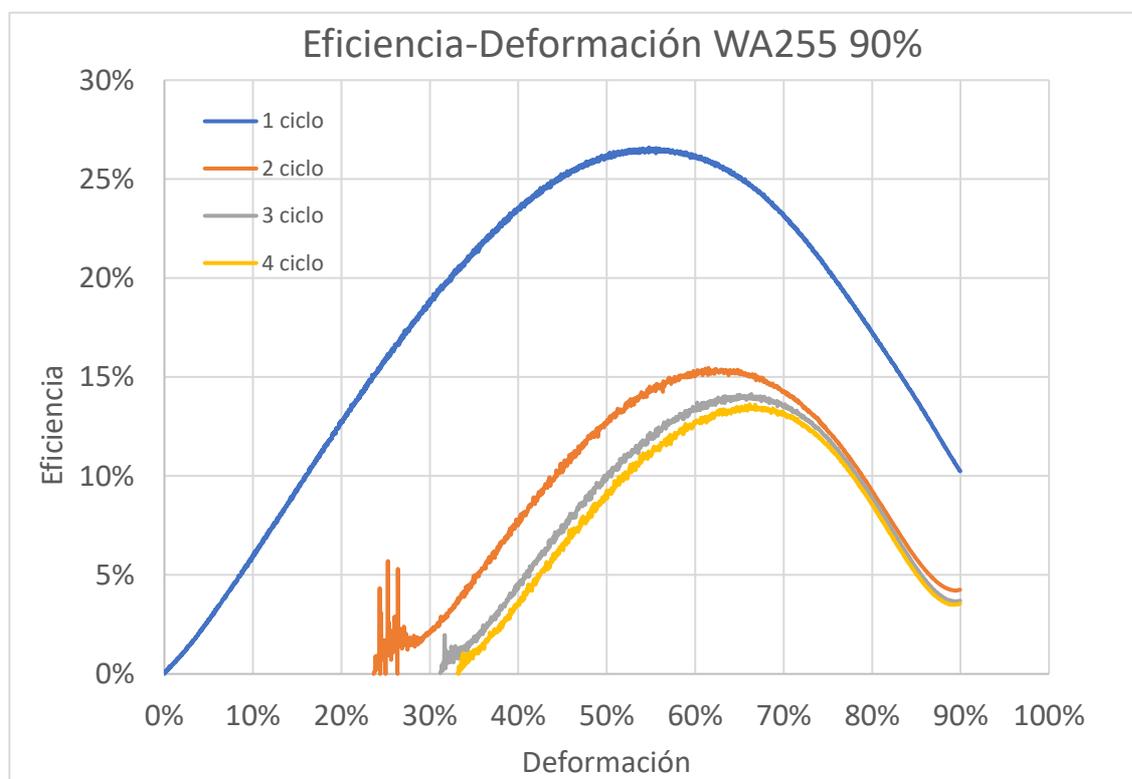


Figura 177

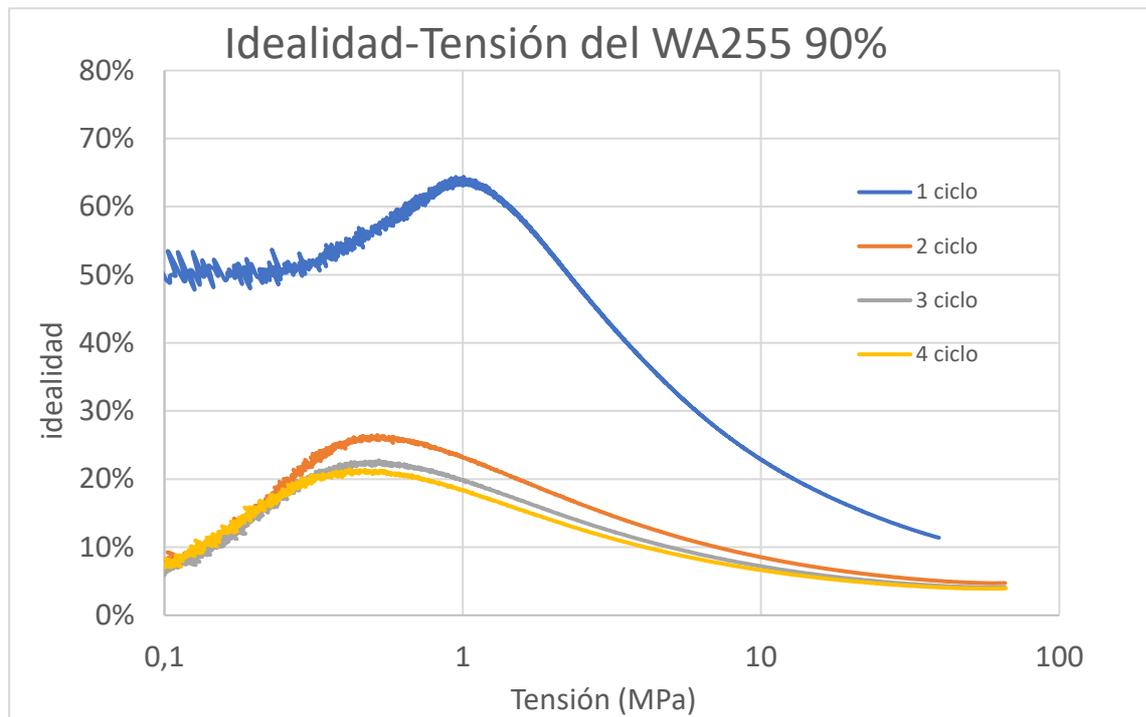


Figura 178

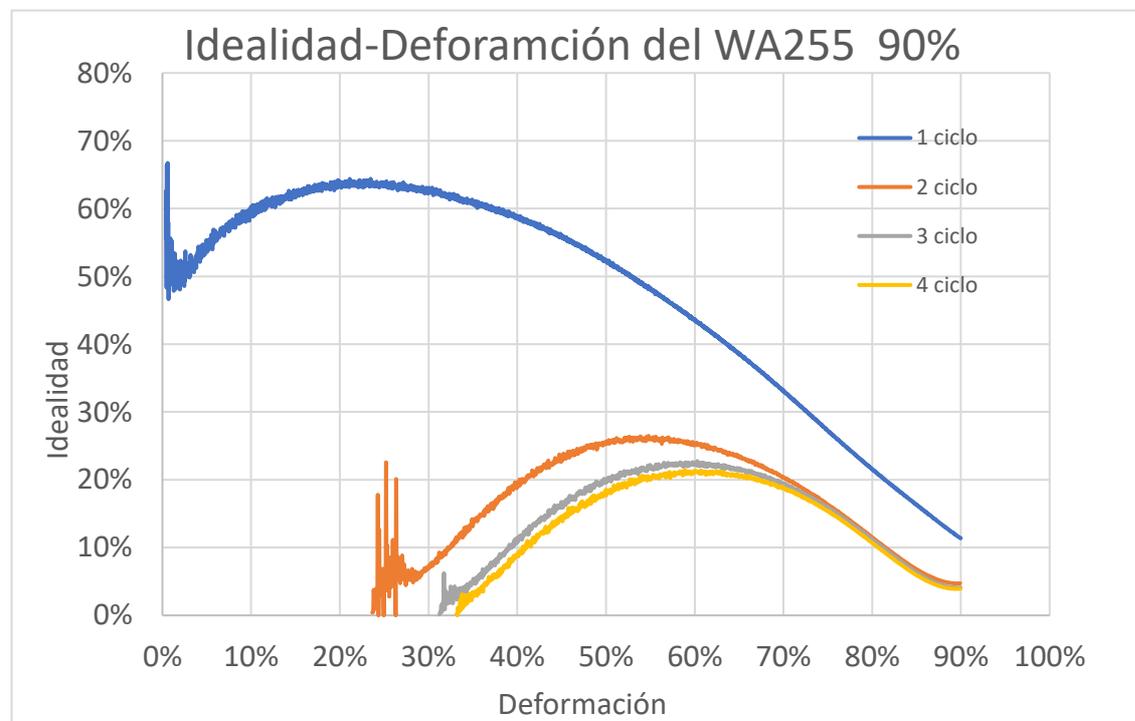


Figura 179

M.3.2 Ensayos al 75%

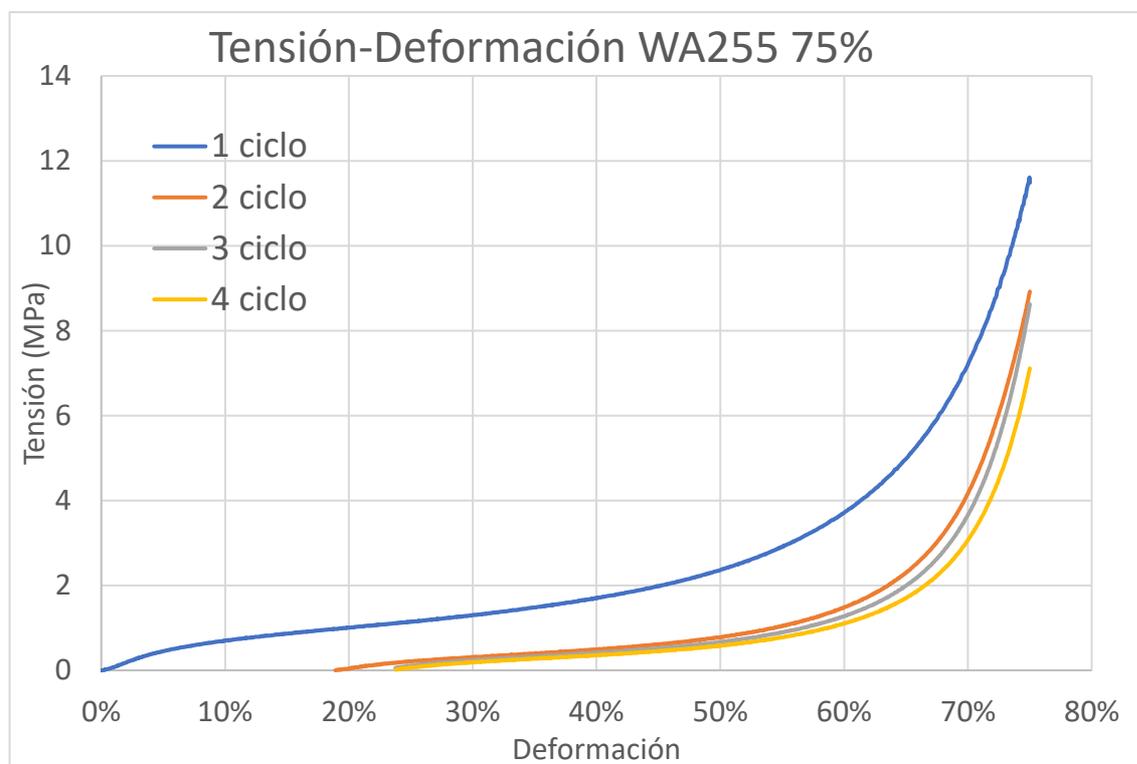


Figura 181

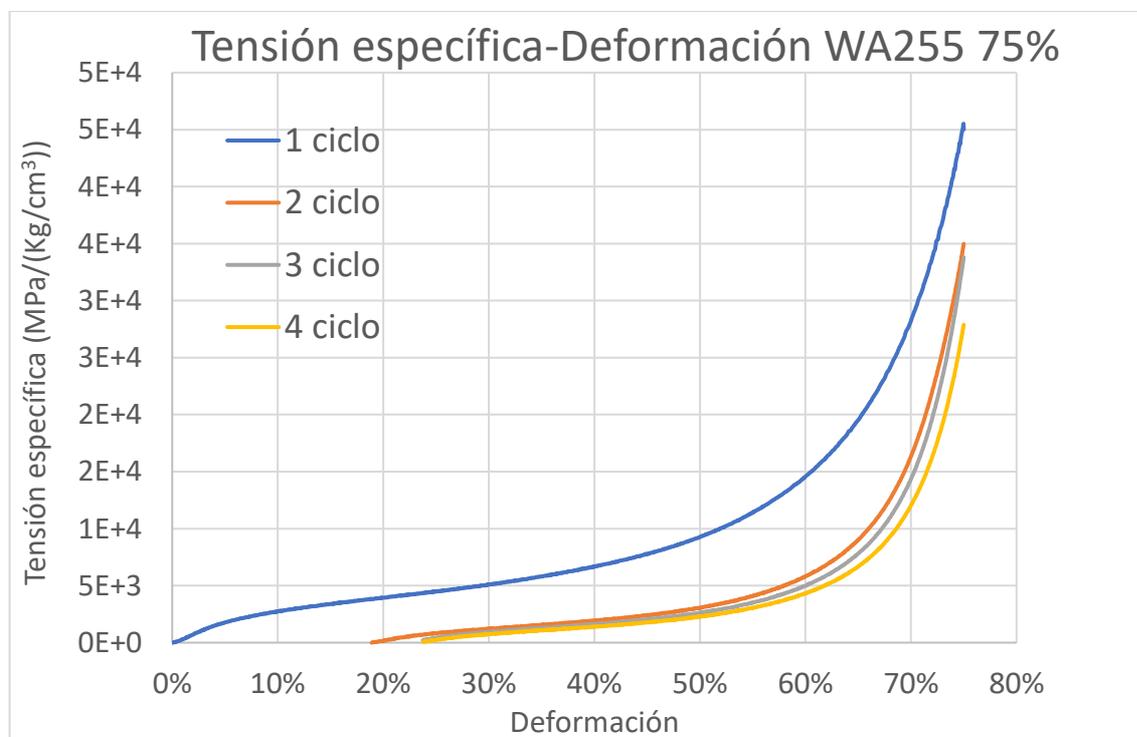


Figura 180

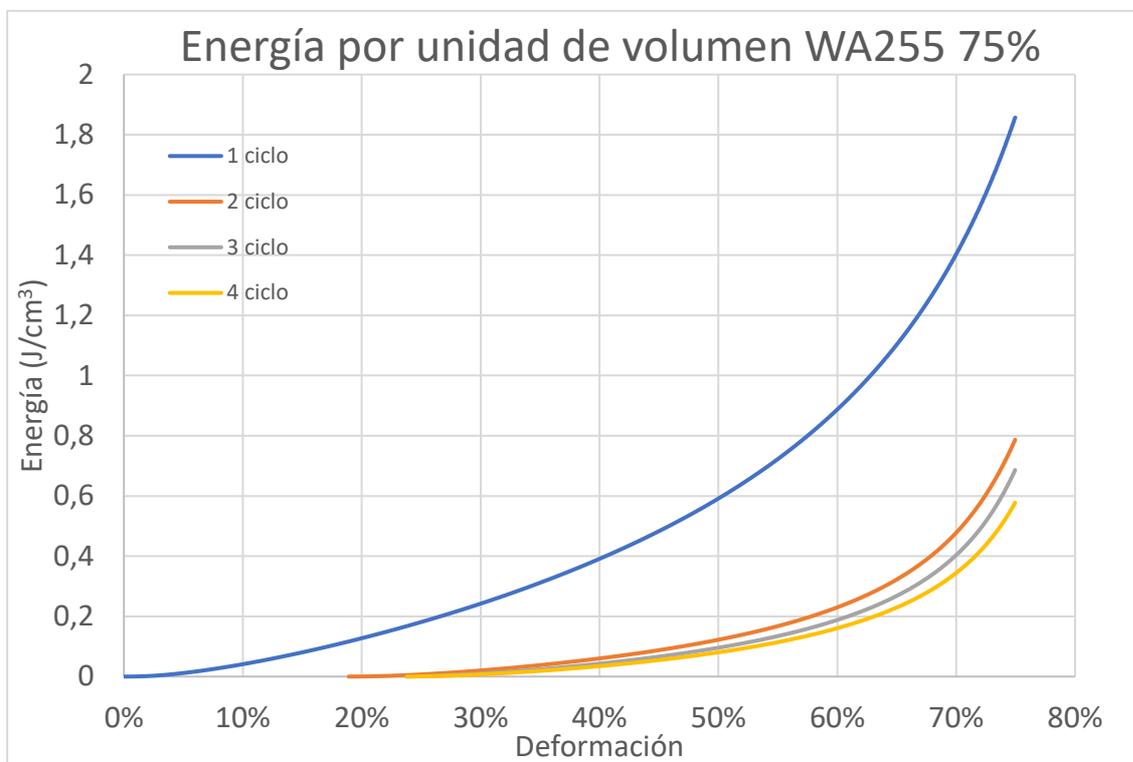


Figura 182

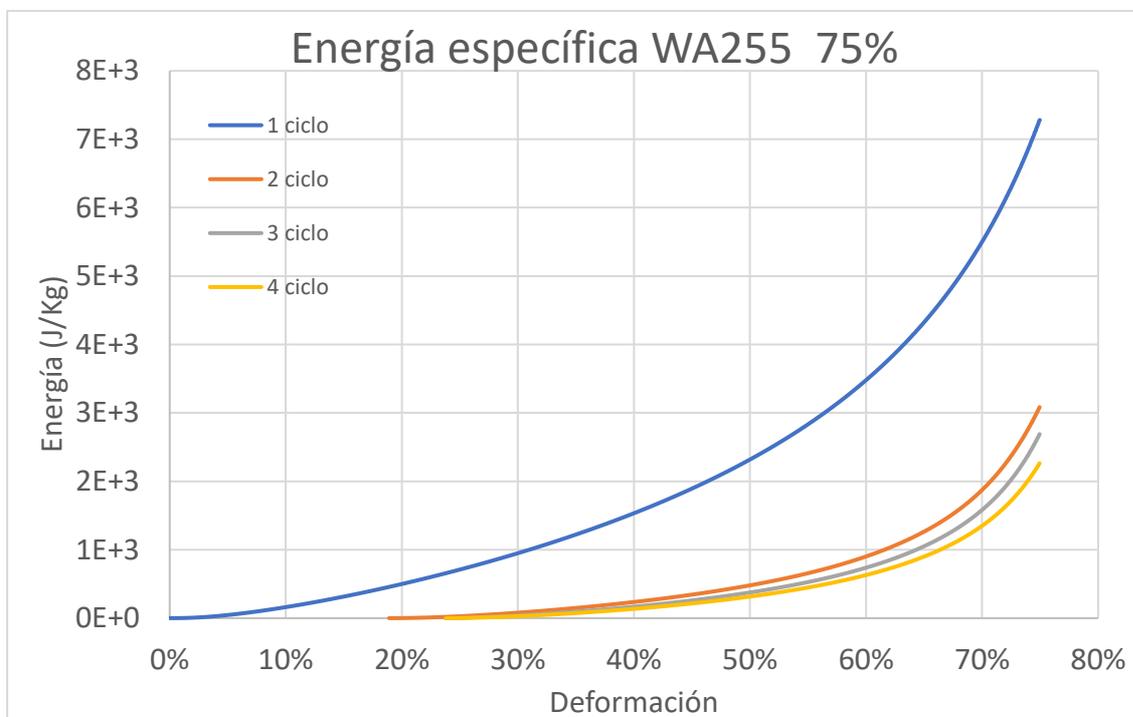


Figura 183

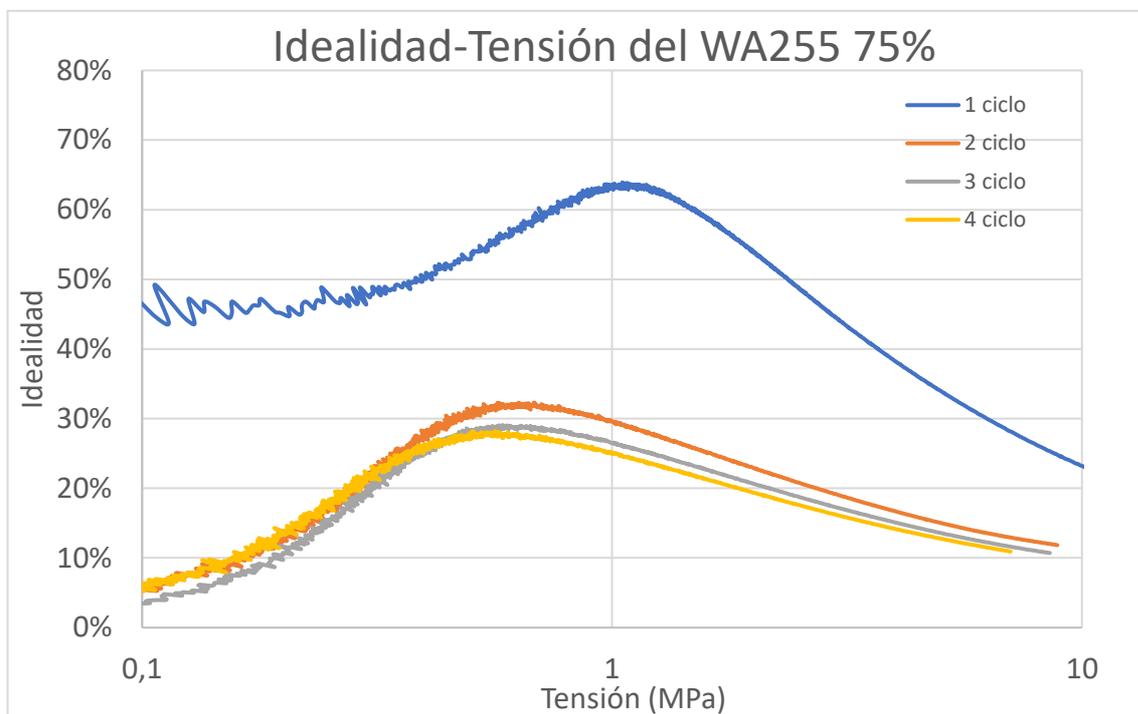


Figura 184

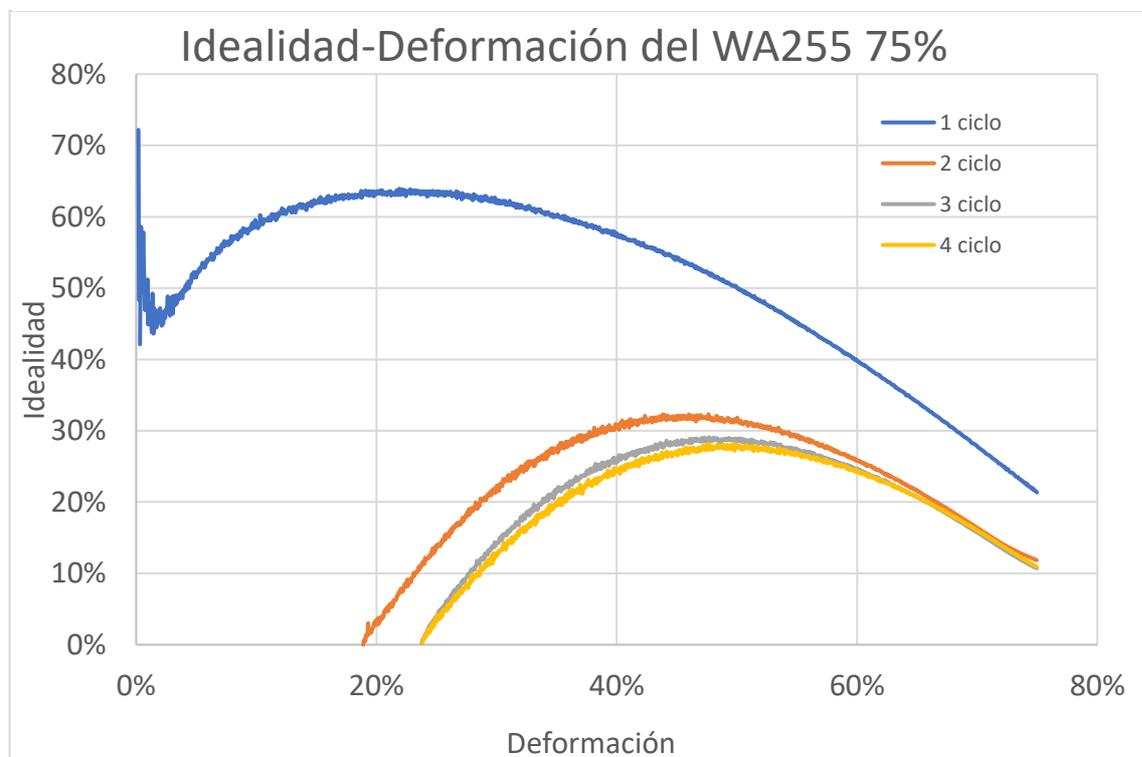


Figura 185

M.3.3 Ensayos al 62,5%

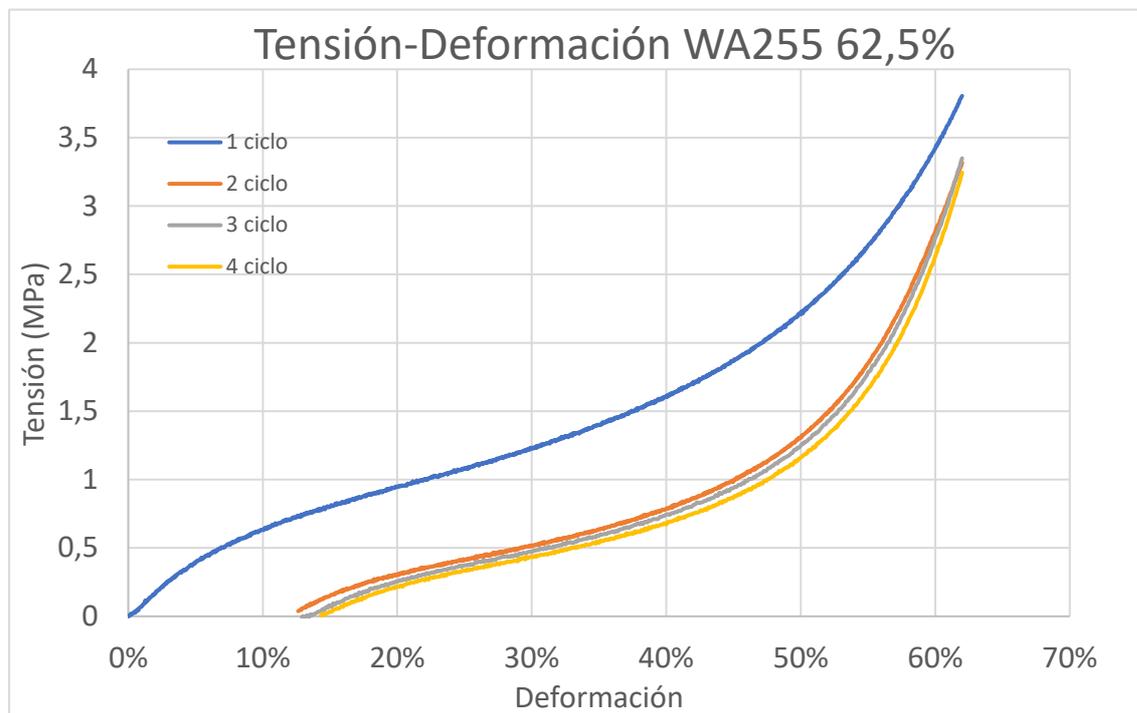


Figura 186

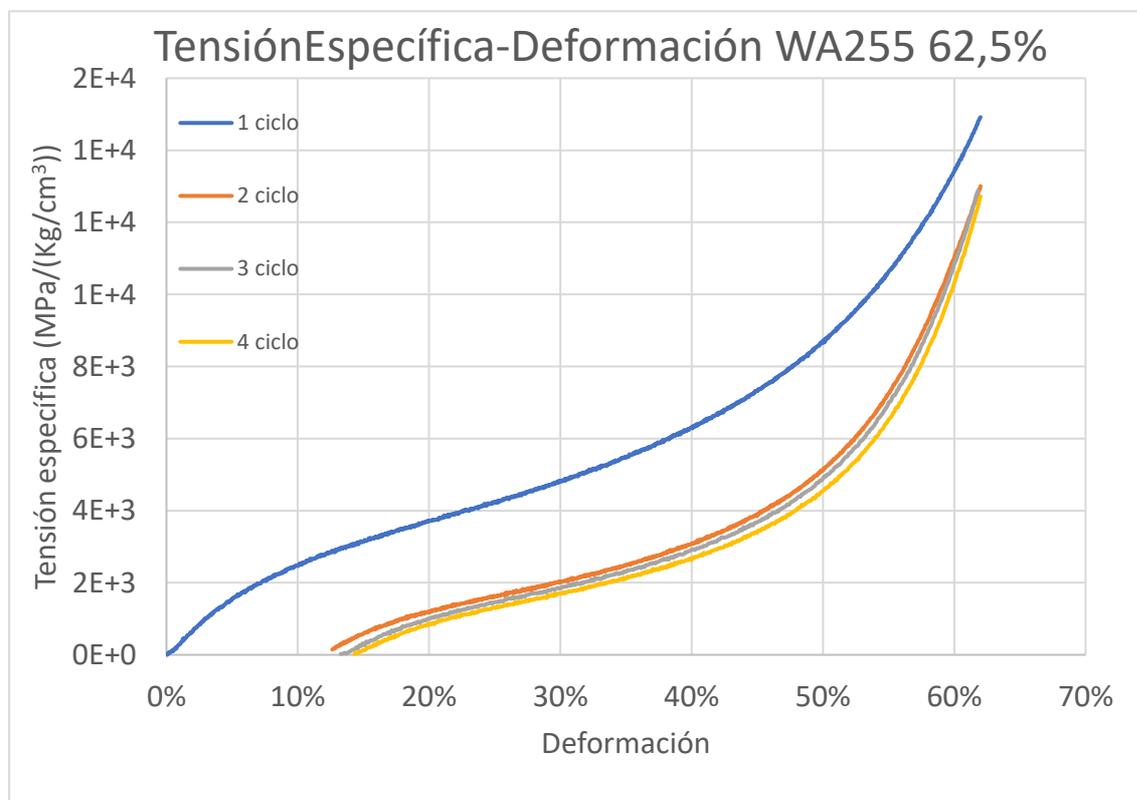


Figura 187

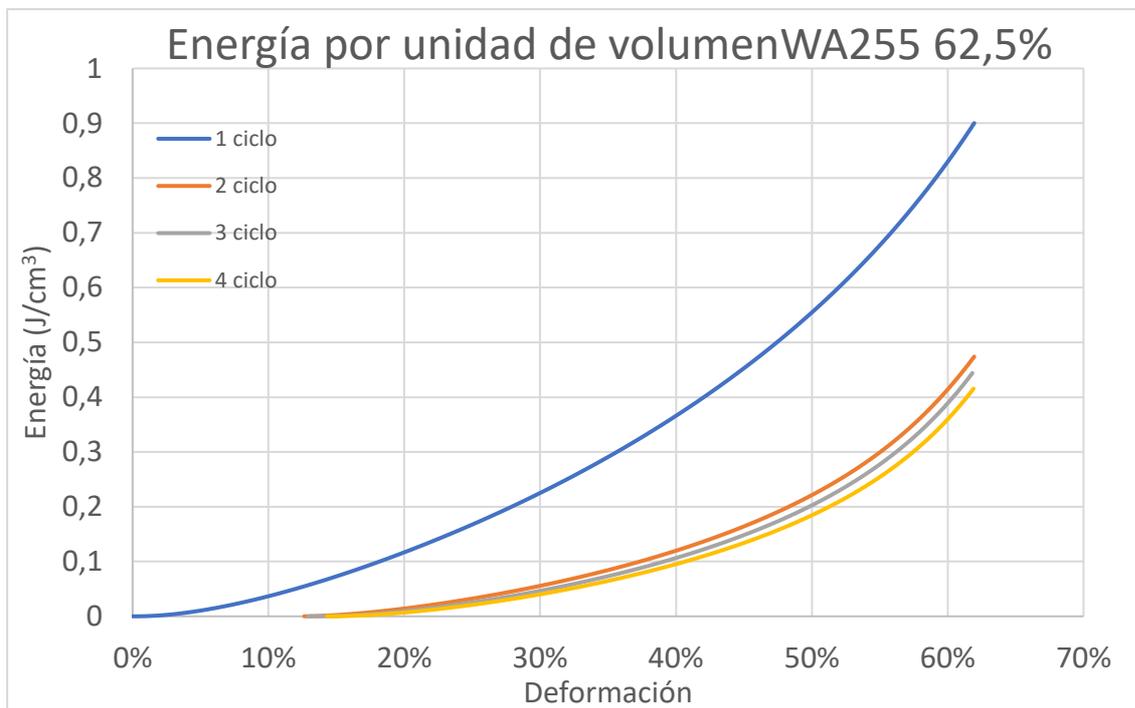


Figura 188

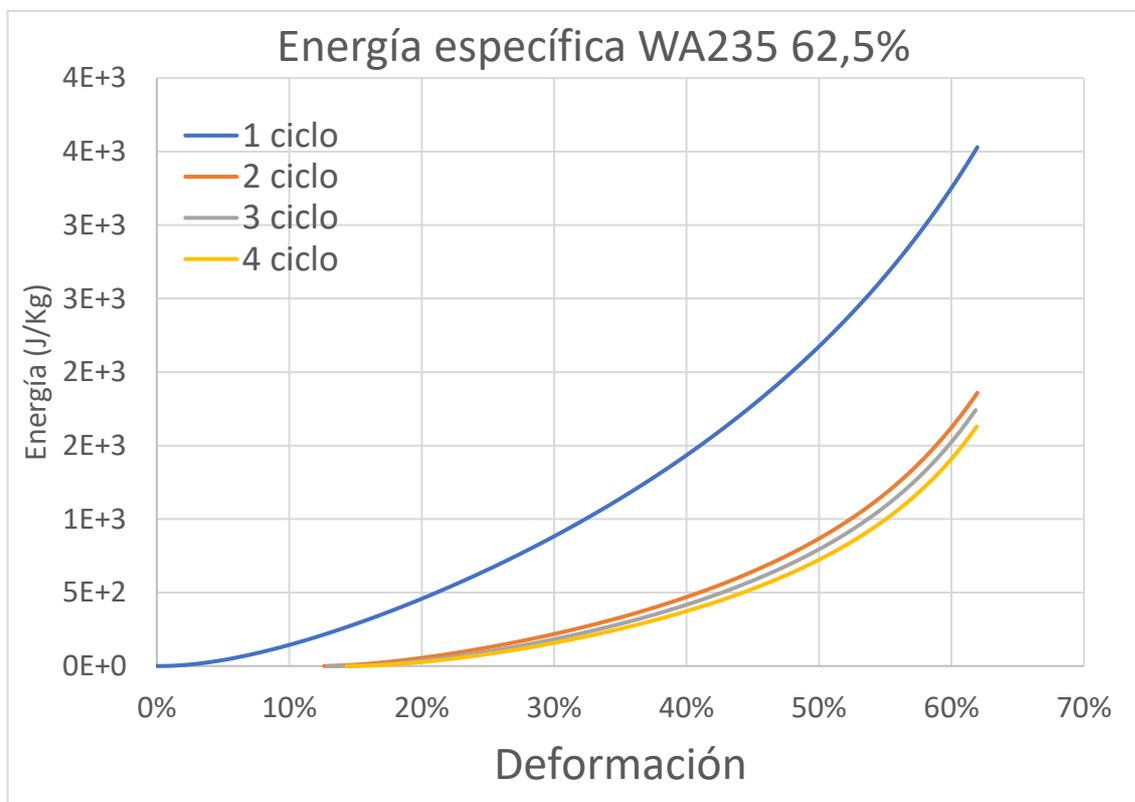


Figura 189

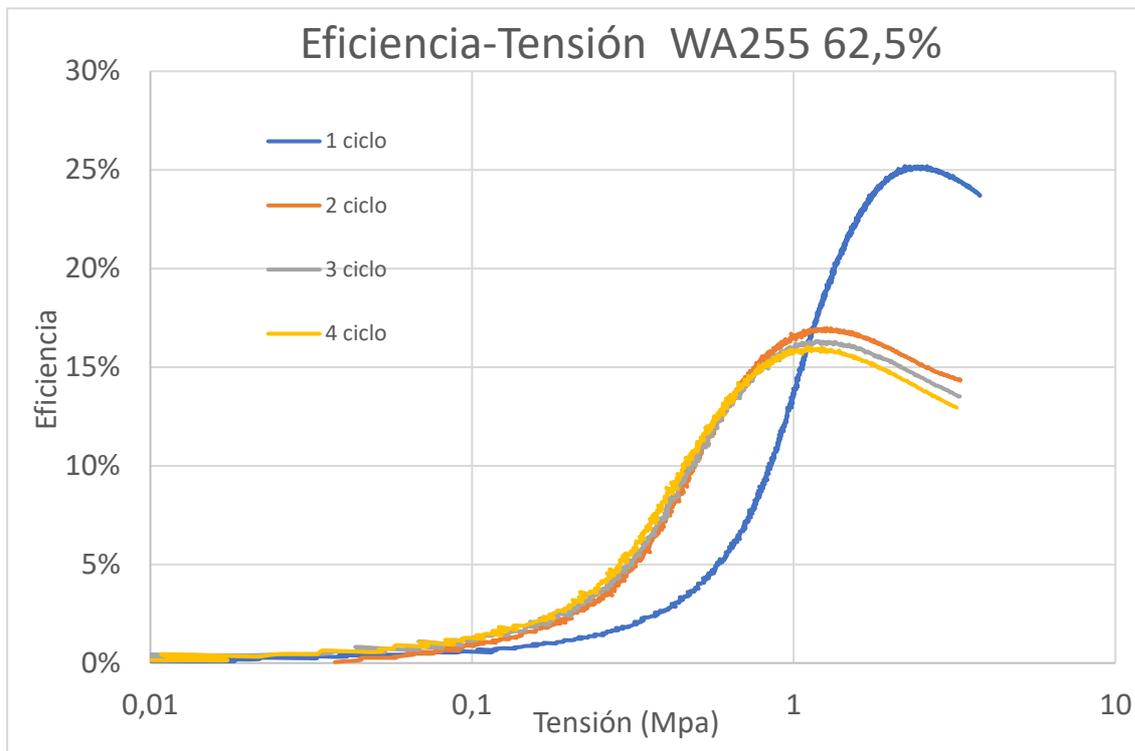


Figura 190

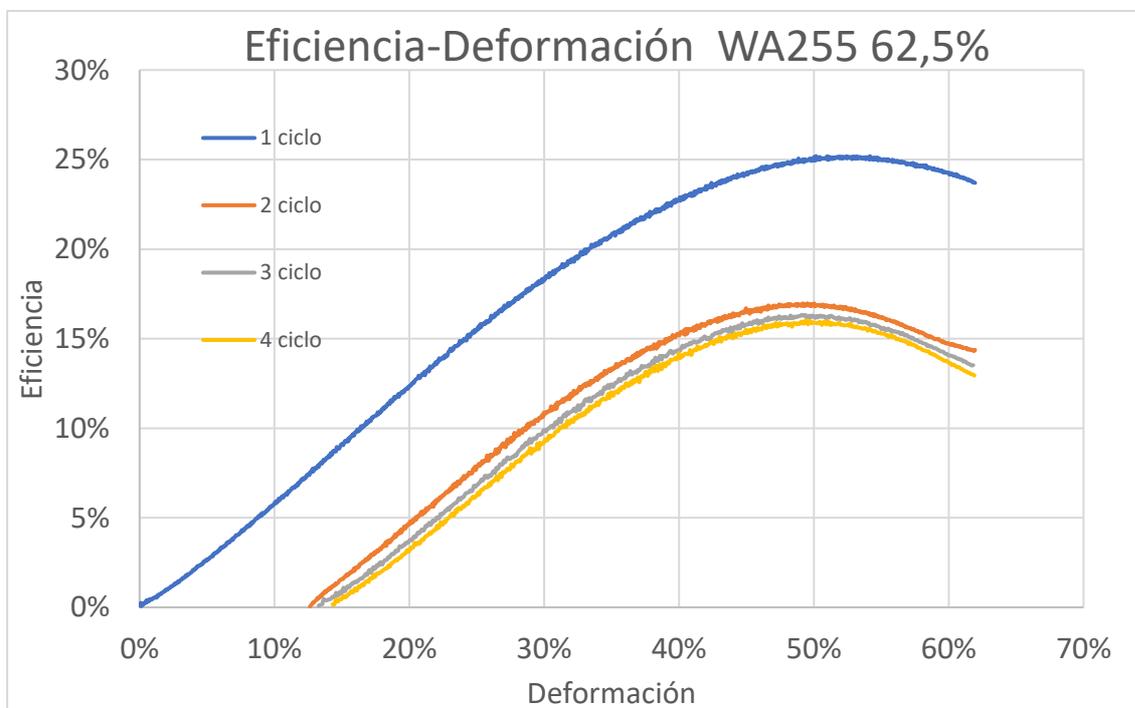


Figura 191

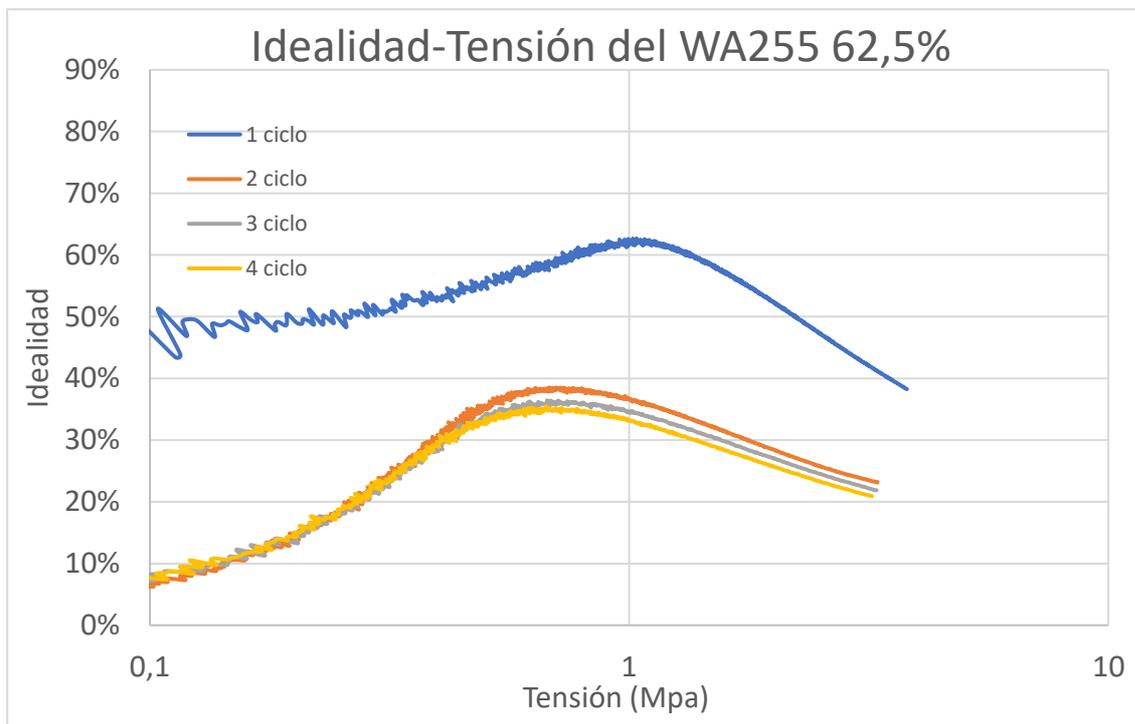


Figura 192

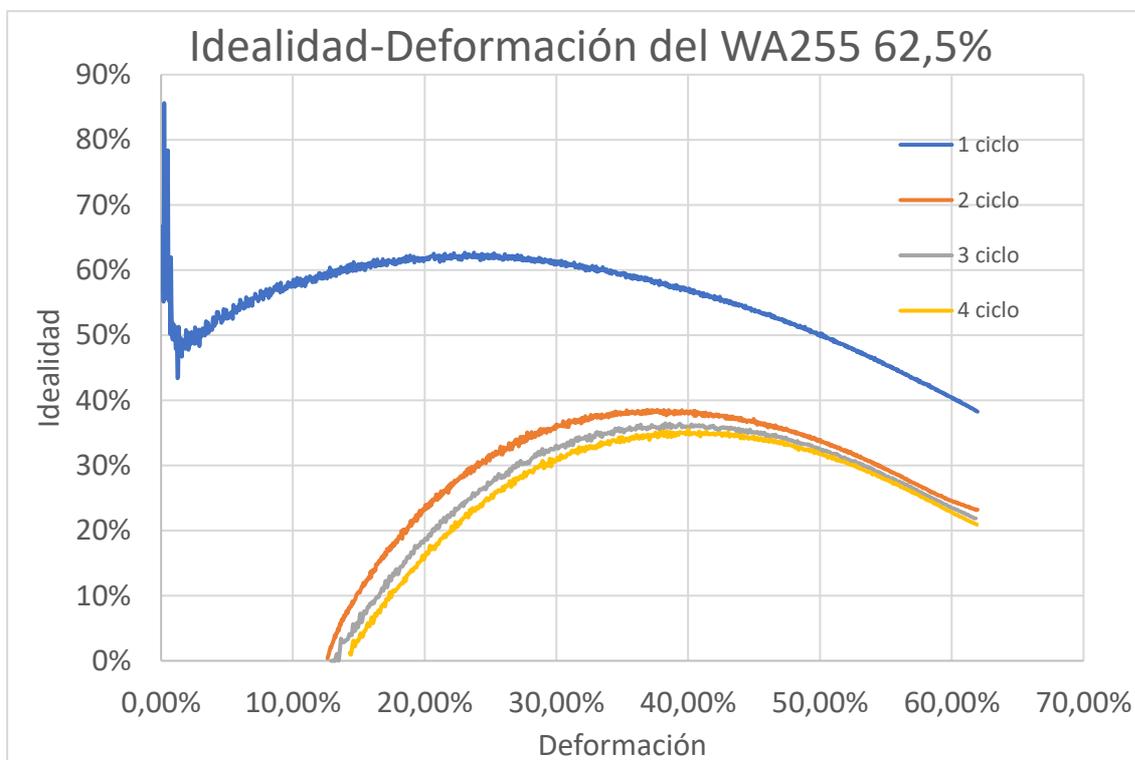


Figura 193

1.1.1. Ensayos al 50%

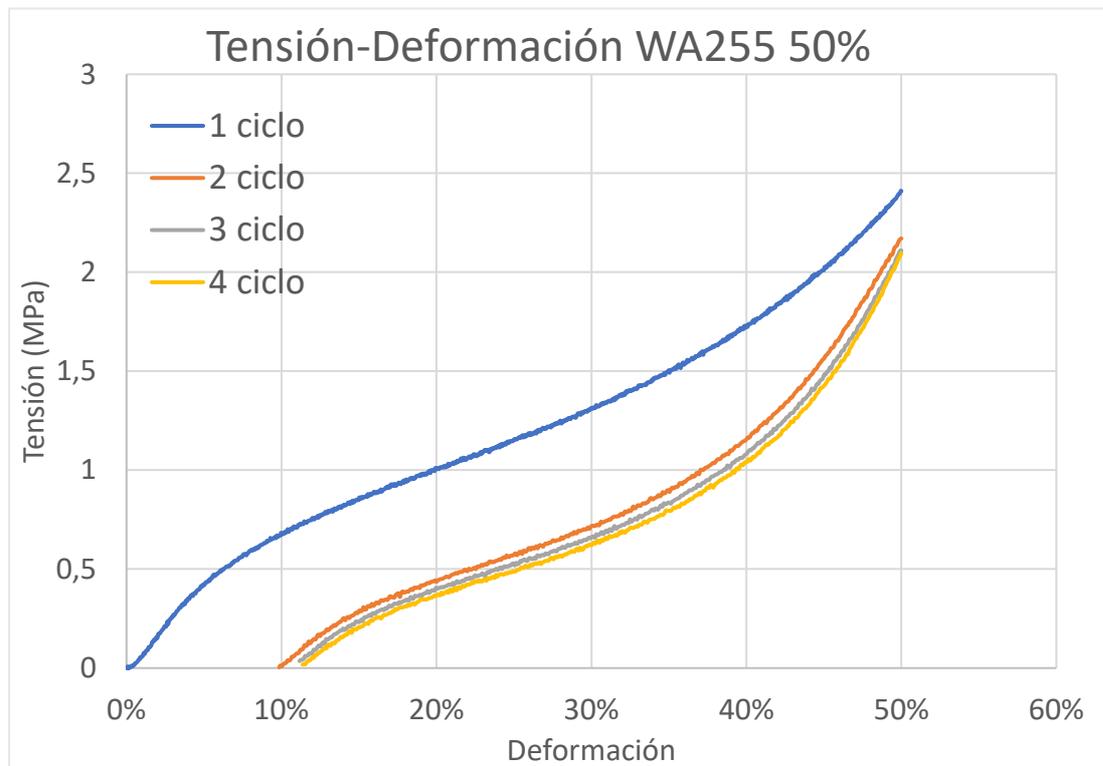


Figura 195

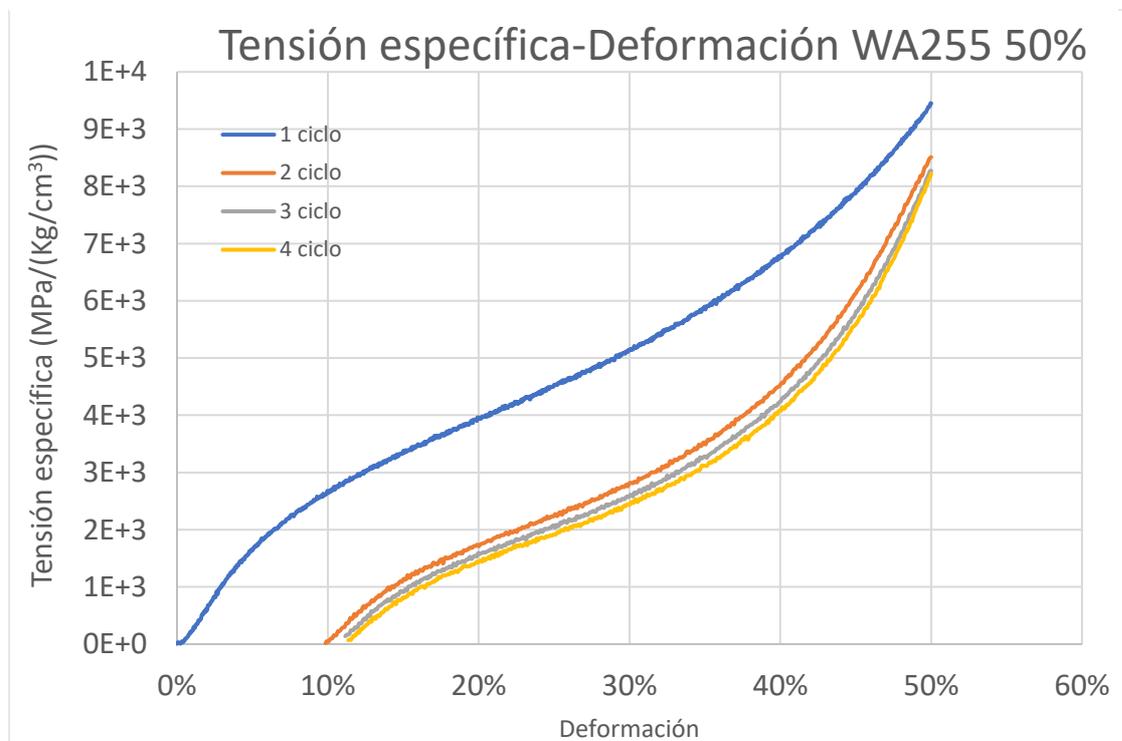


Figura 194

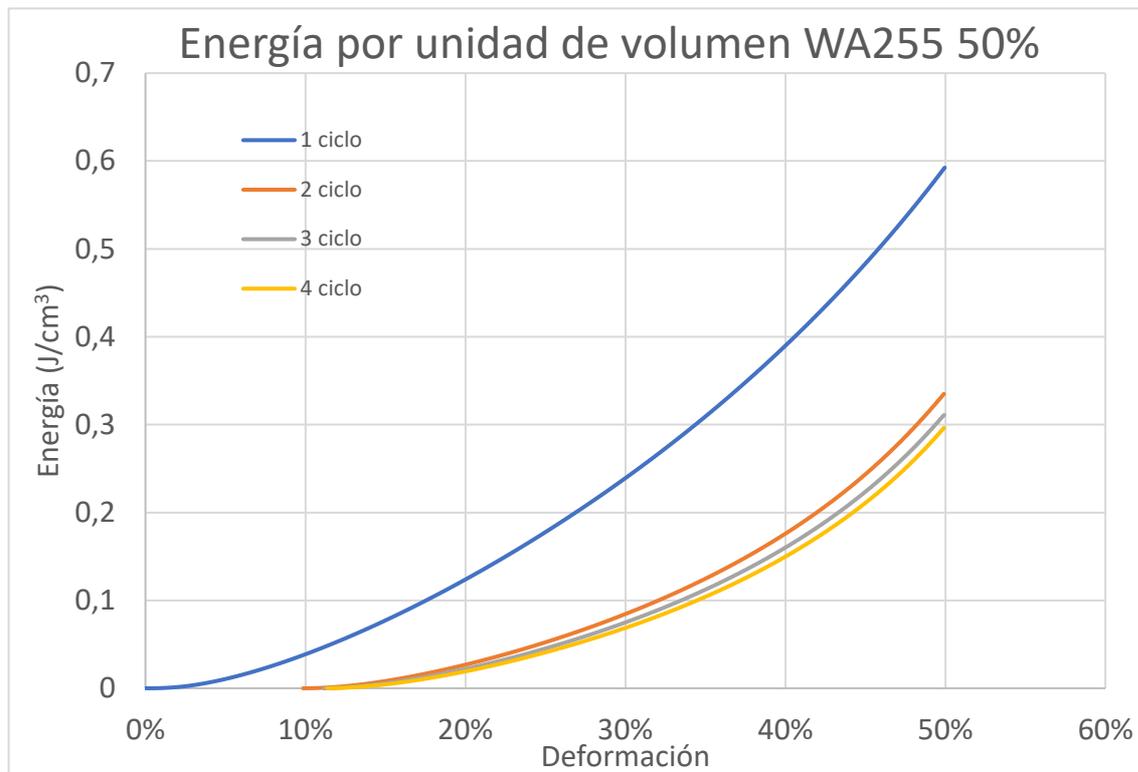


Figura 196

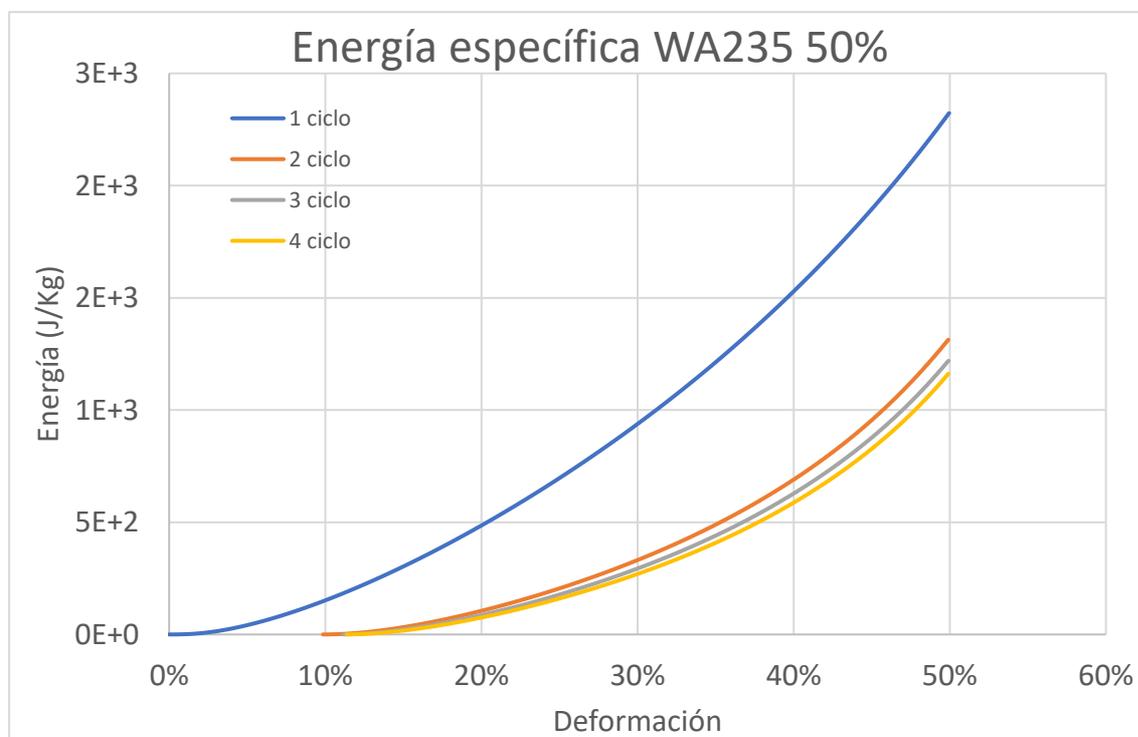


Figura 197

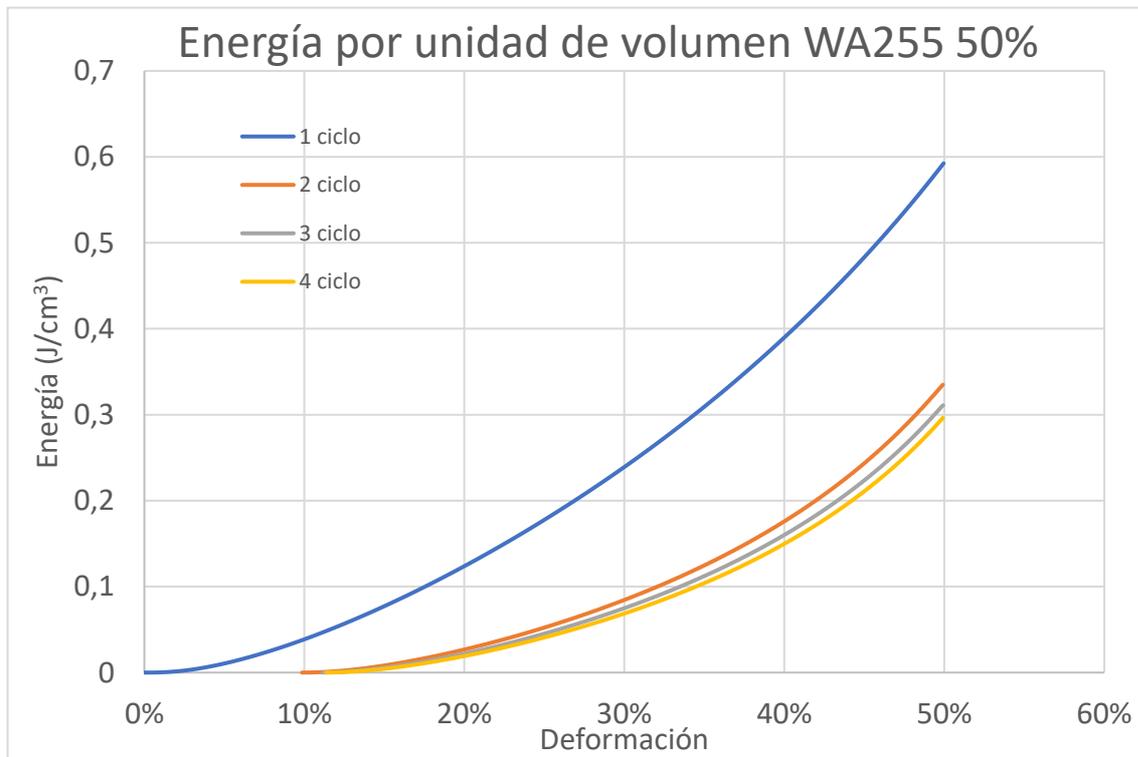


Figura 199

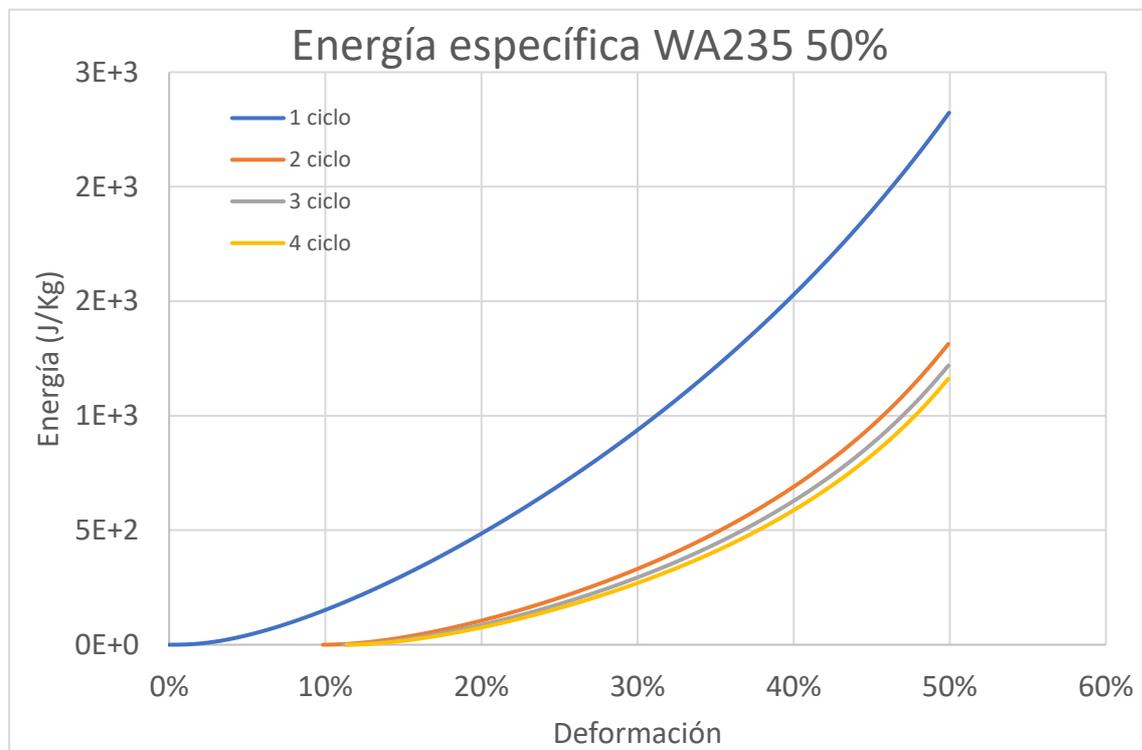


Figura 198



Figura 200

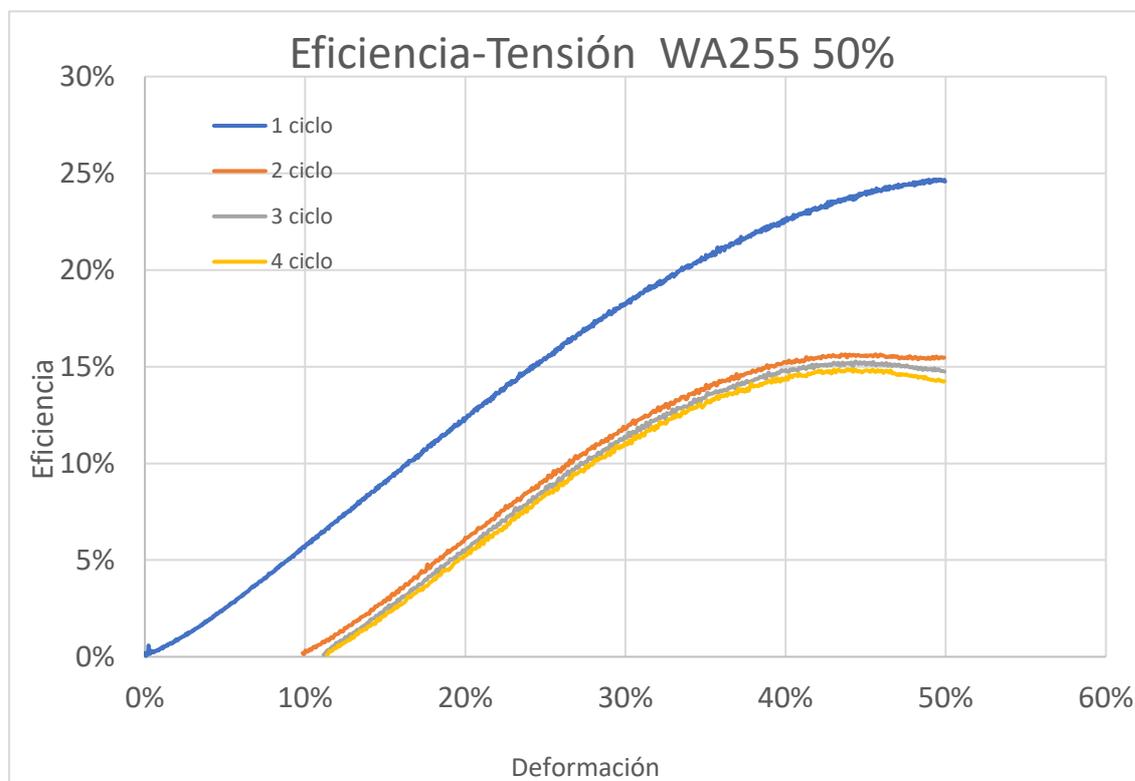


Figura 201

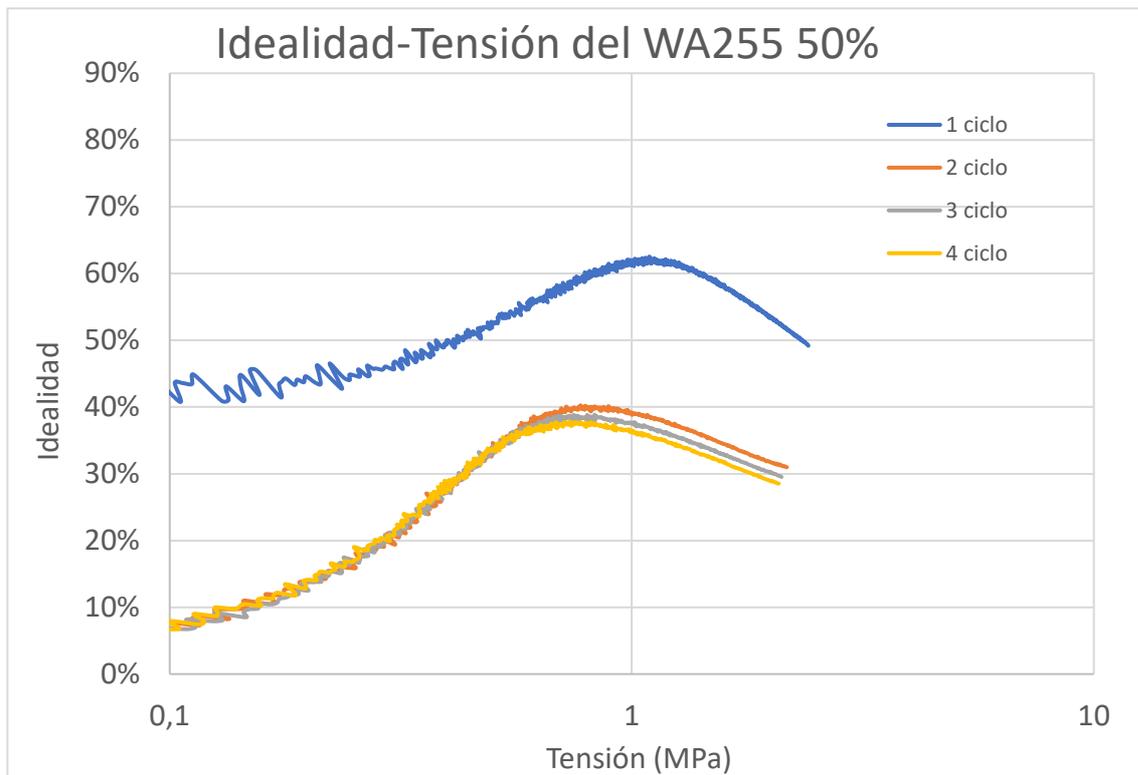


Figura 203

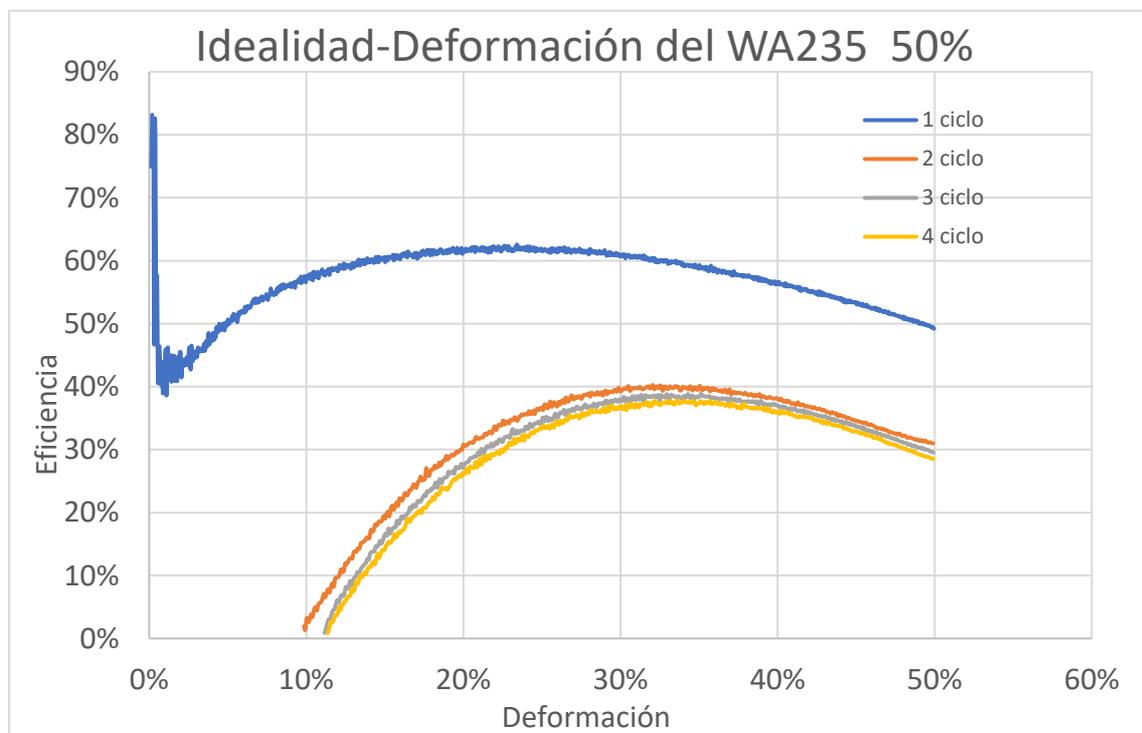


Figura 202

M.4 Material NC170

M.4.1 Ensayos al 90%

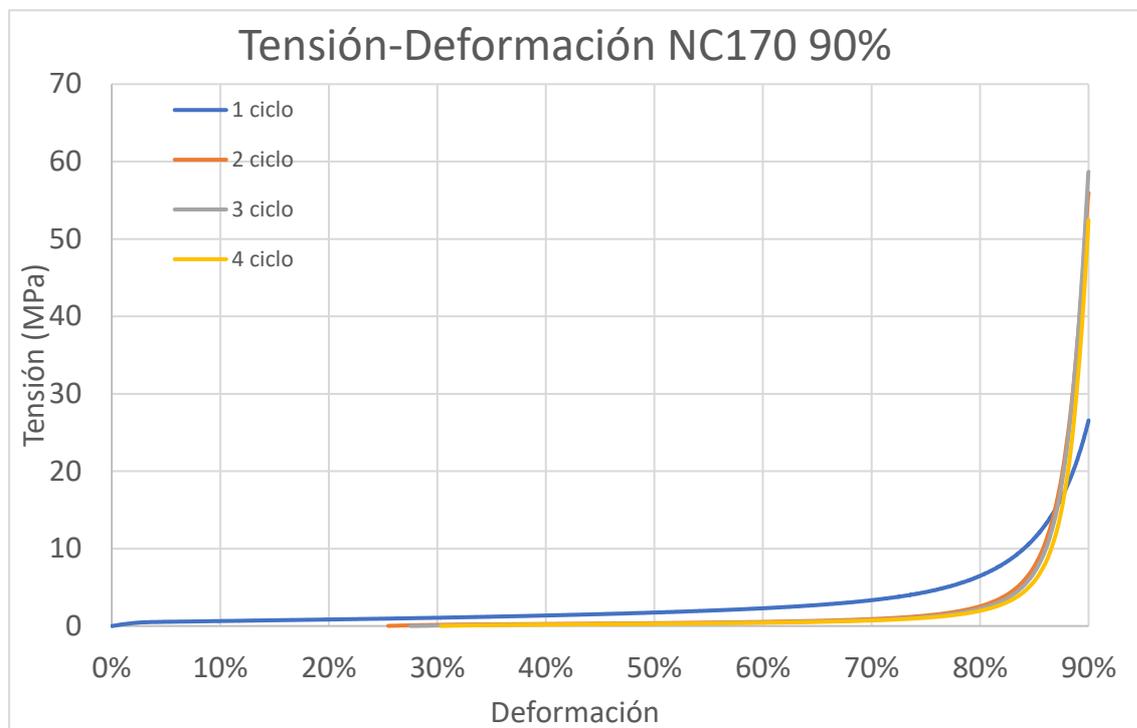


Figura 204

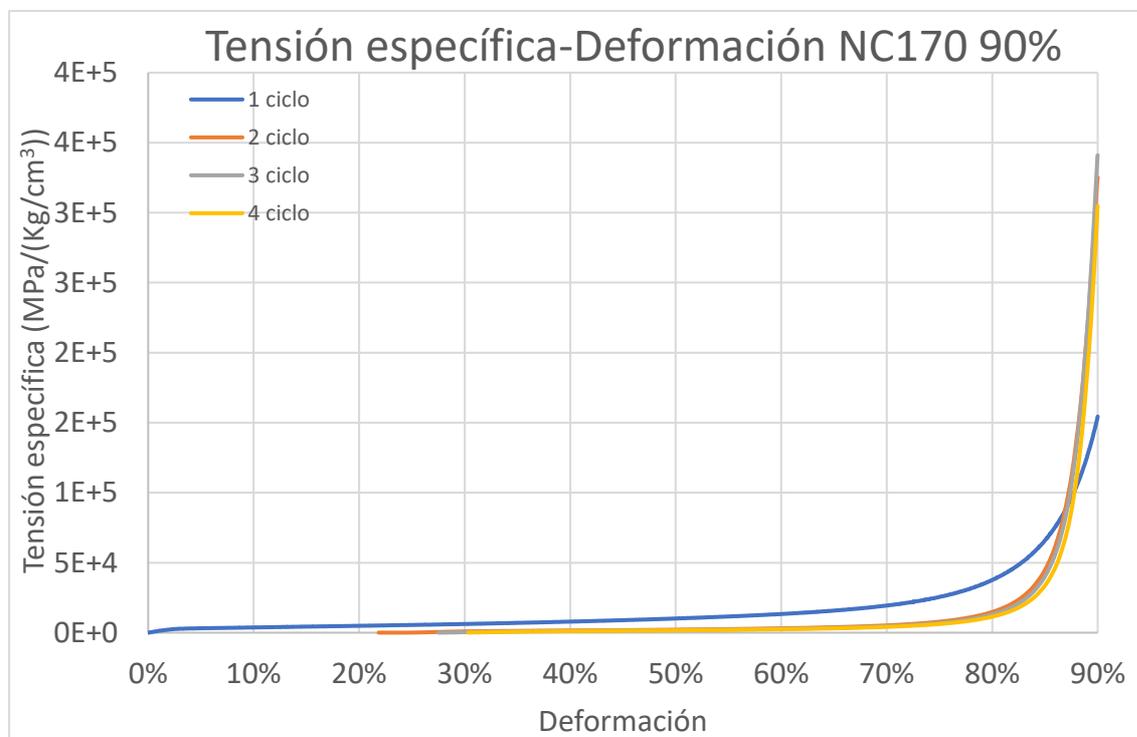


Figura 205

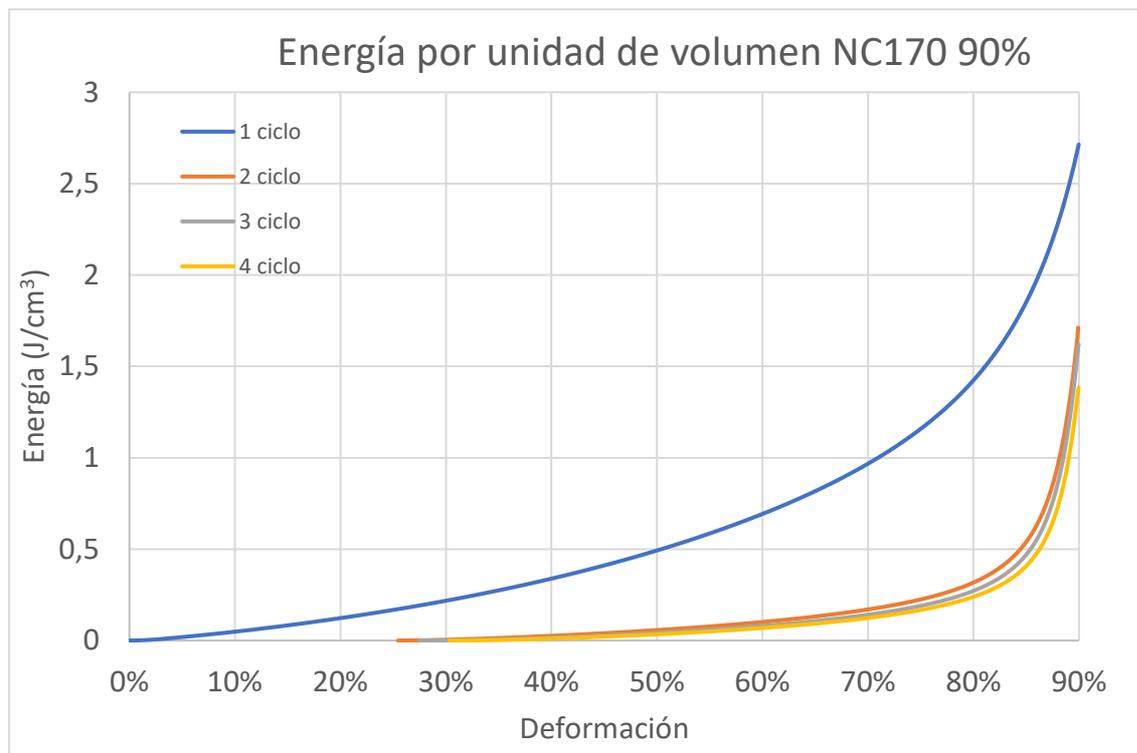


Figura 206

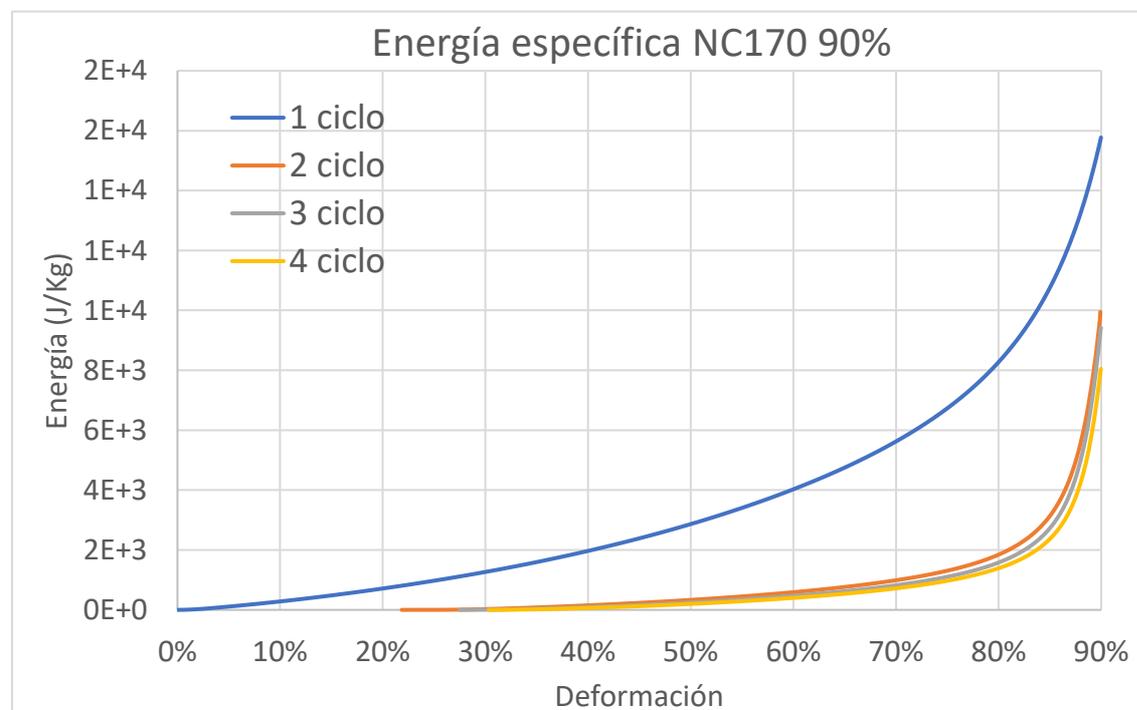


Figura 207

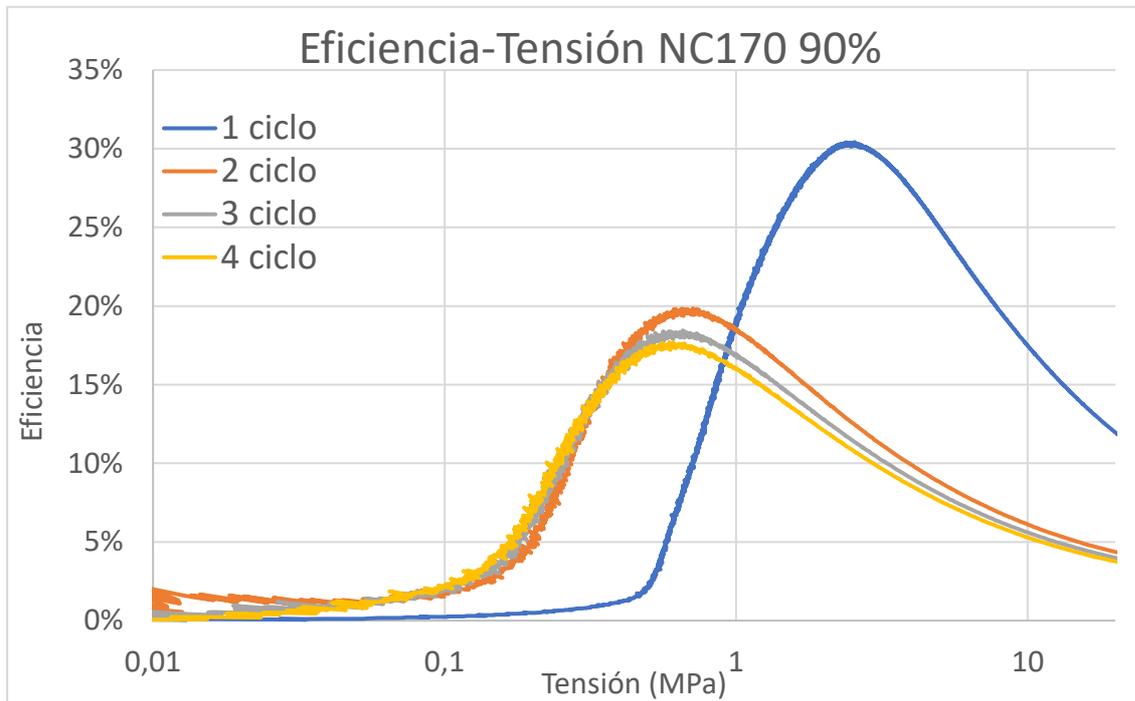


Figura 208

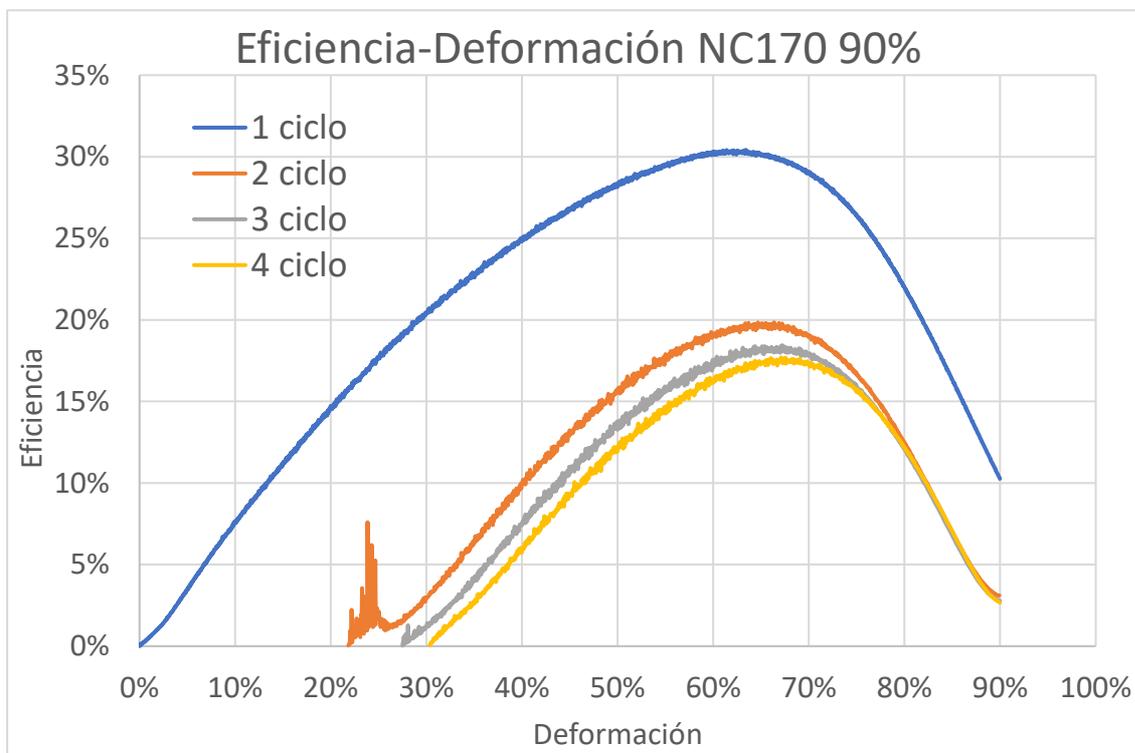


Figura 209

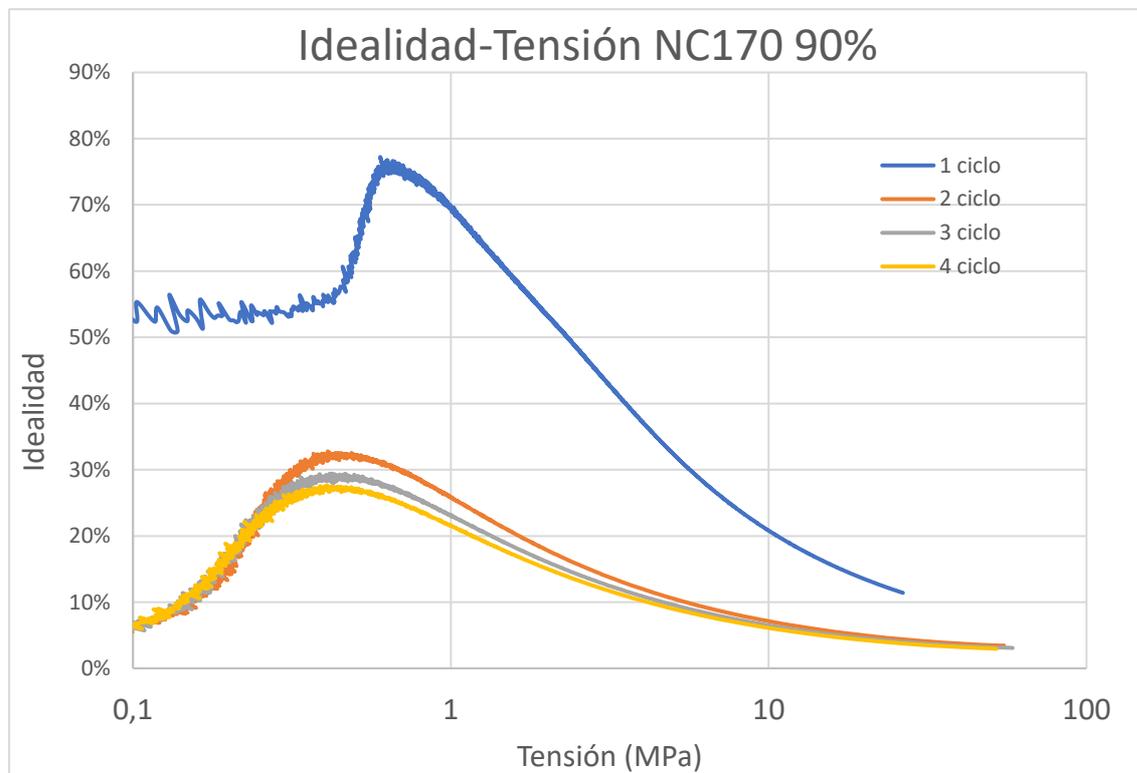


Figura 210

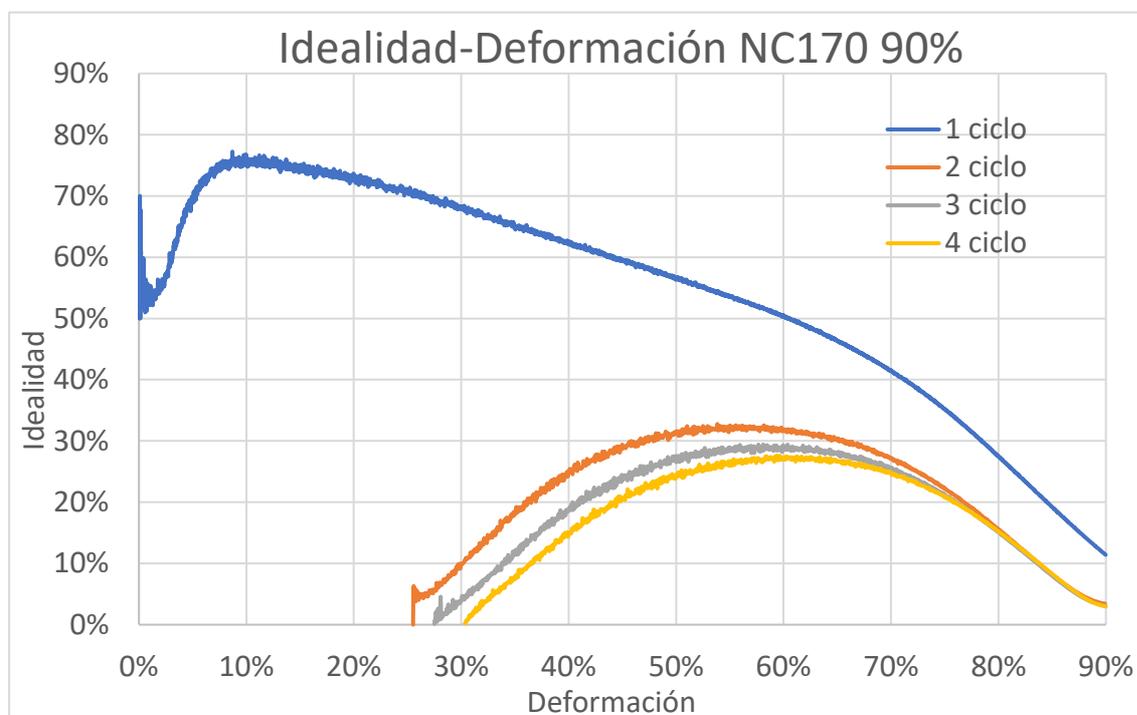


Figura 211

1.1.2. Ensayos al 75%

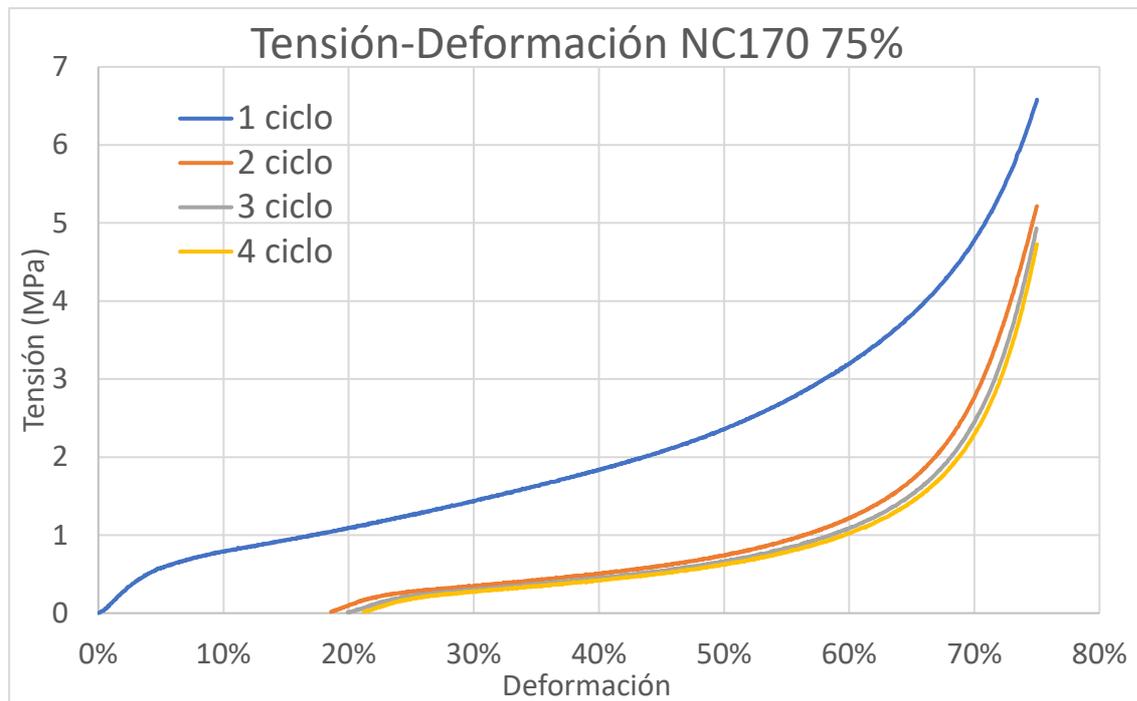


Figura 212

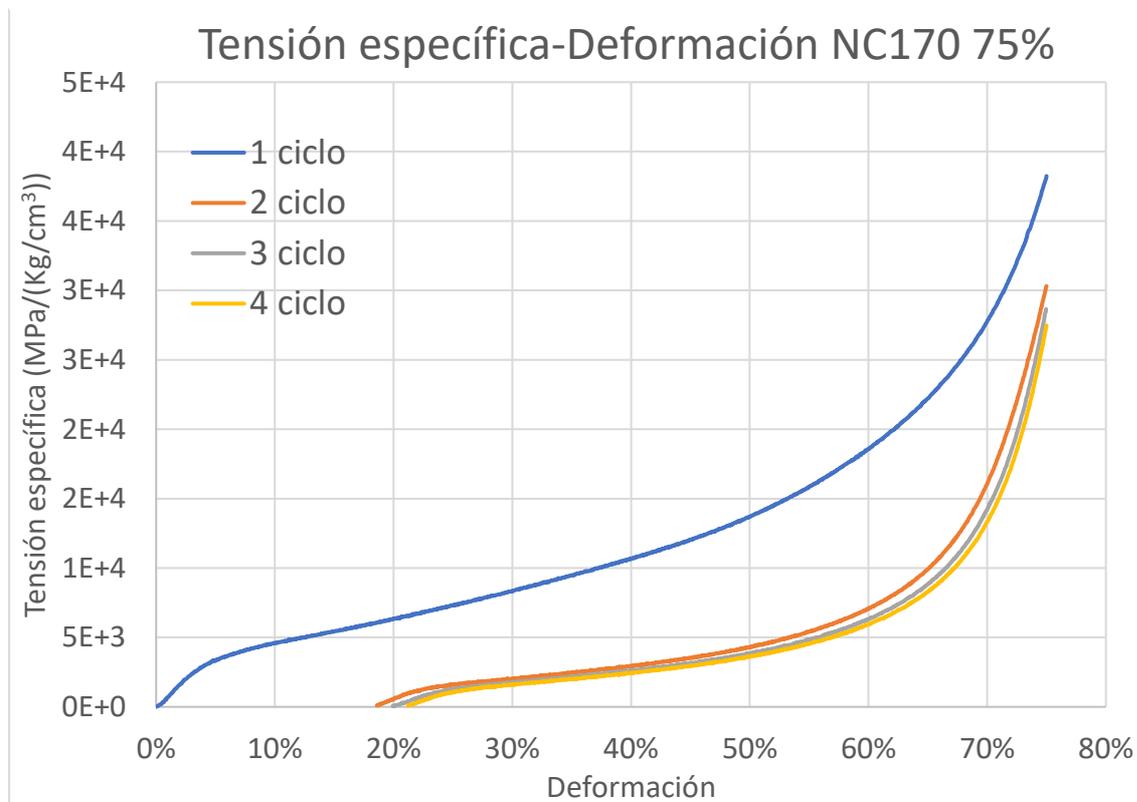


Figura 213

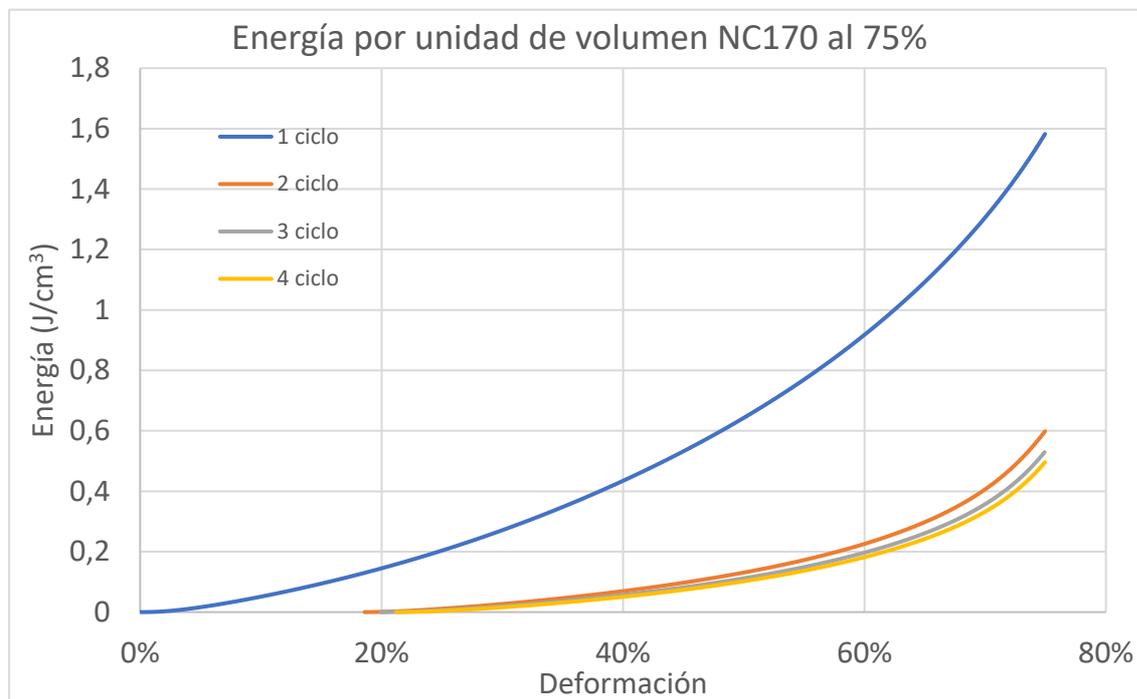


Figura 215

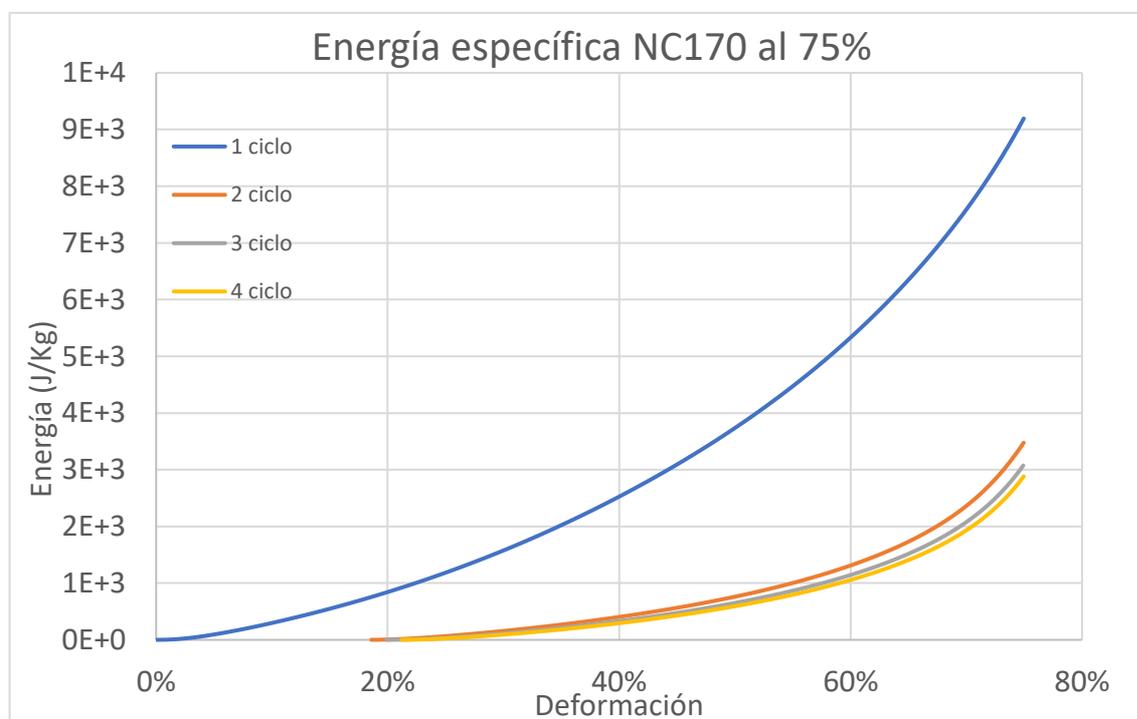


Figura 214

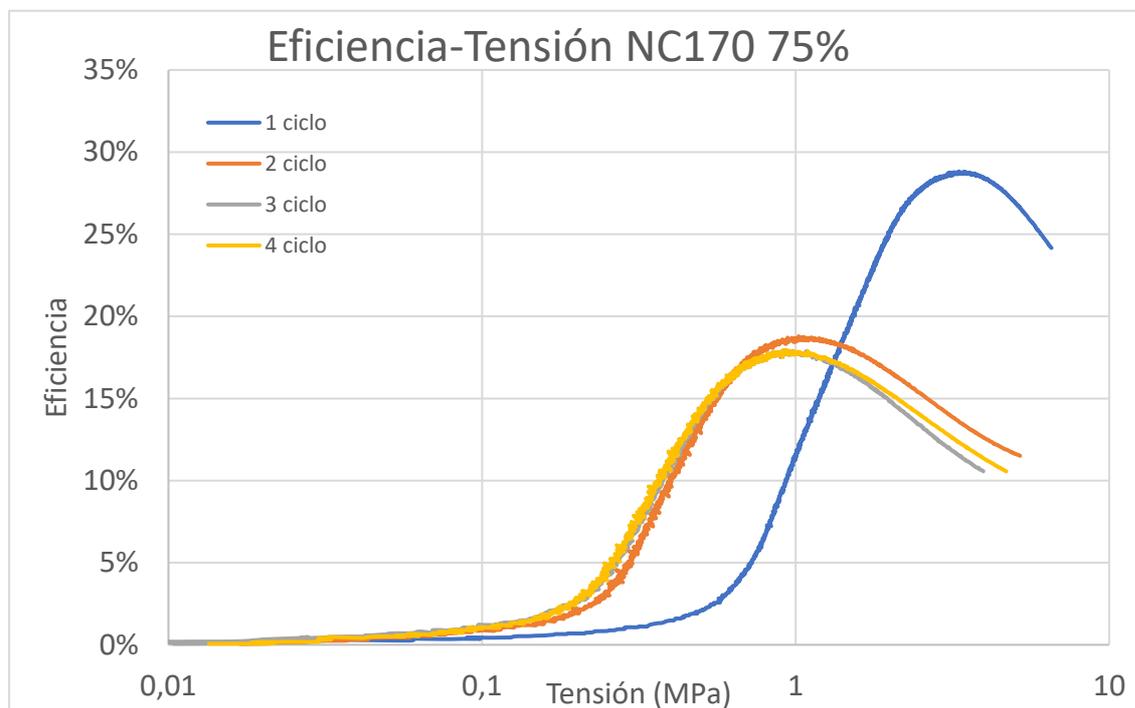


Figura 217

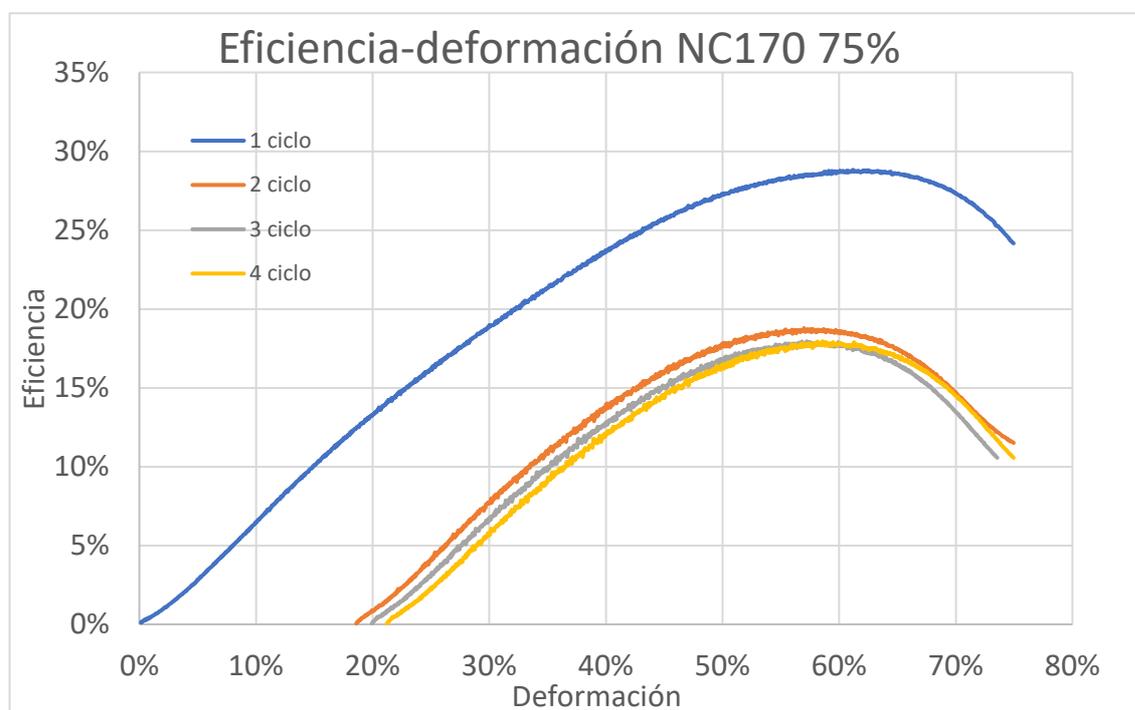


Figura 216

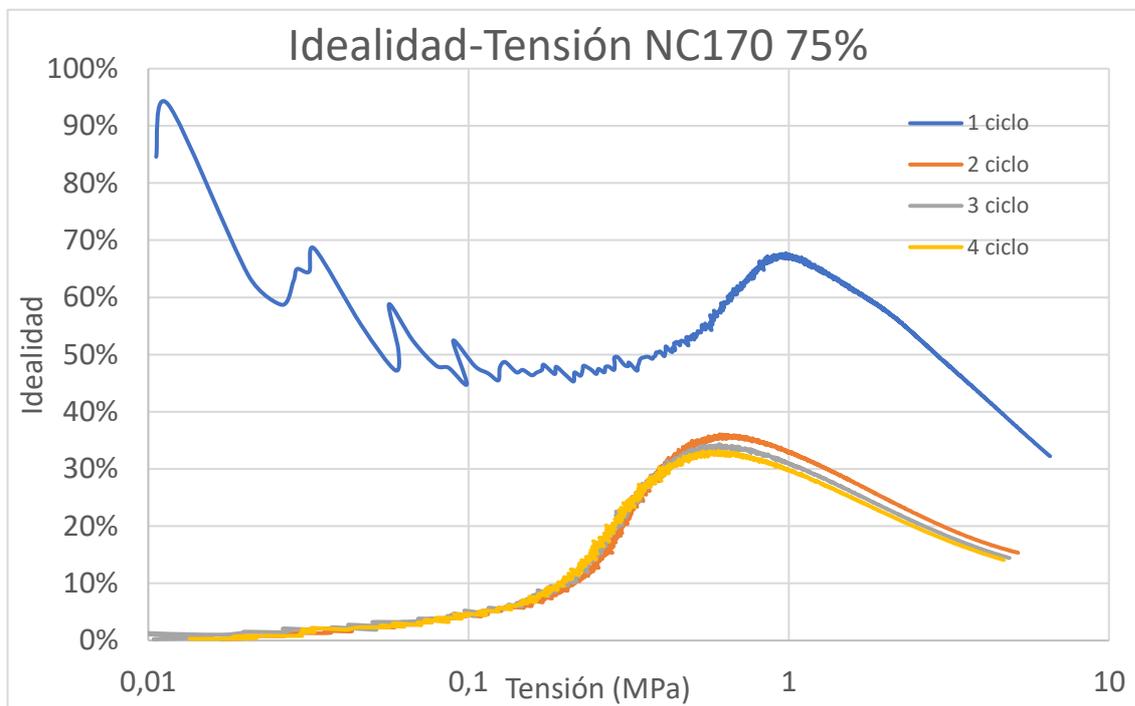


Figura 219

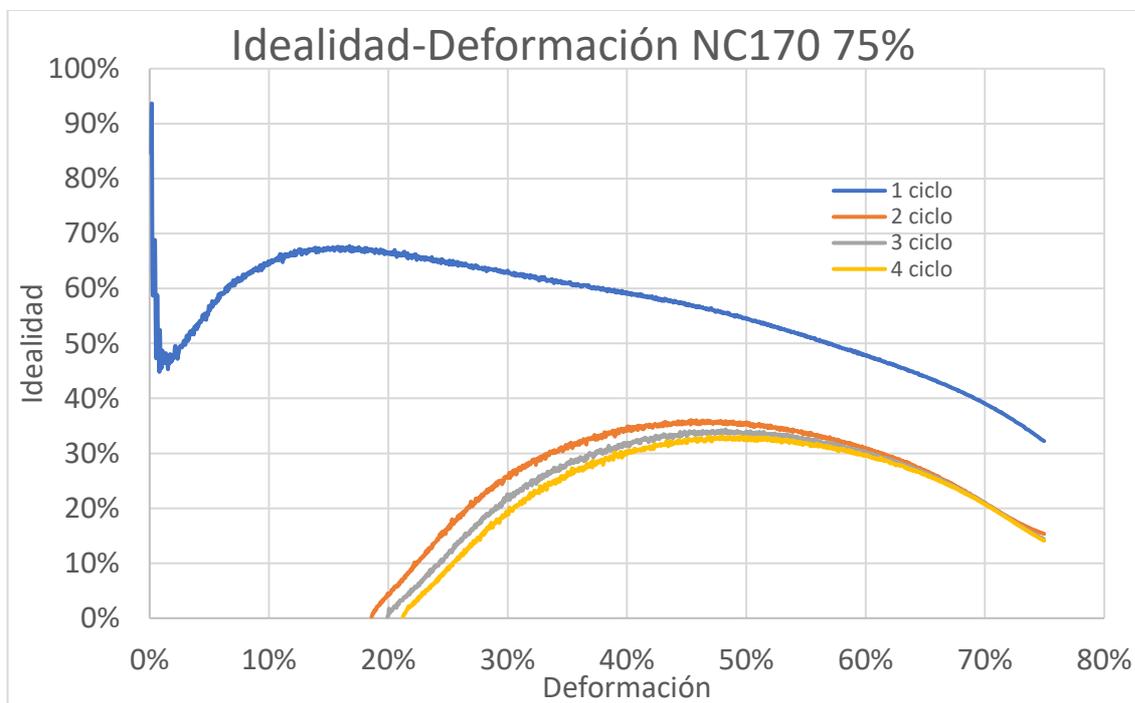


Figura 218

M.4.2 Ensayos al 62,5%

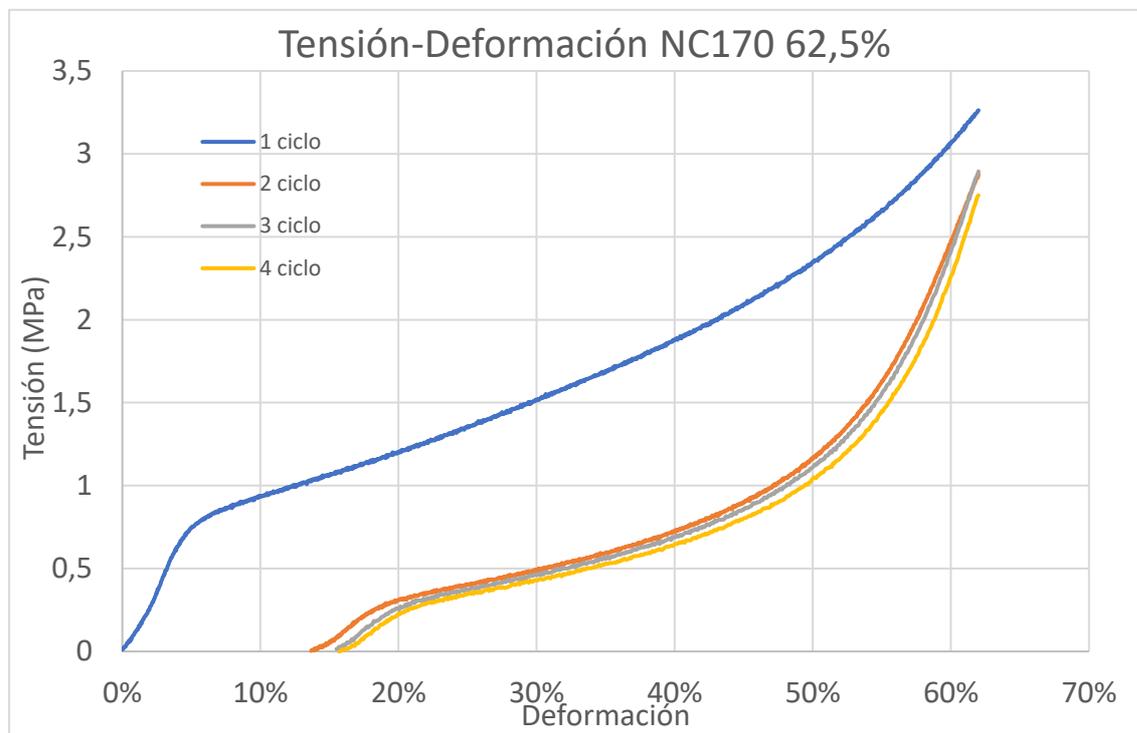


Figura 220

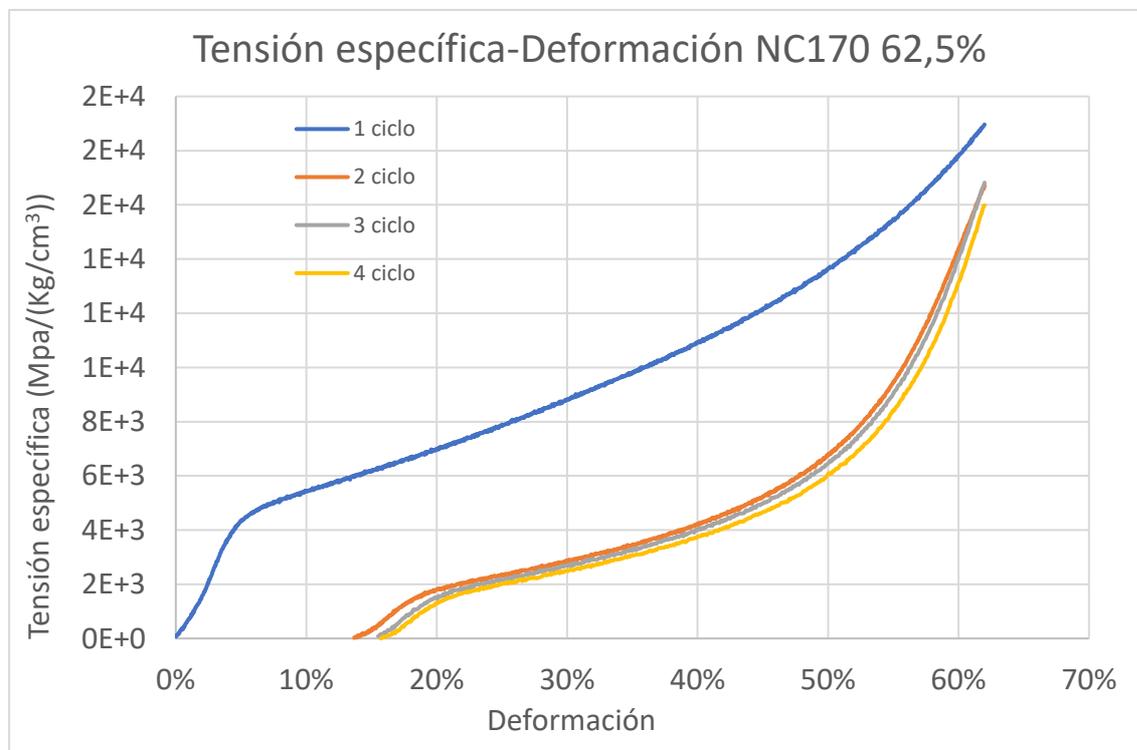


Figura 221

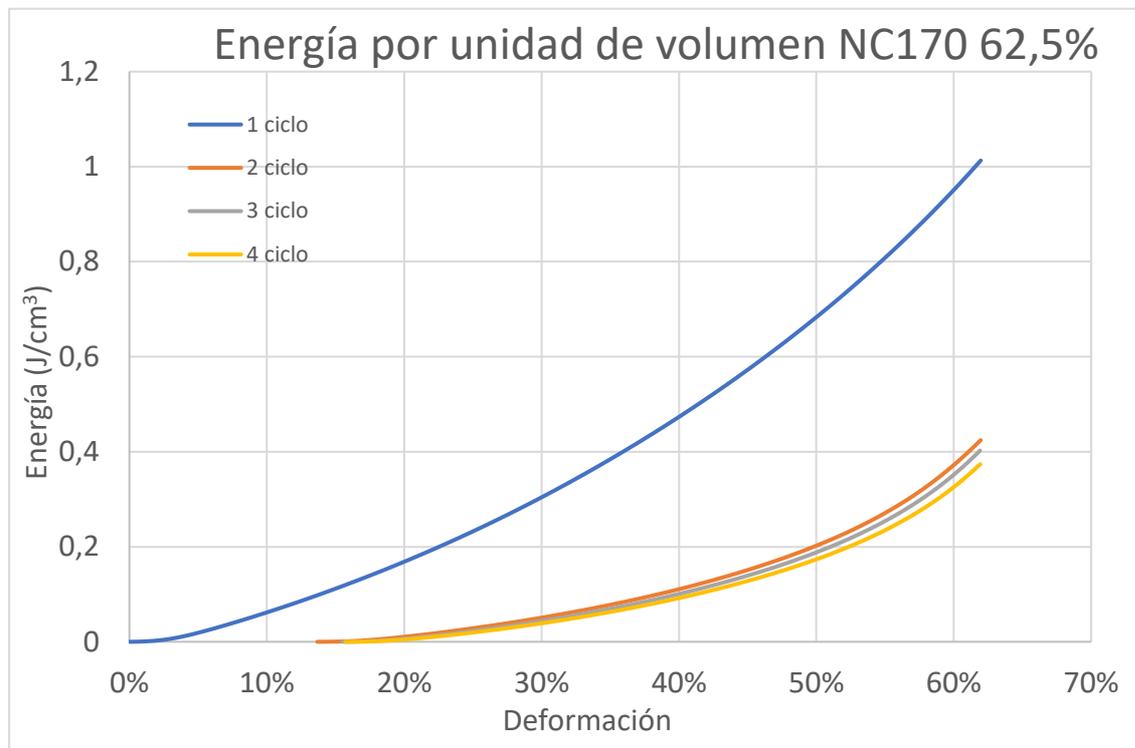


Figura 222

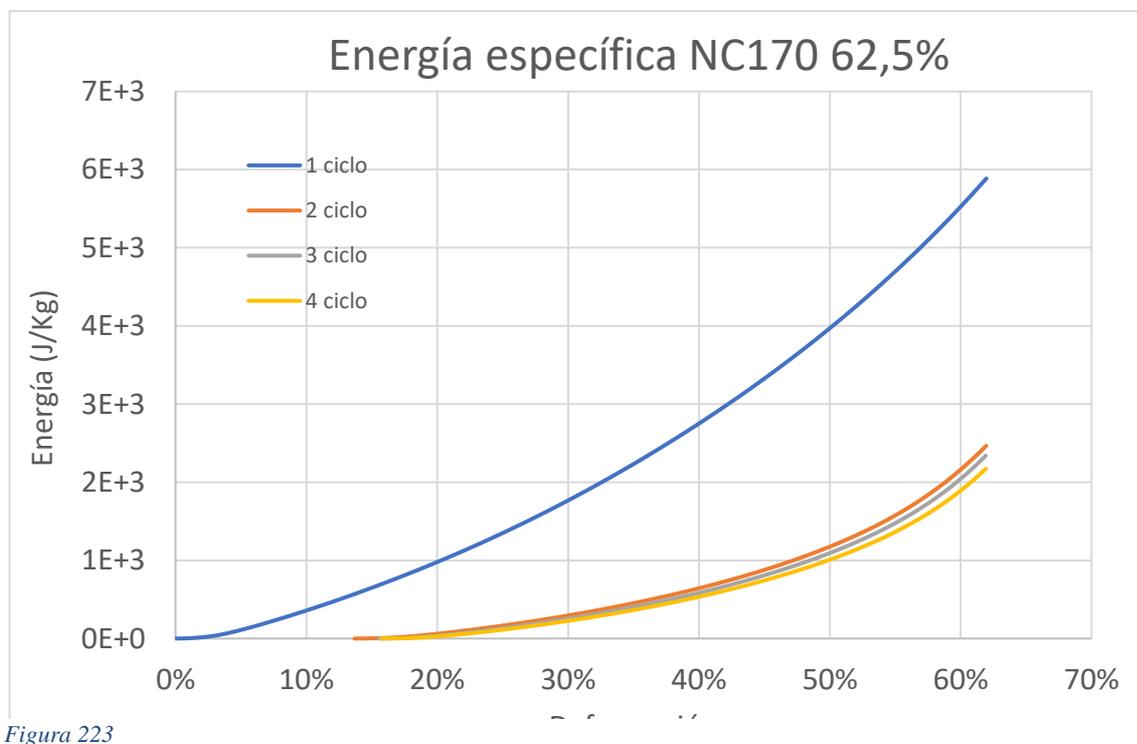


Figura 223

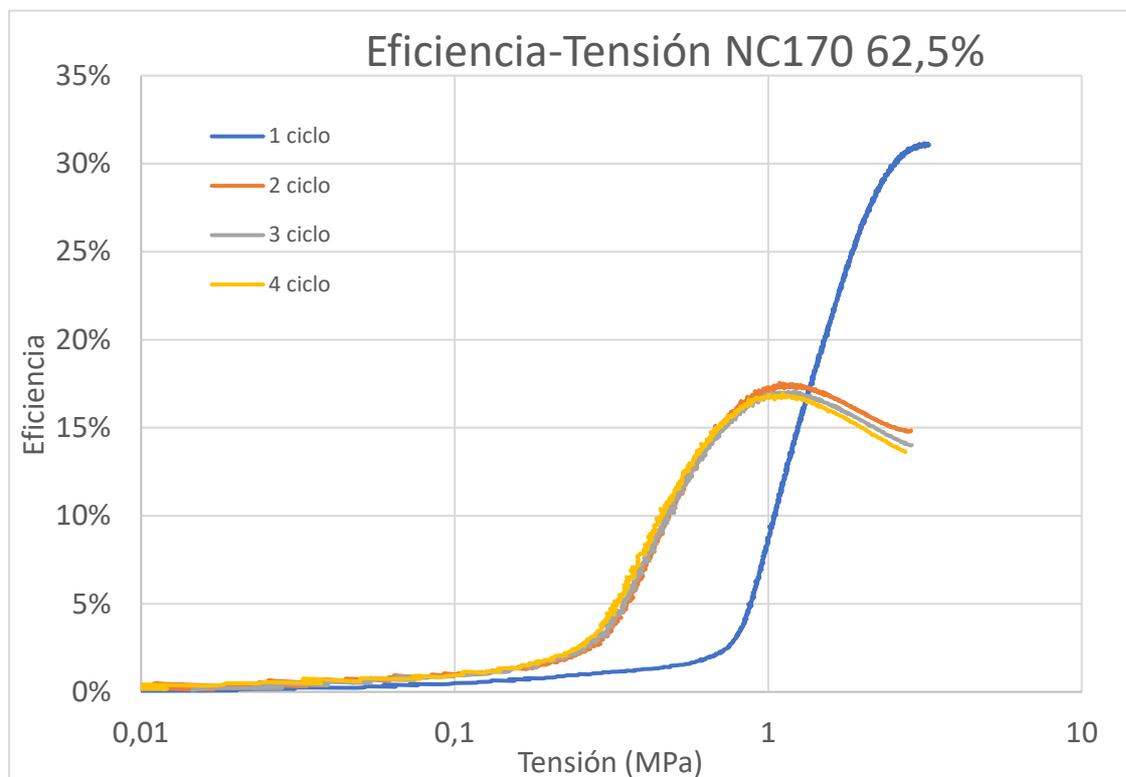


Figura 225

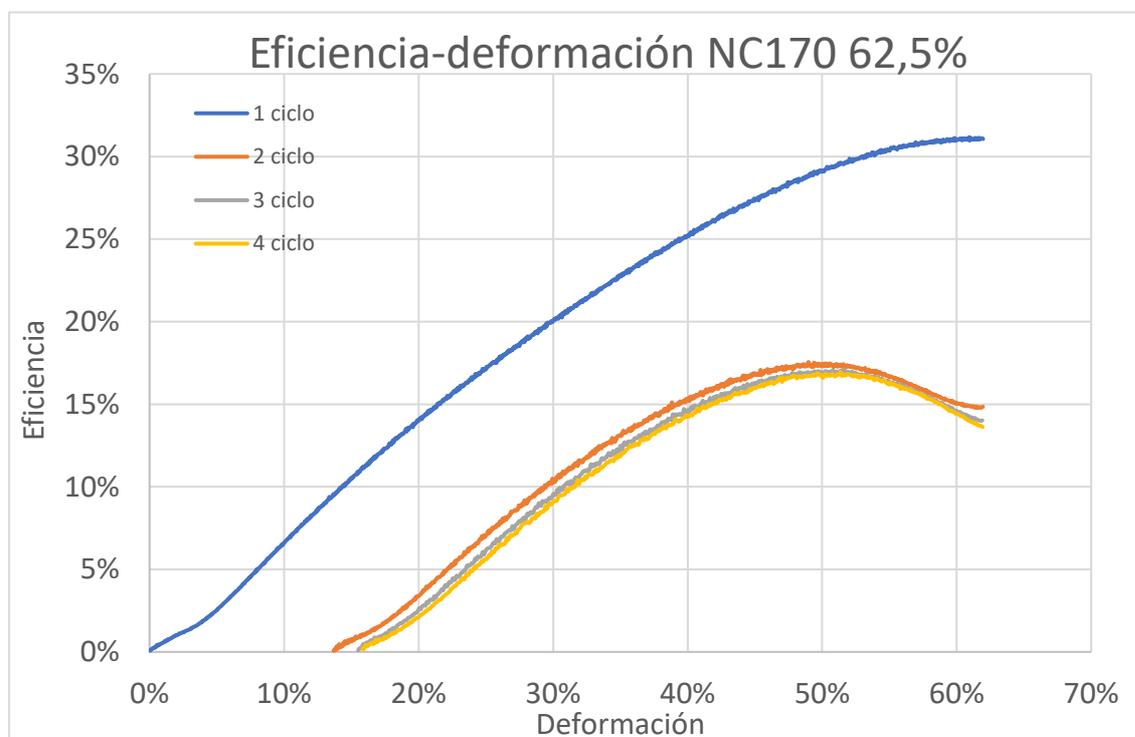


Figura 224

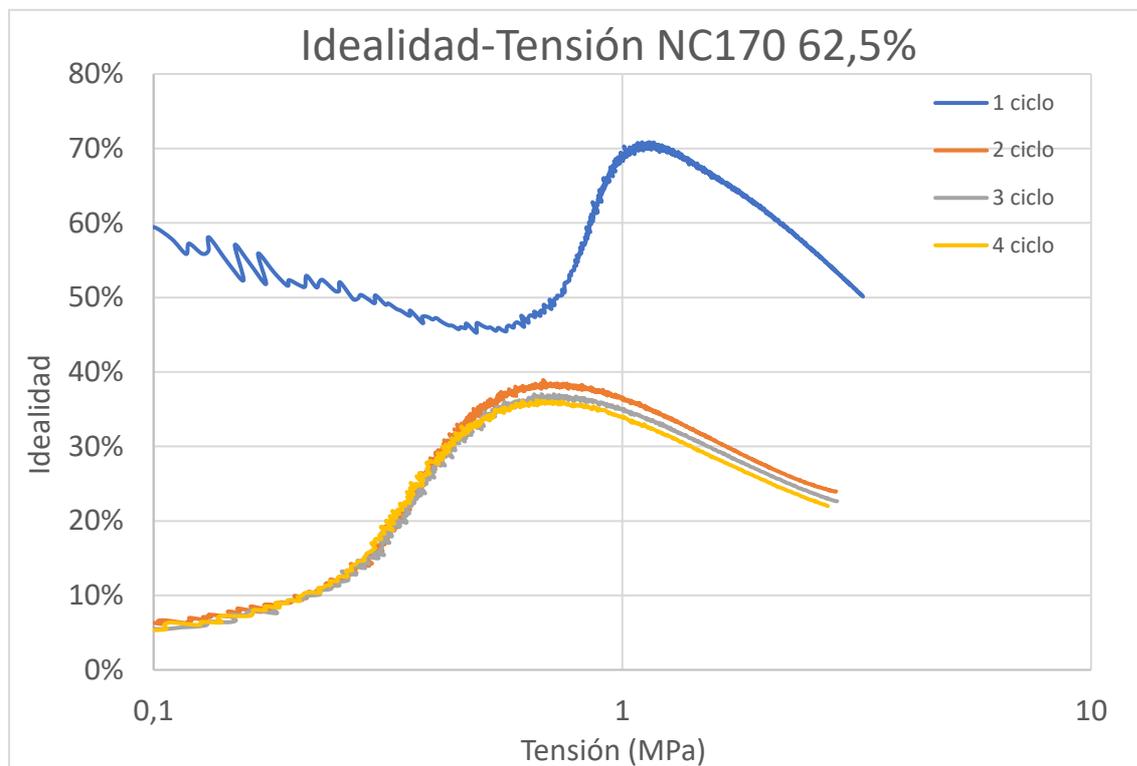


Figura 226

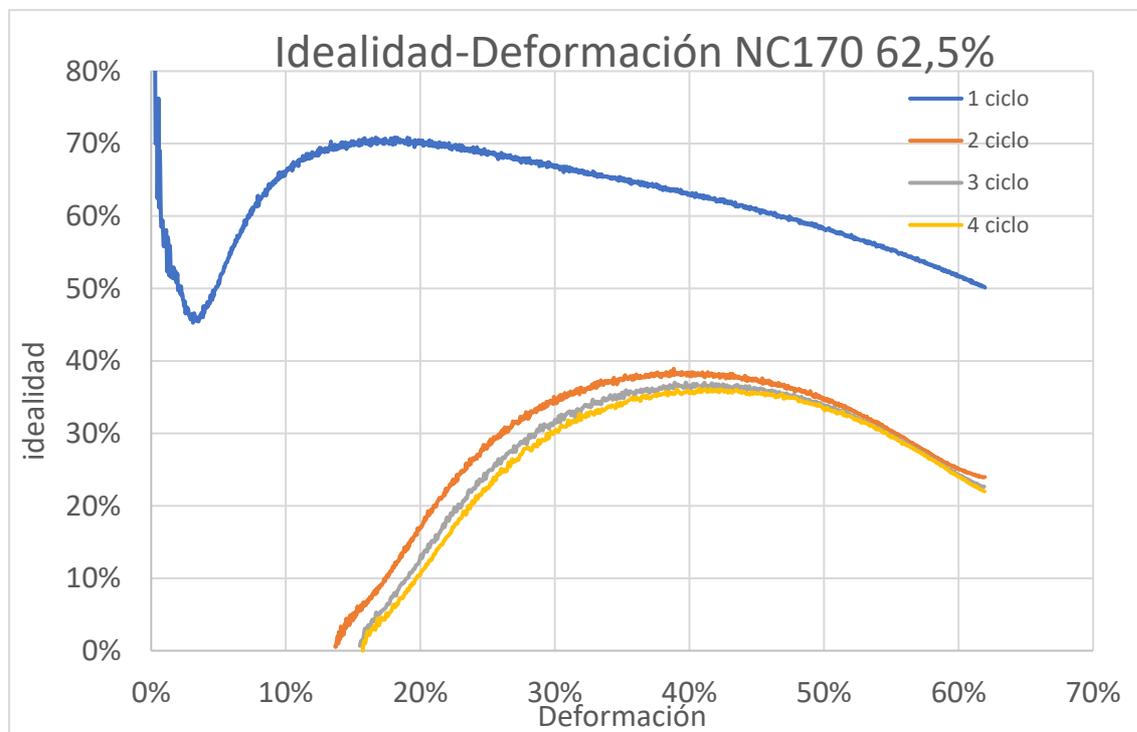


Figura 227

M.4.3 Ensayos 50%

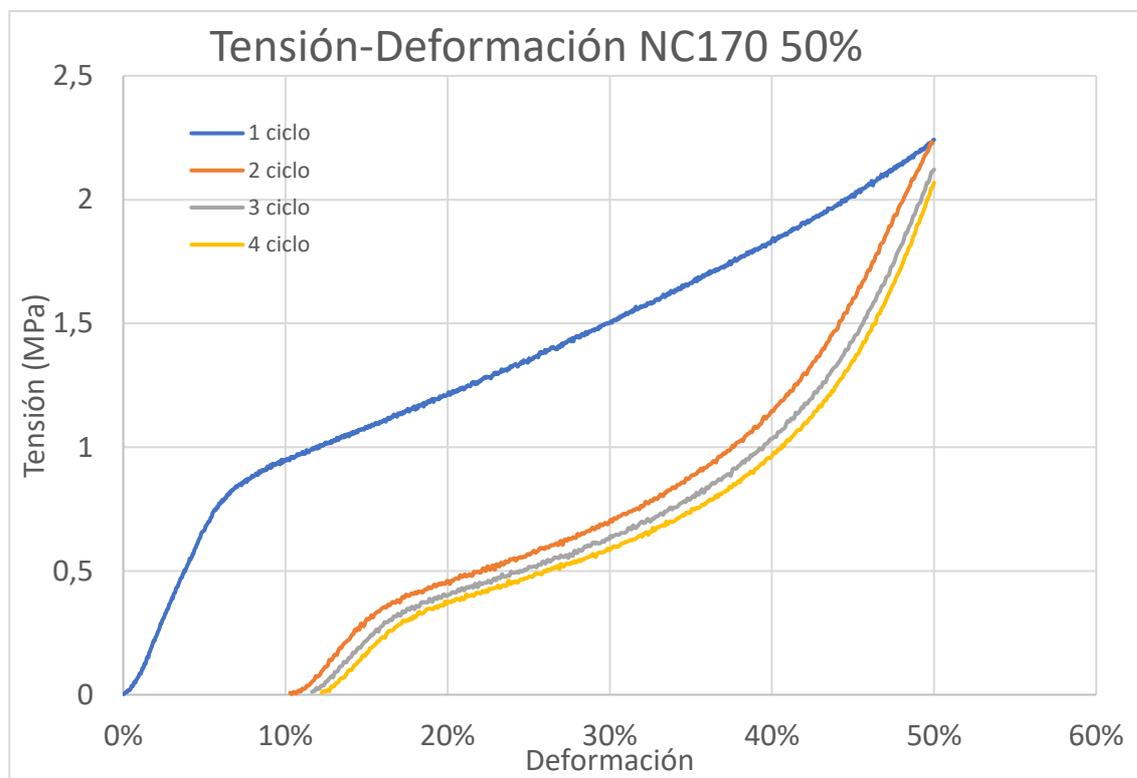


Figura 228

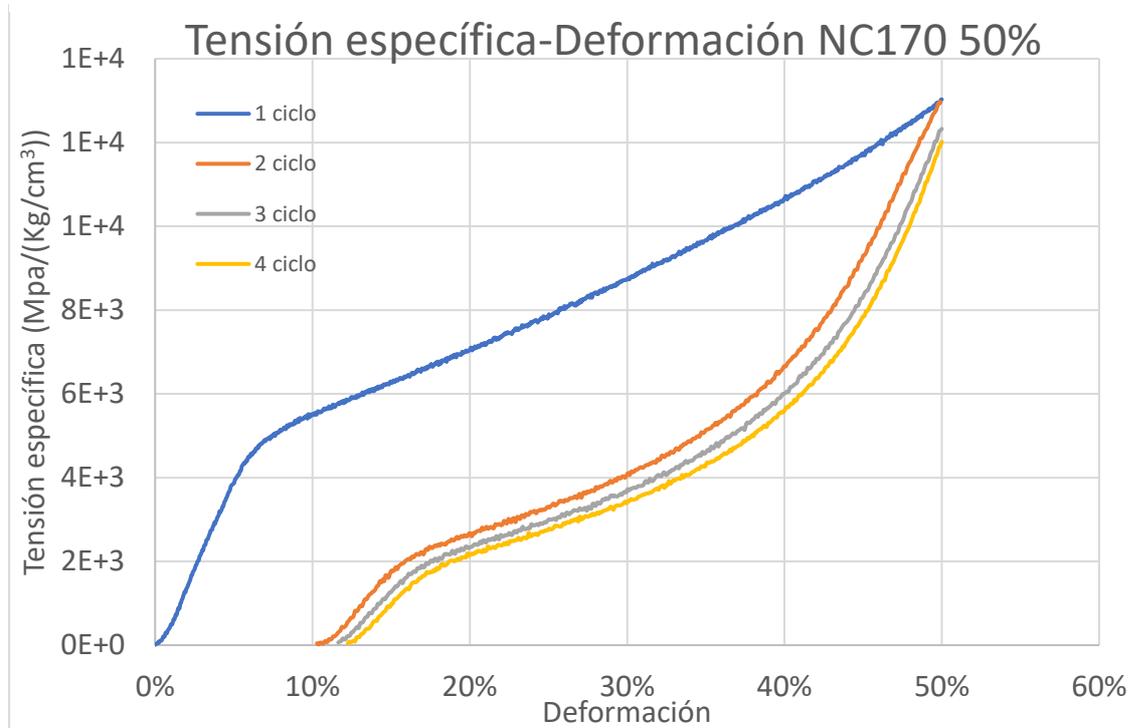


Figura 229

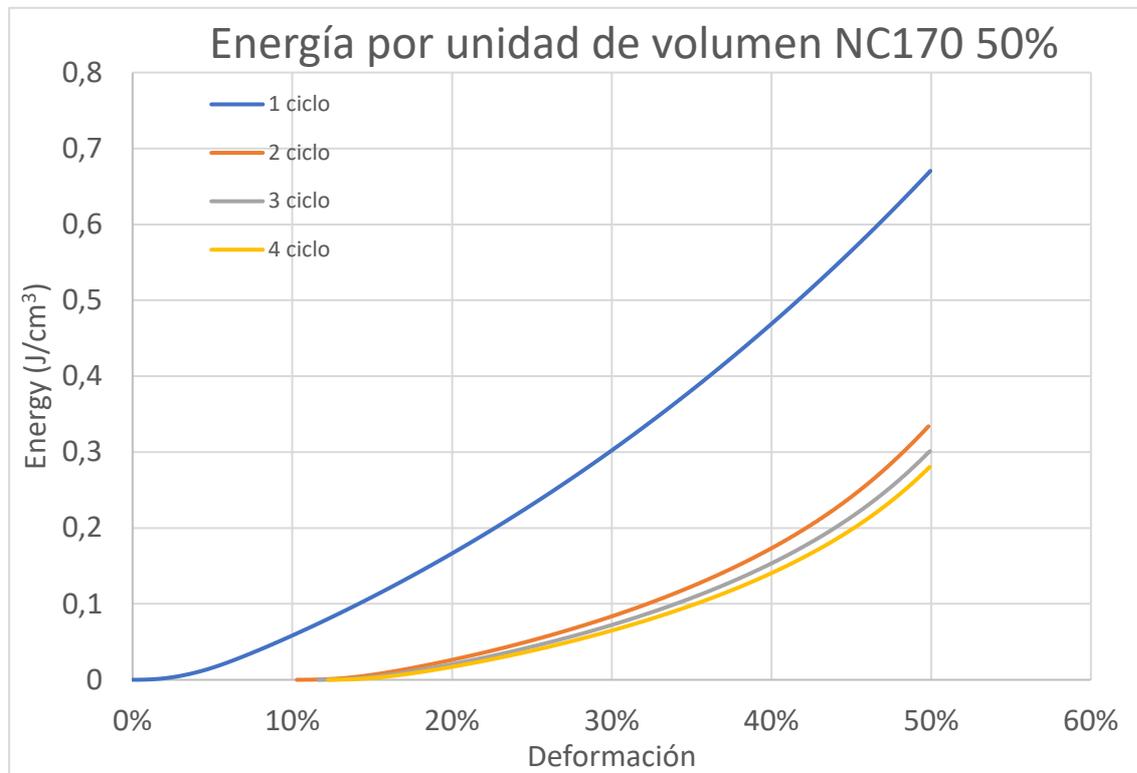


Figura 231

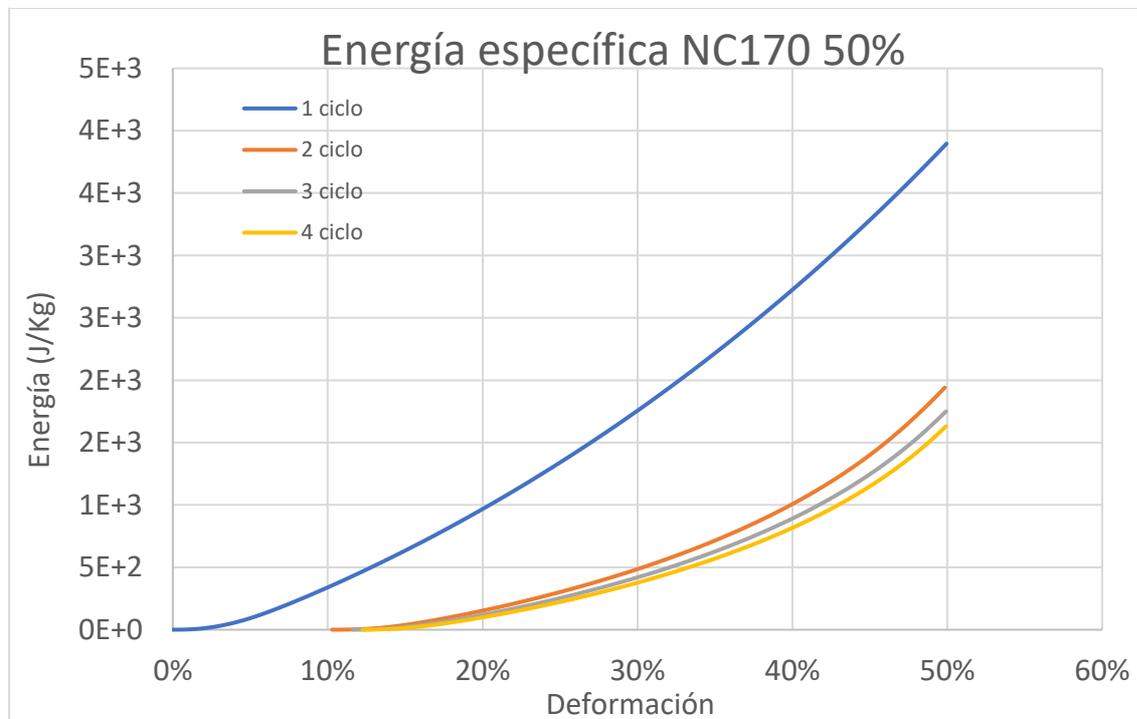


Figura 230

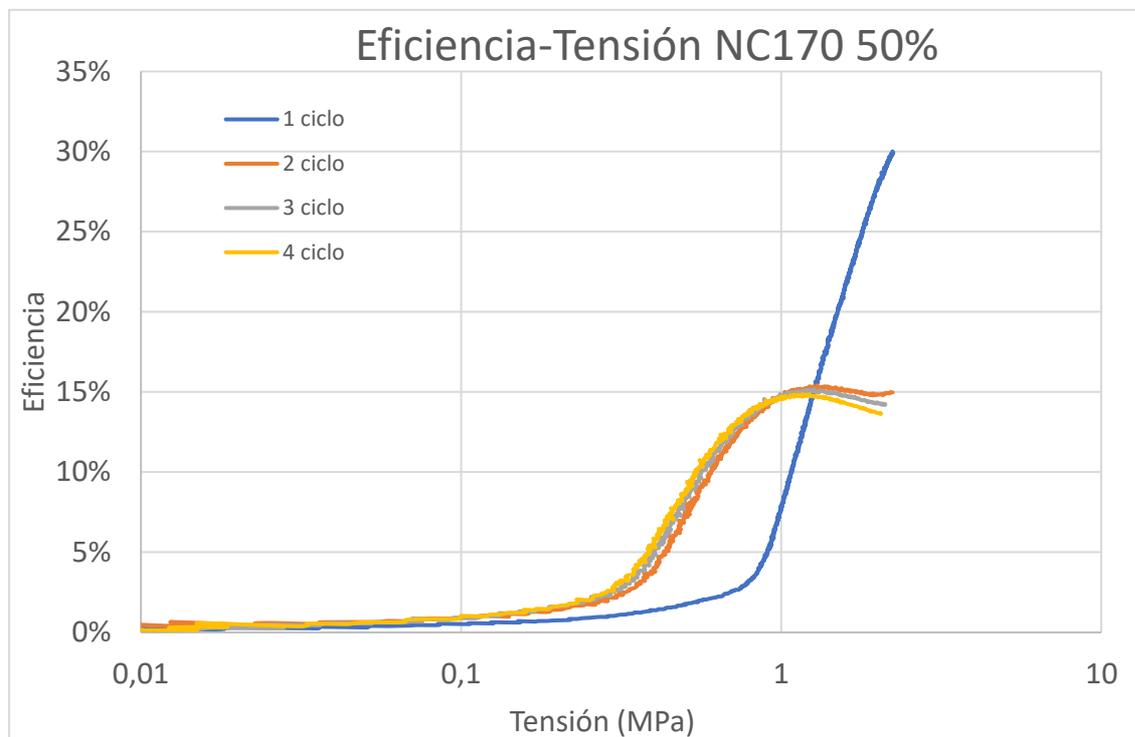


Figura 233

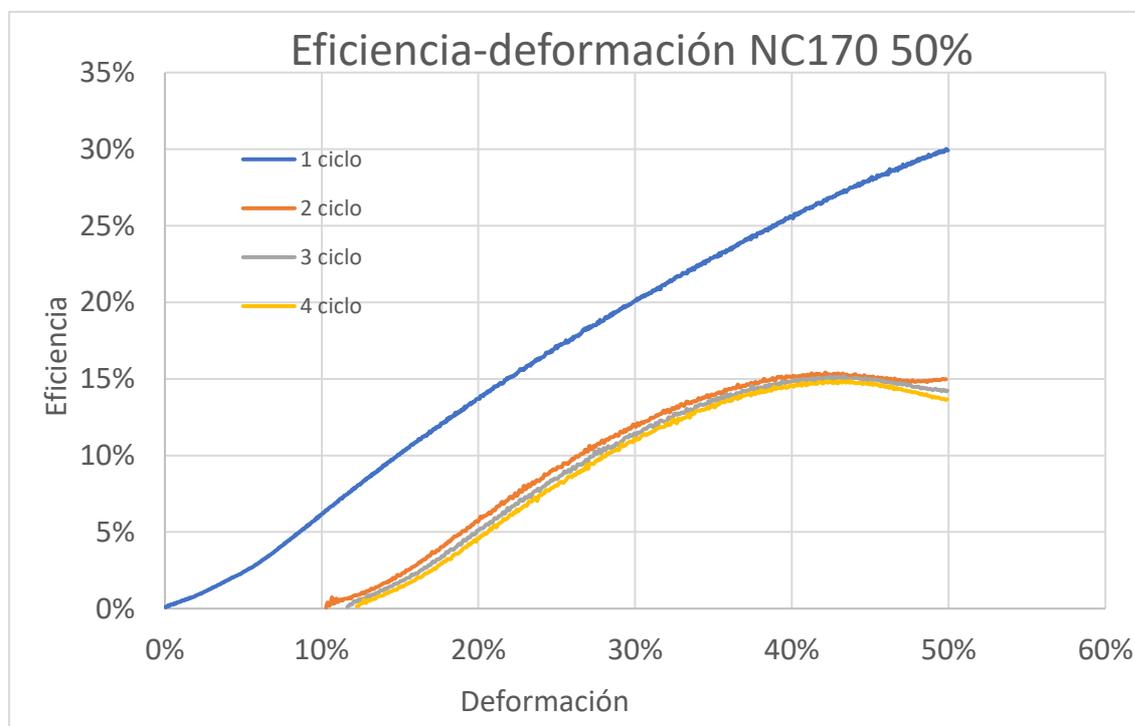


Figura 232

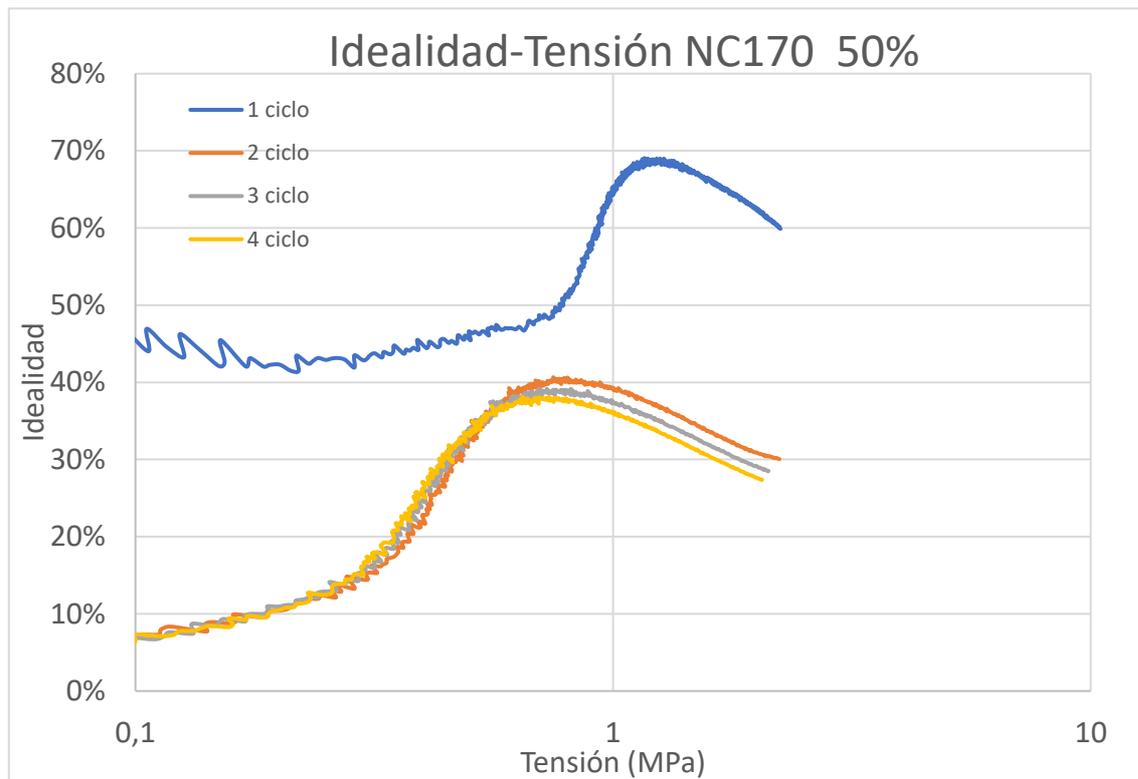


Figura 234

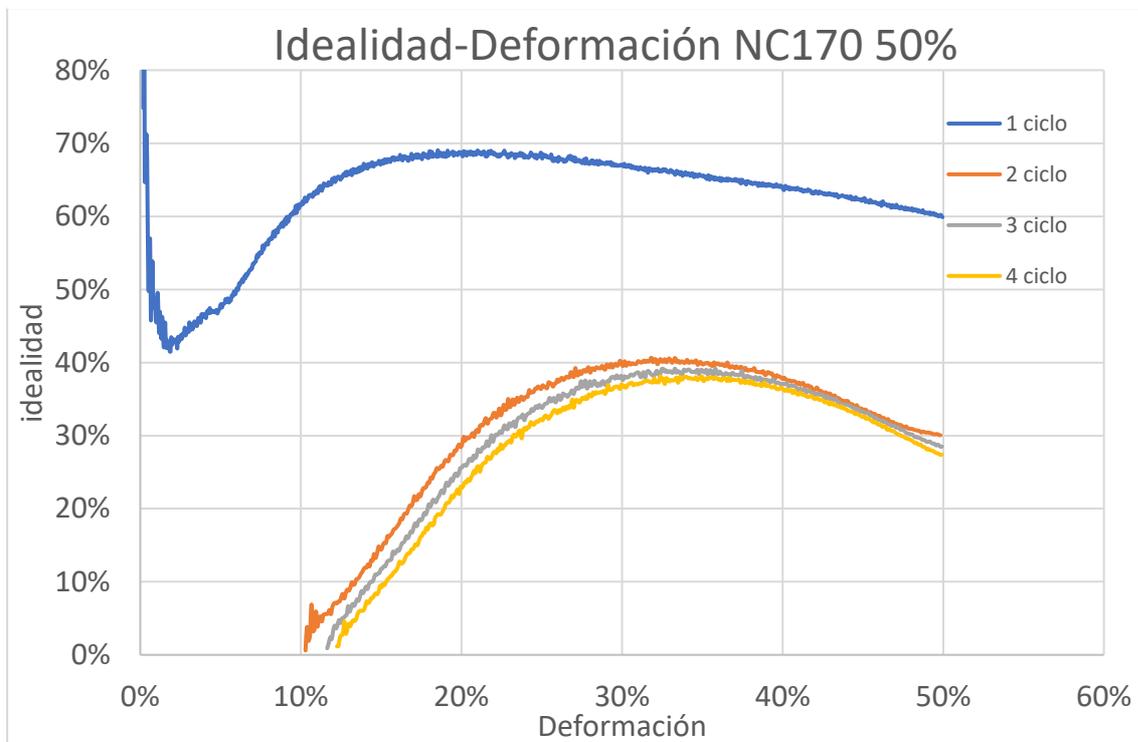


Figura 235

M.5 Material AC250

M.5.1 Ensayos 90%

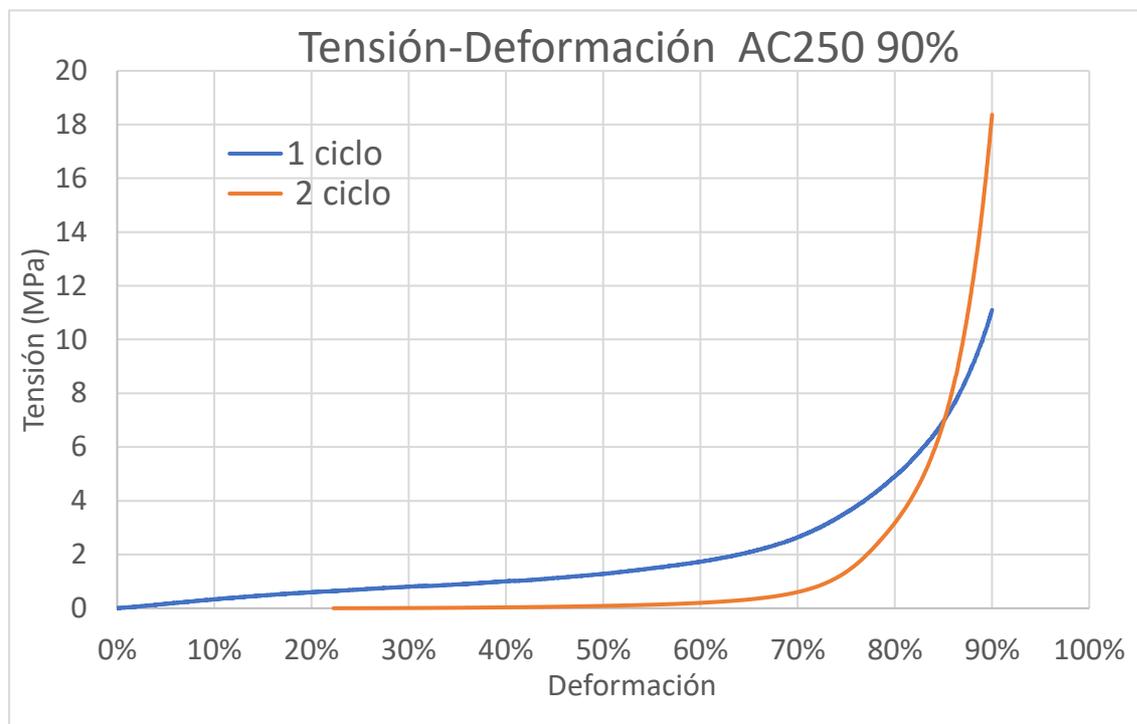


Figura 236

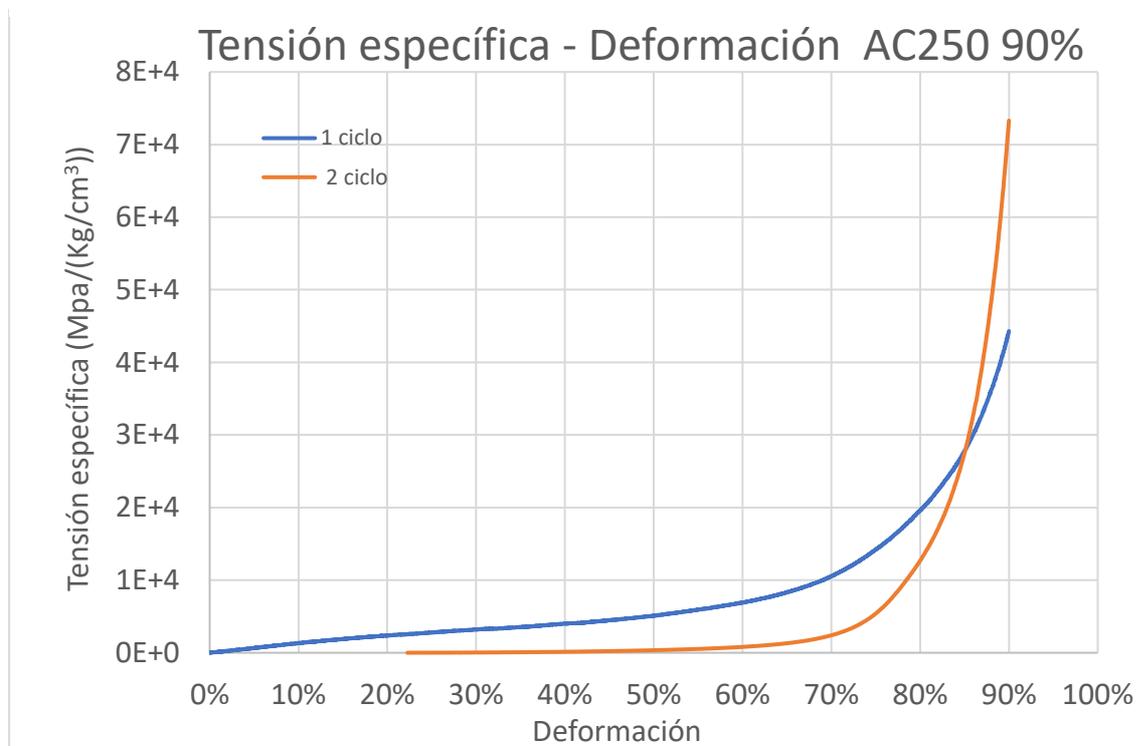


Figura 237

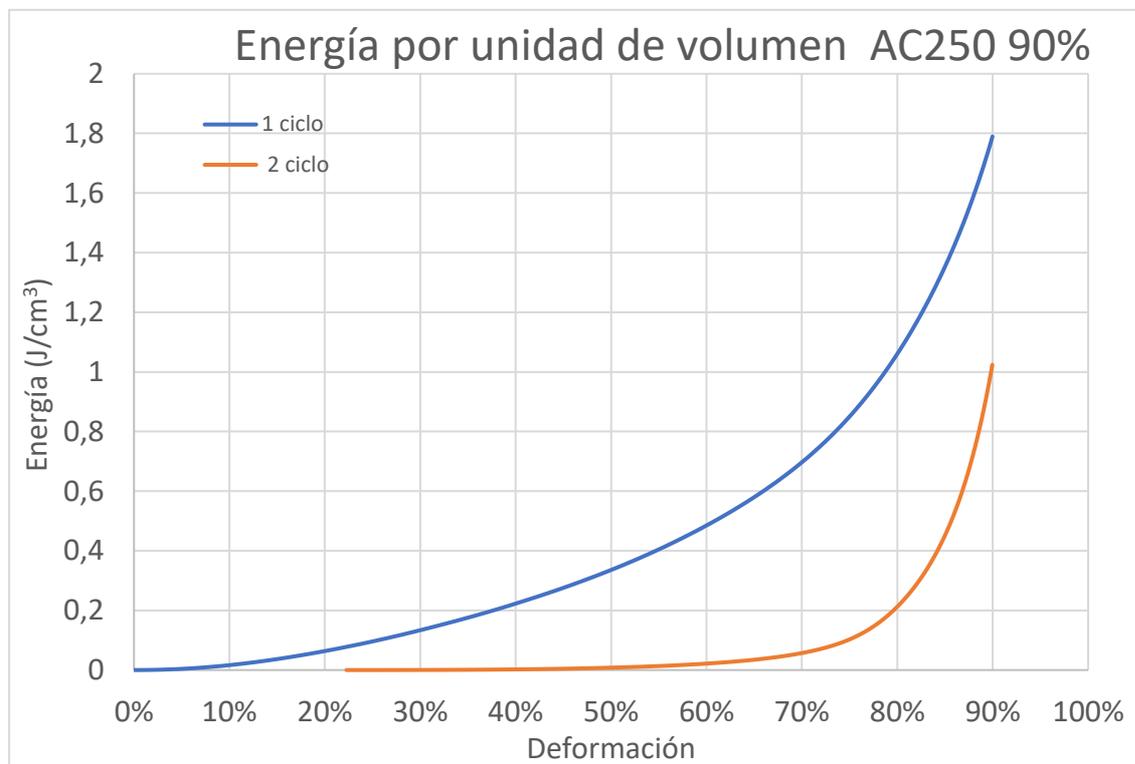


Figura 238

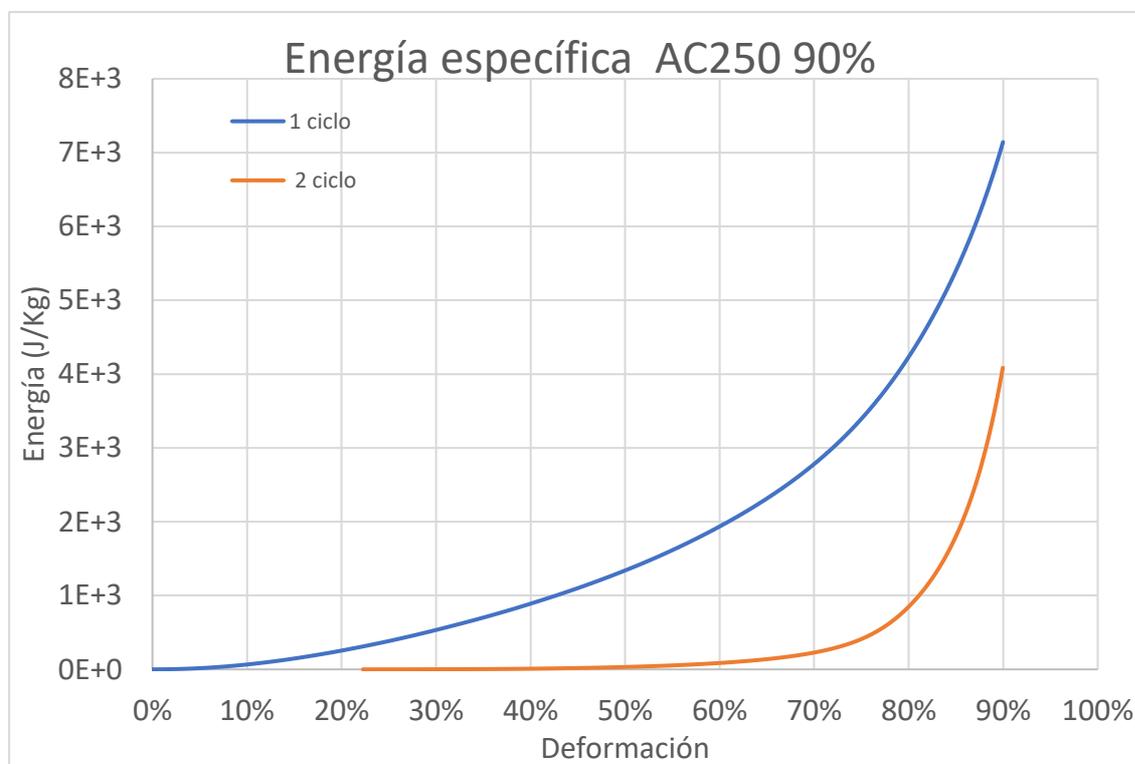


Figura 239

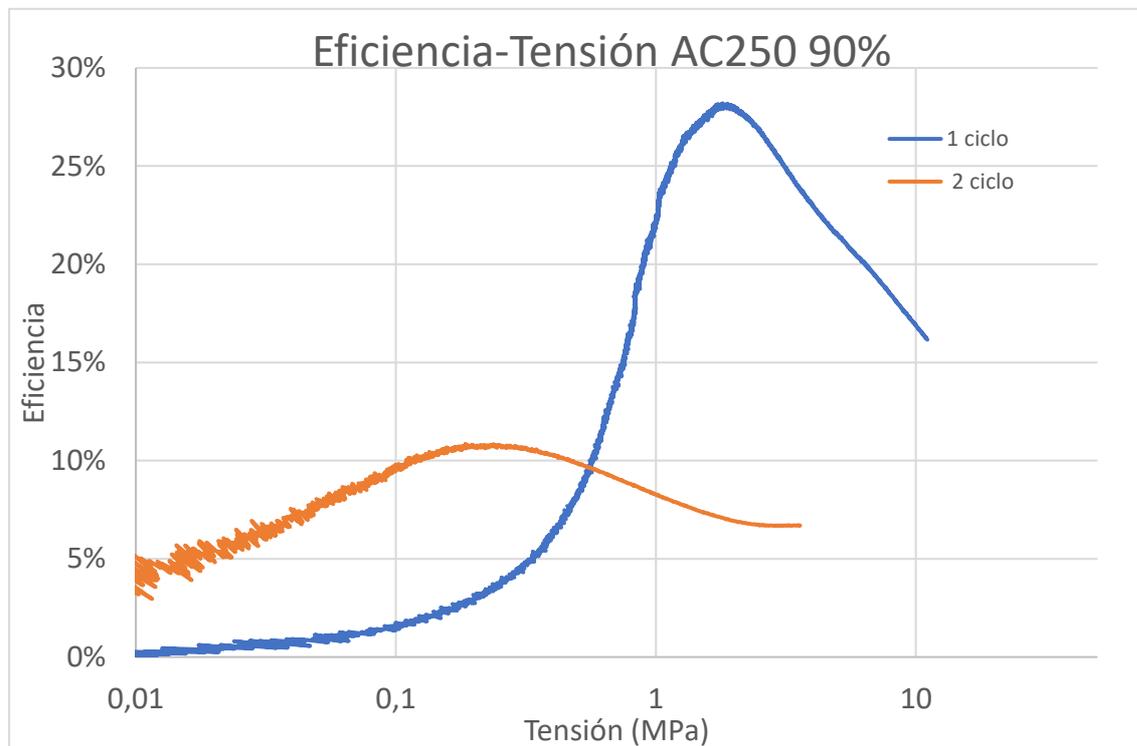


Figura 240

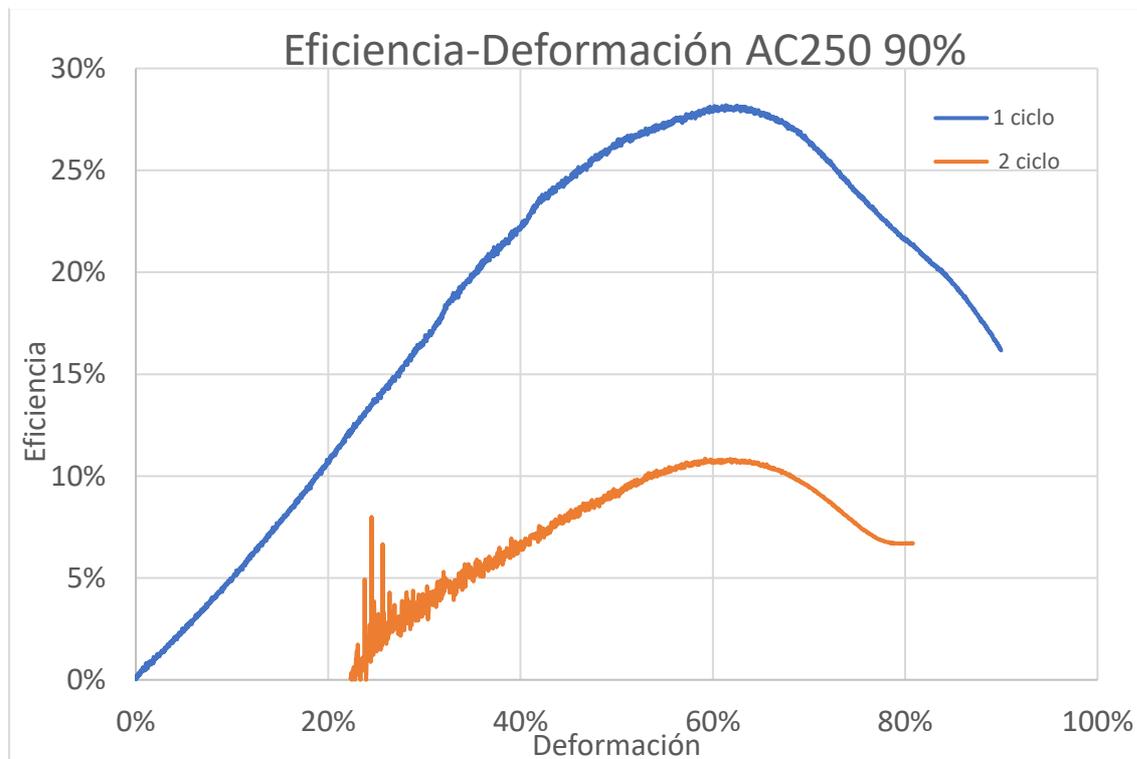


Figura 241

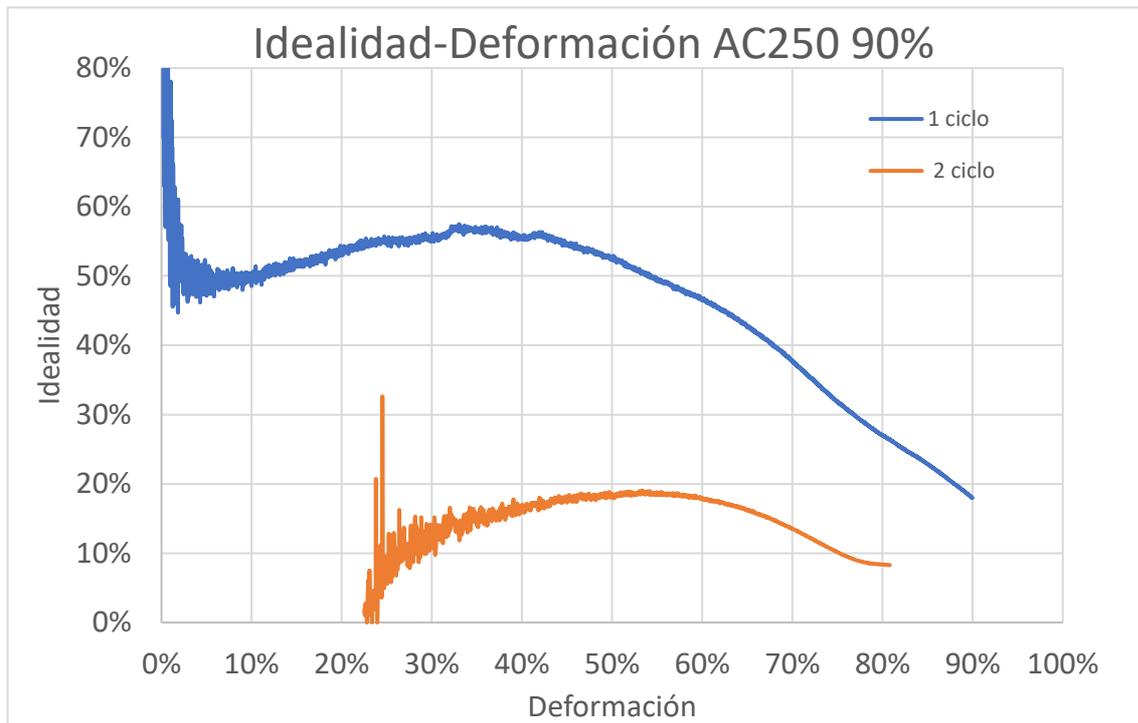


Figura 242

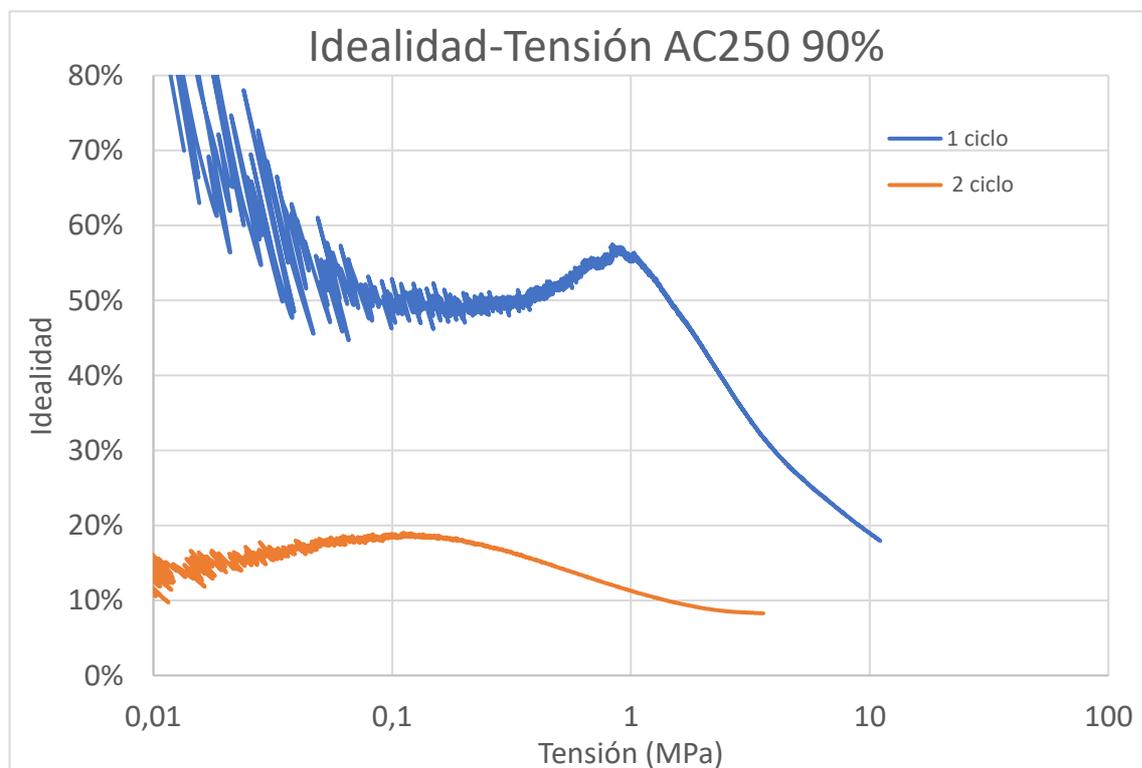


Figura 243

M.5.2 Ensayos 75%

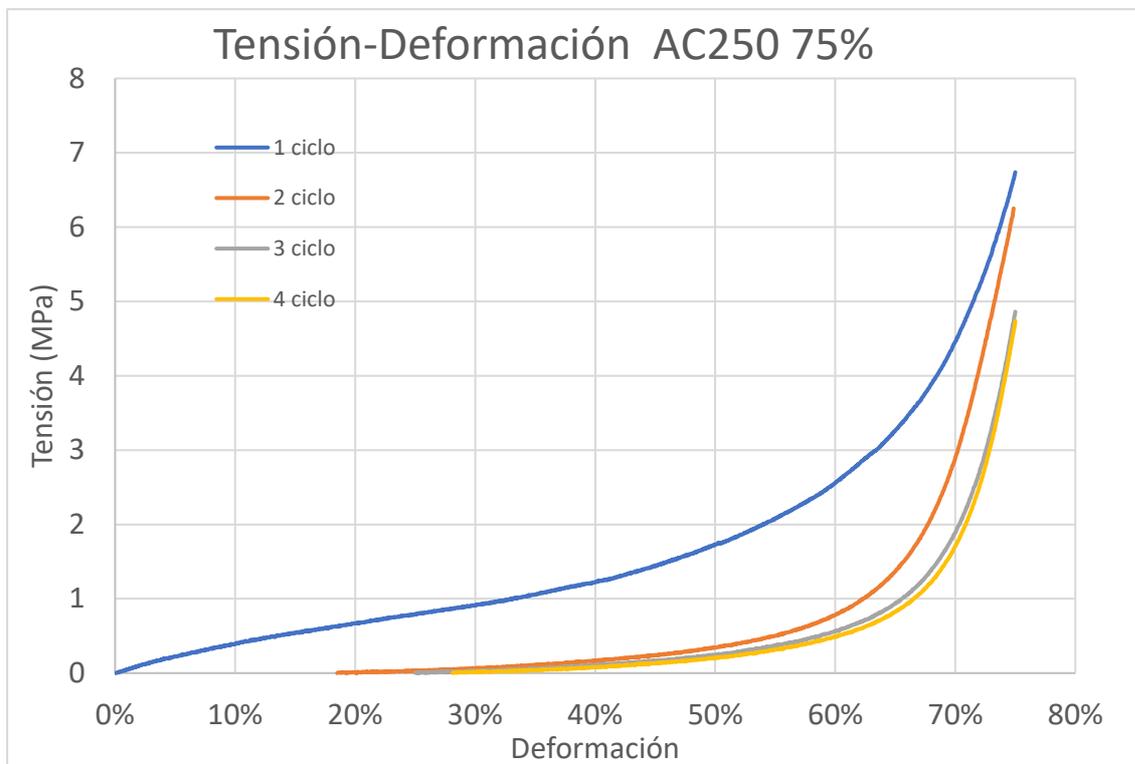


Figura 244

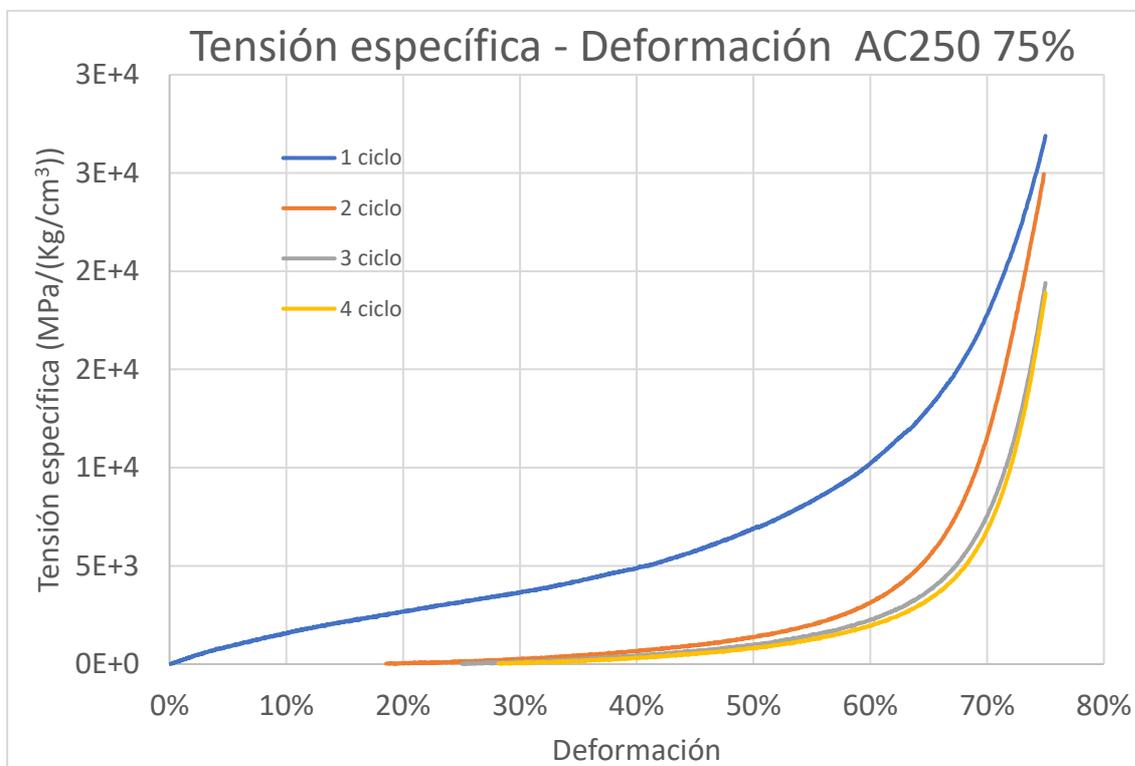


Figura 245

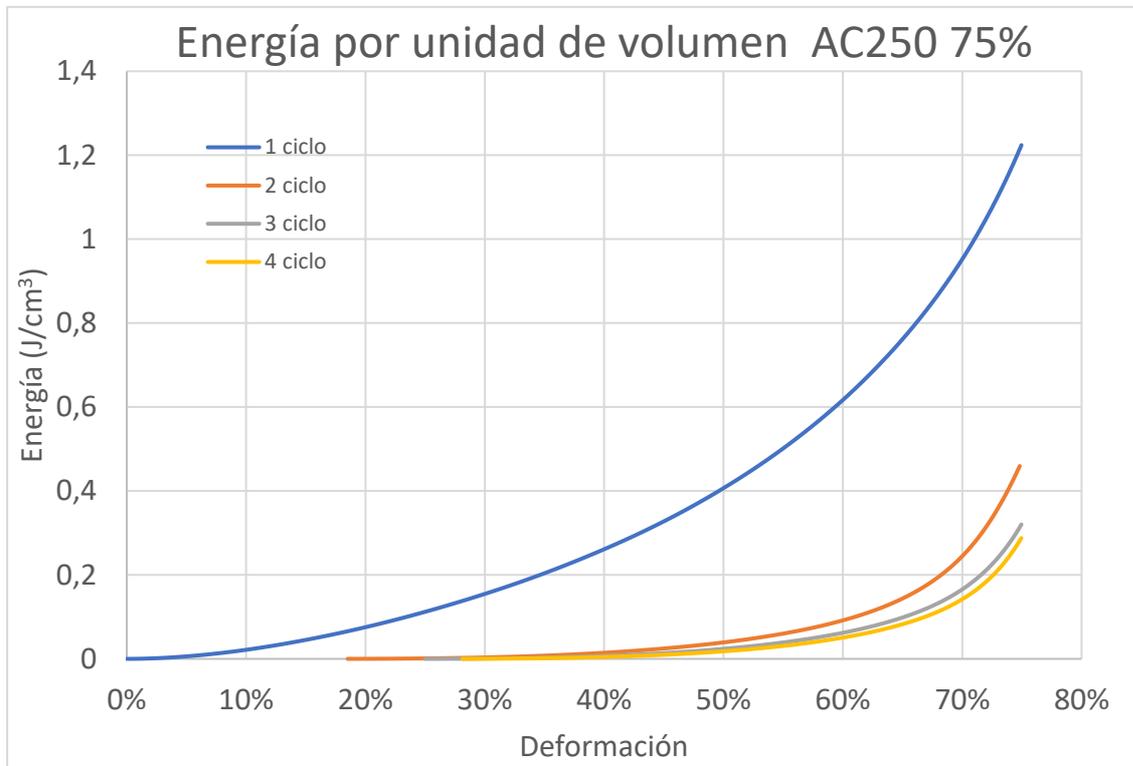


Figura 246

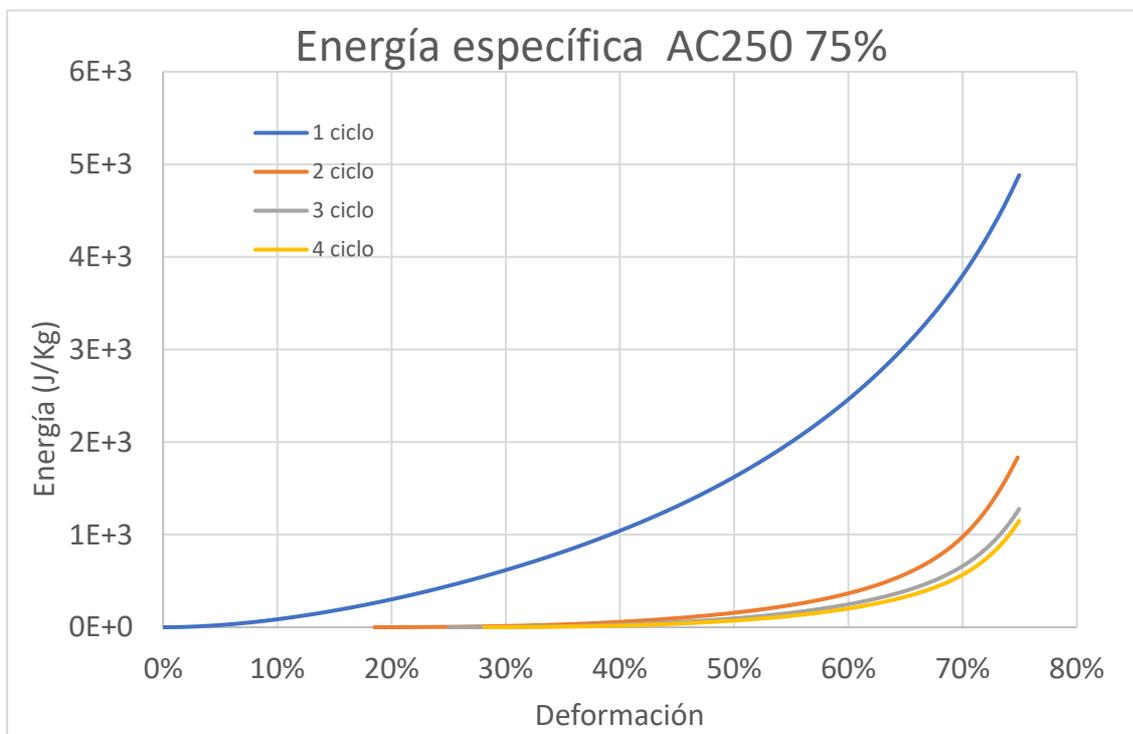


Figura 247

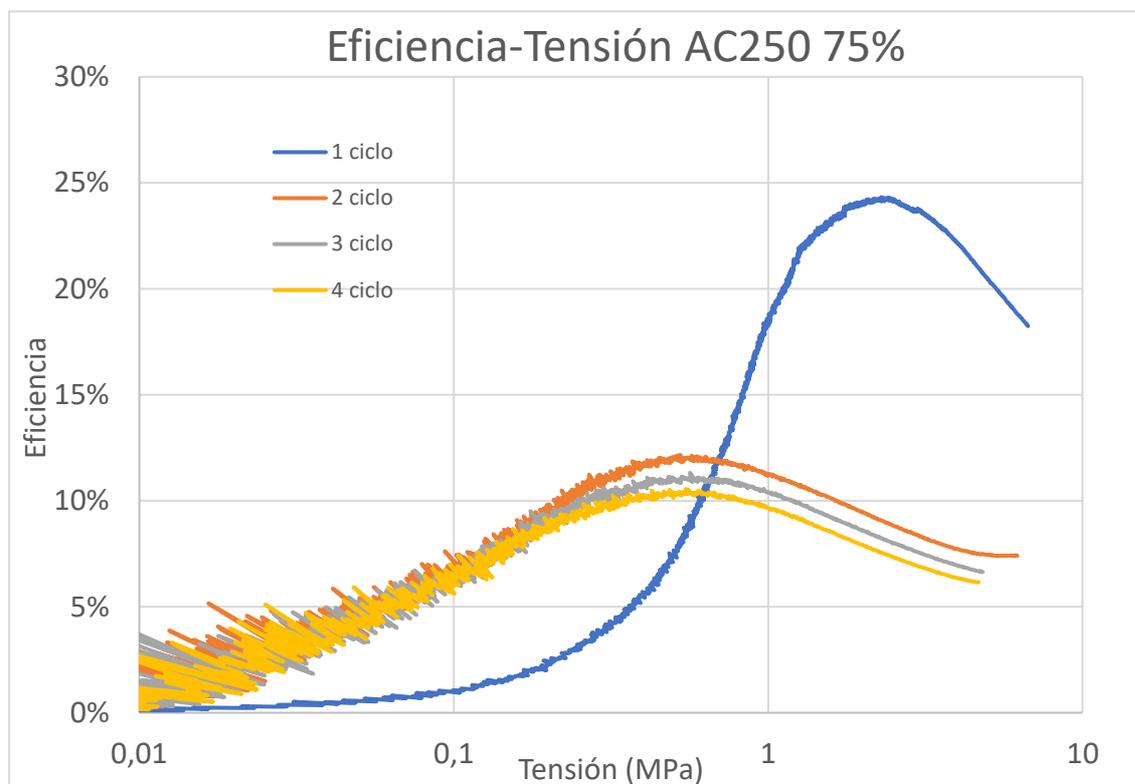


Figura 249

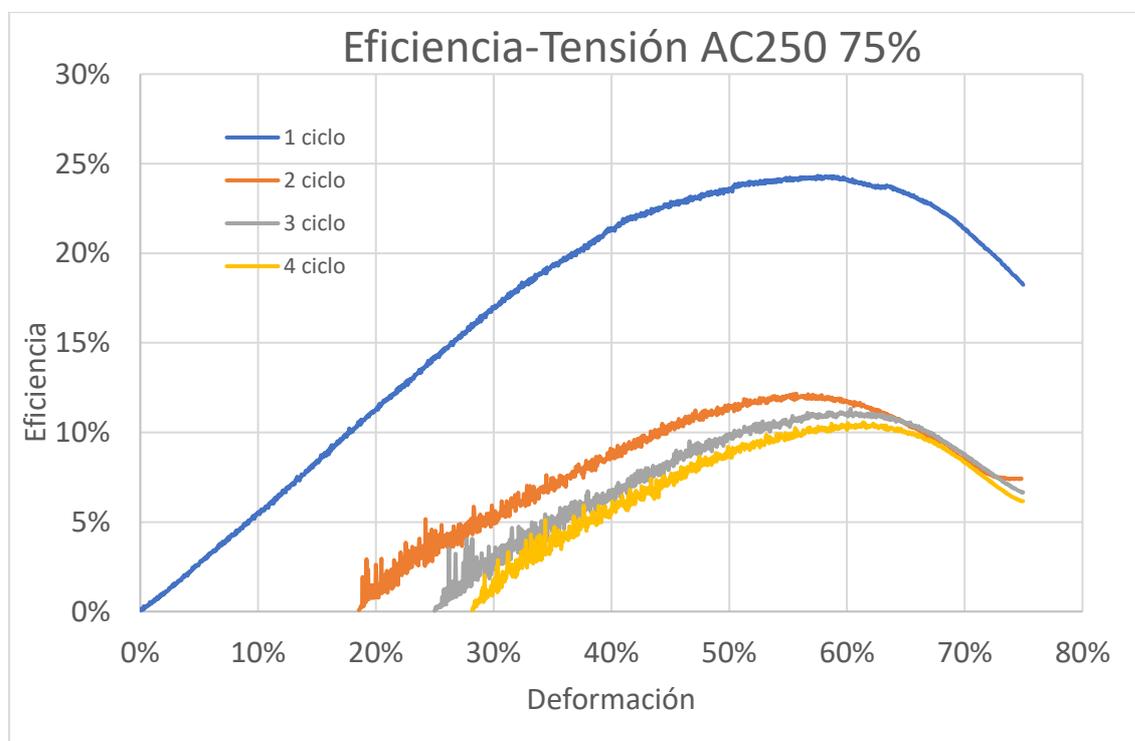


Figura 248

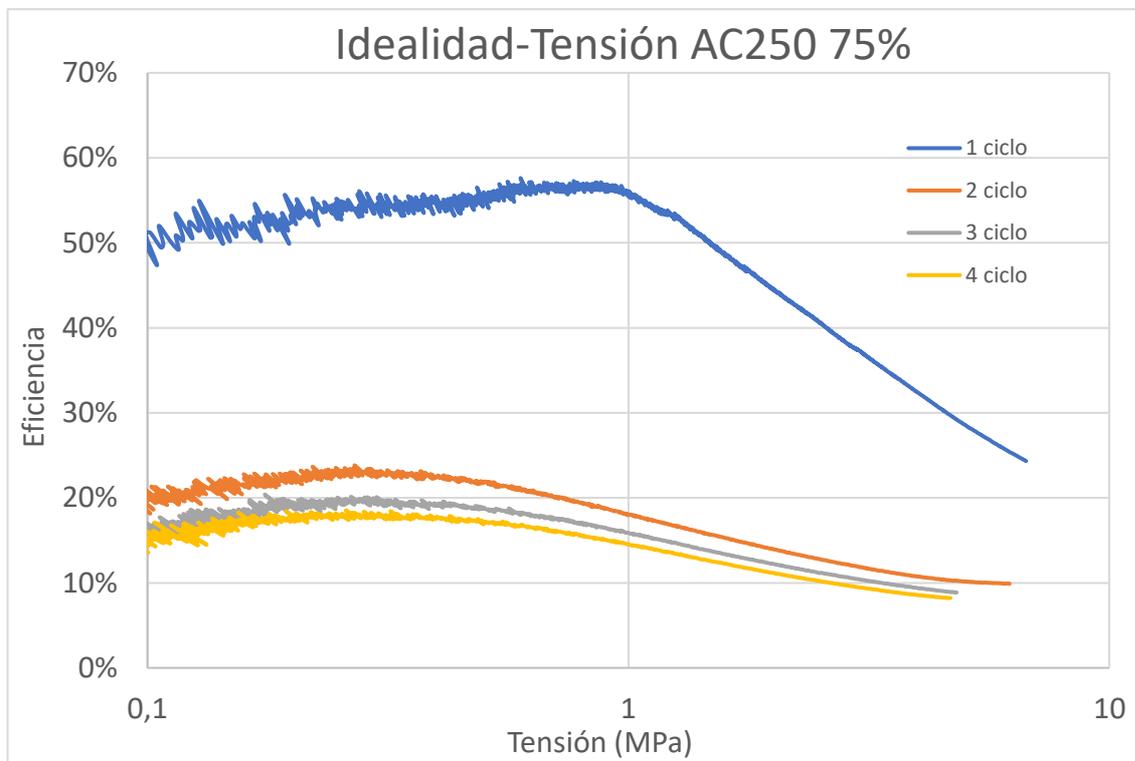


Figura 251

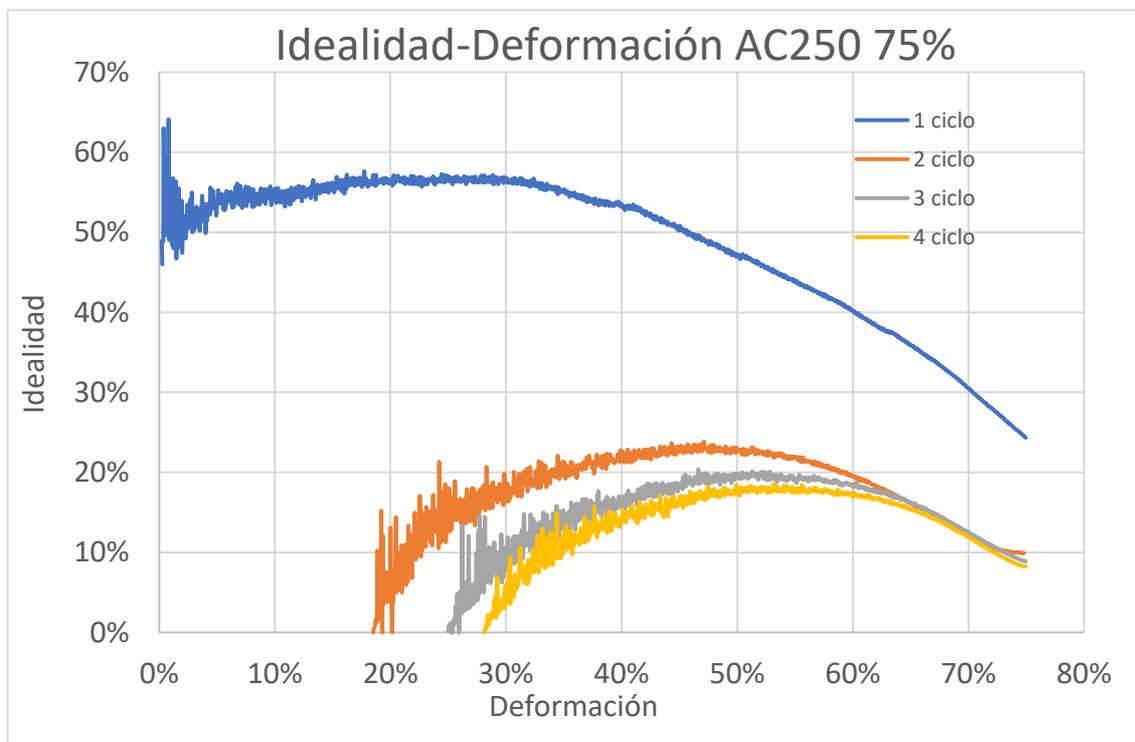


Figura 250

M.5.3 Ensayo al 62,5%

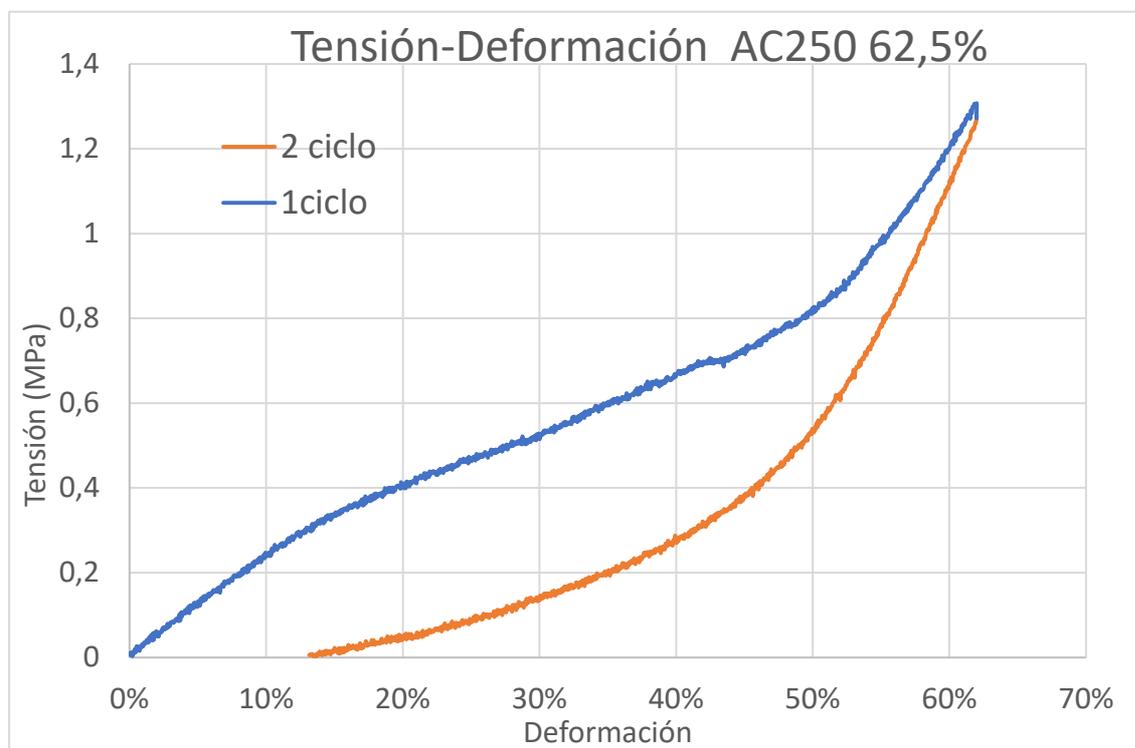


Figura 252

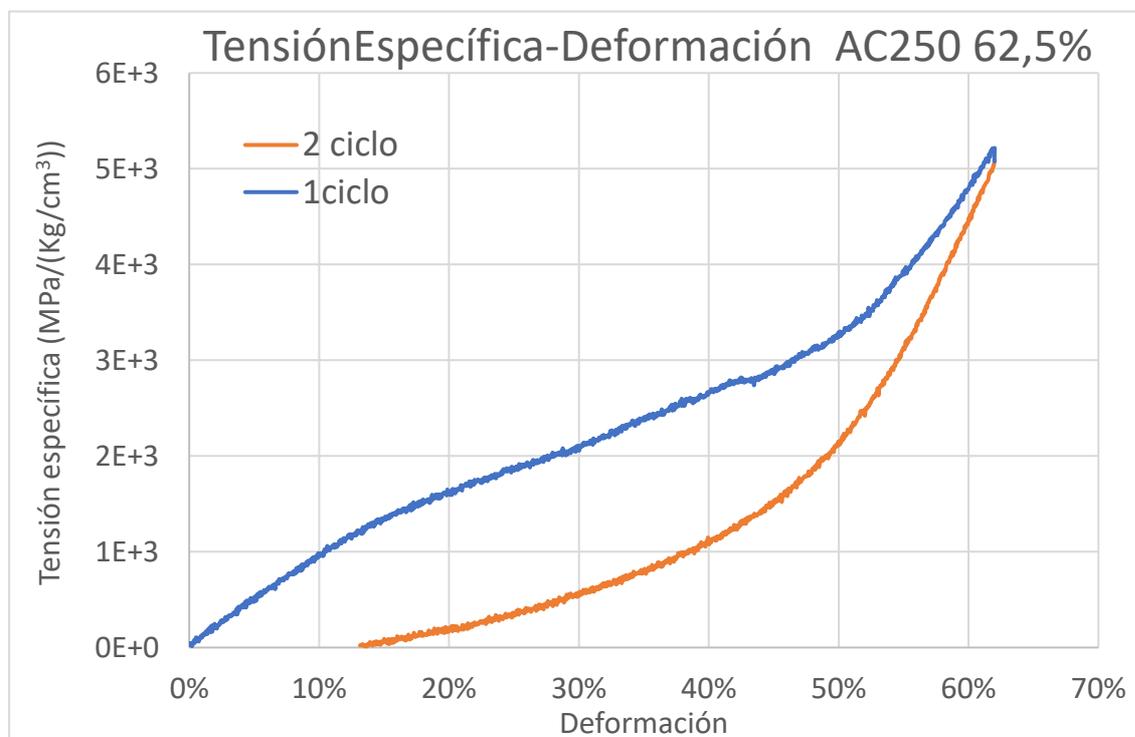


Figura 253



Figura 254

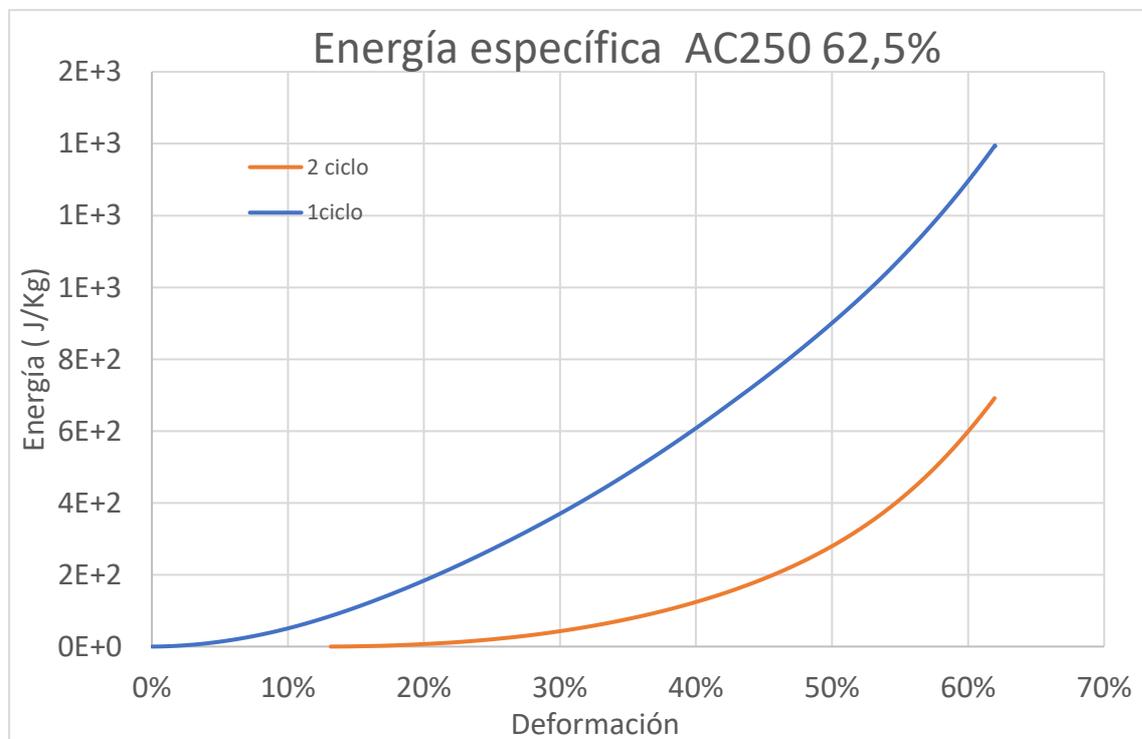


Figura 255

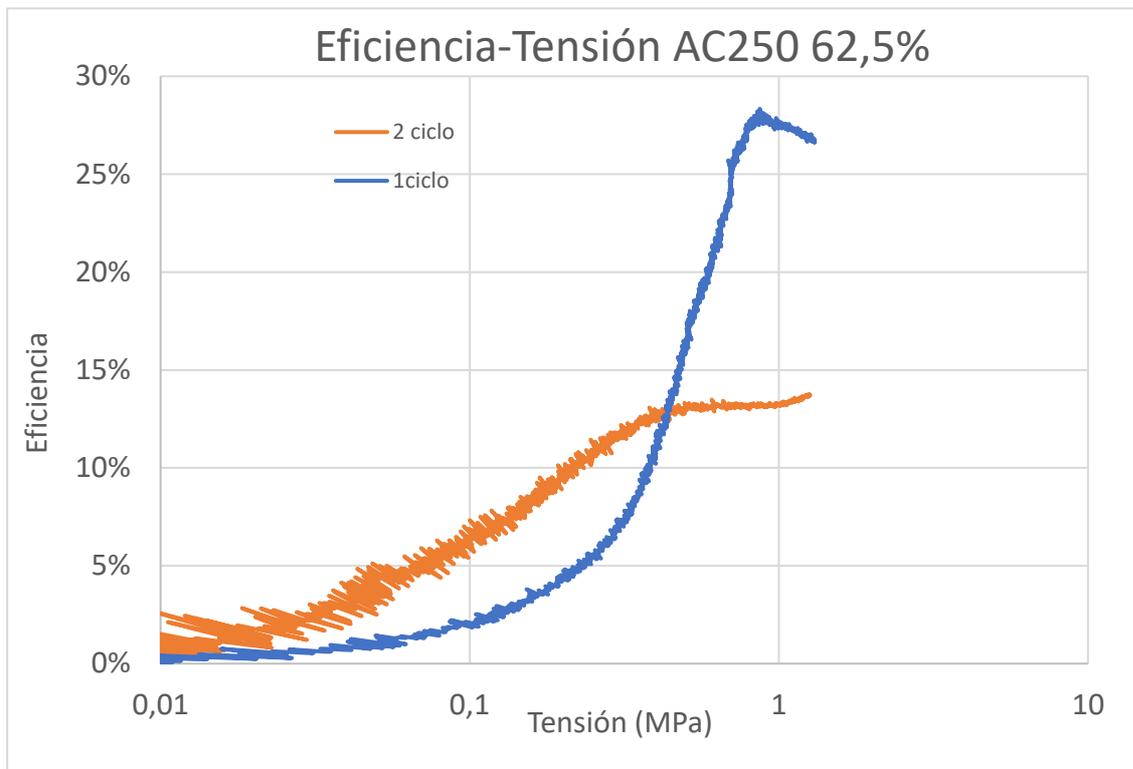


Figura 256

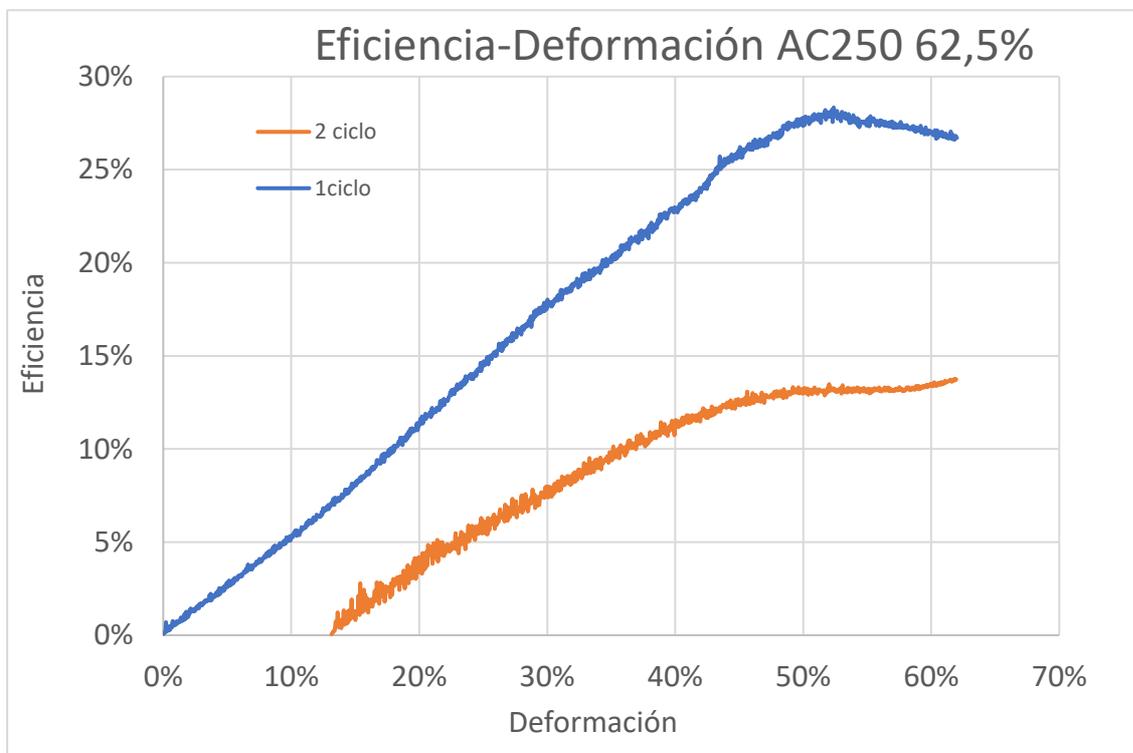


Figura 257

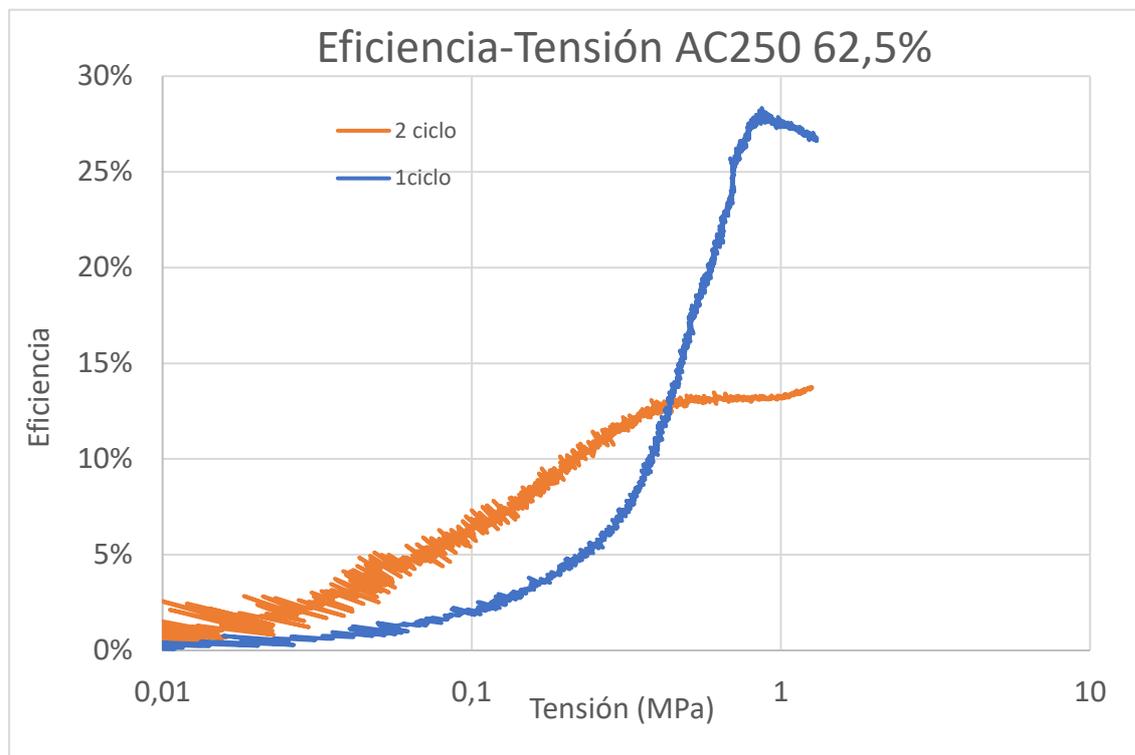


Figura 259

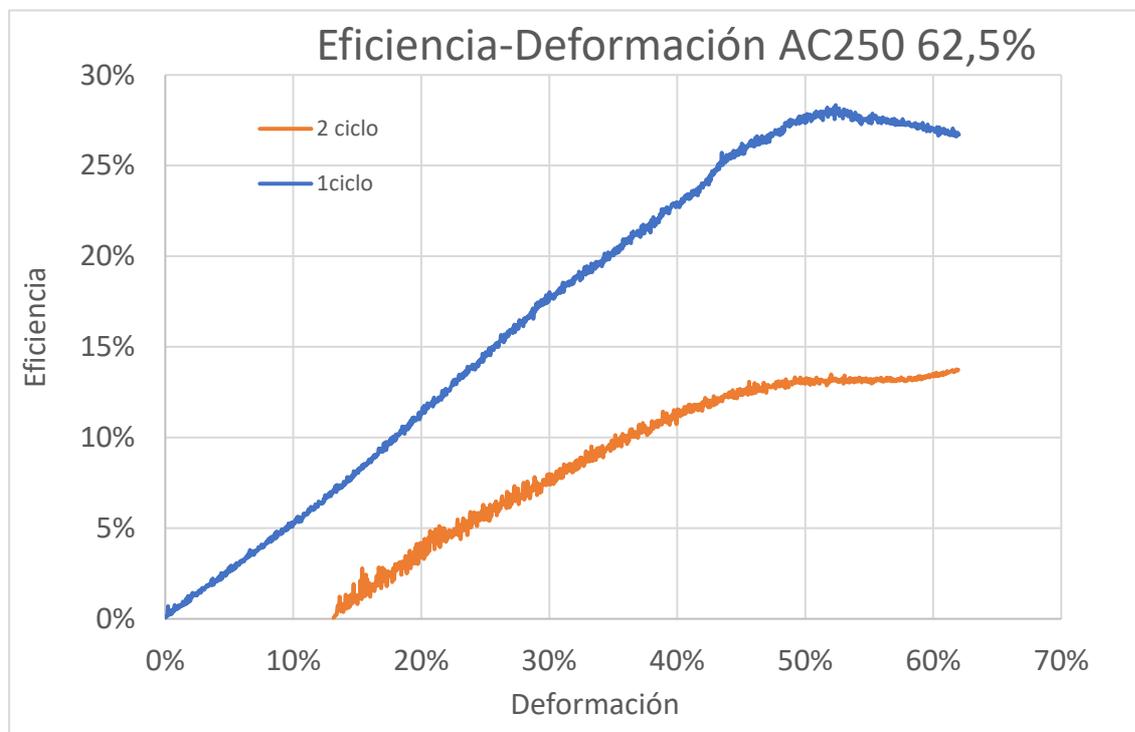


Figura 258

M.5.4 Ensayos al 50%

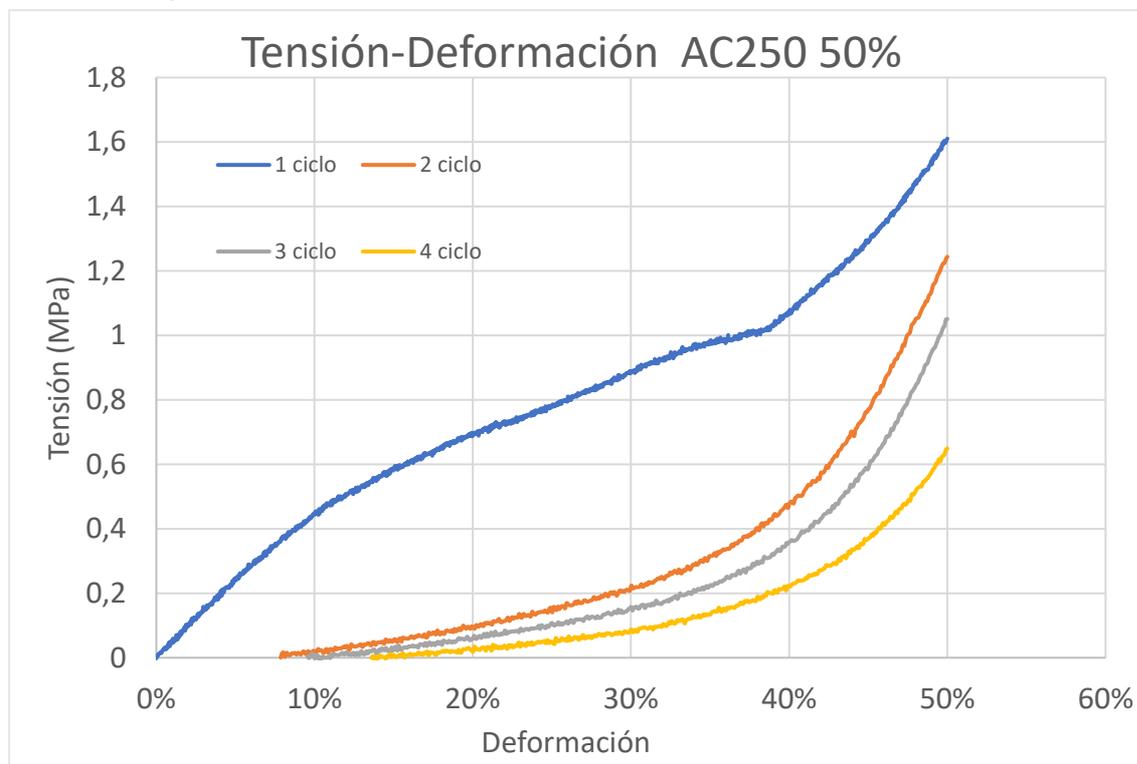


Figura 261

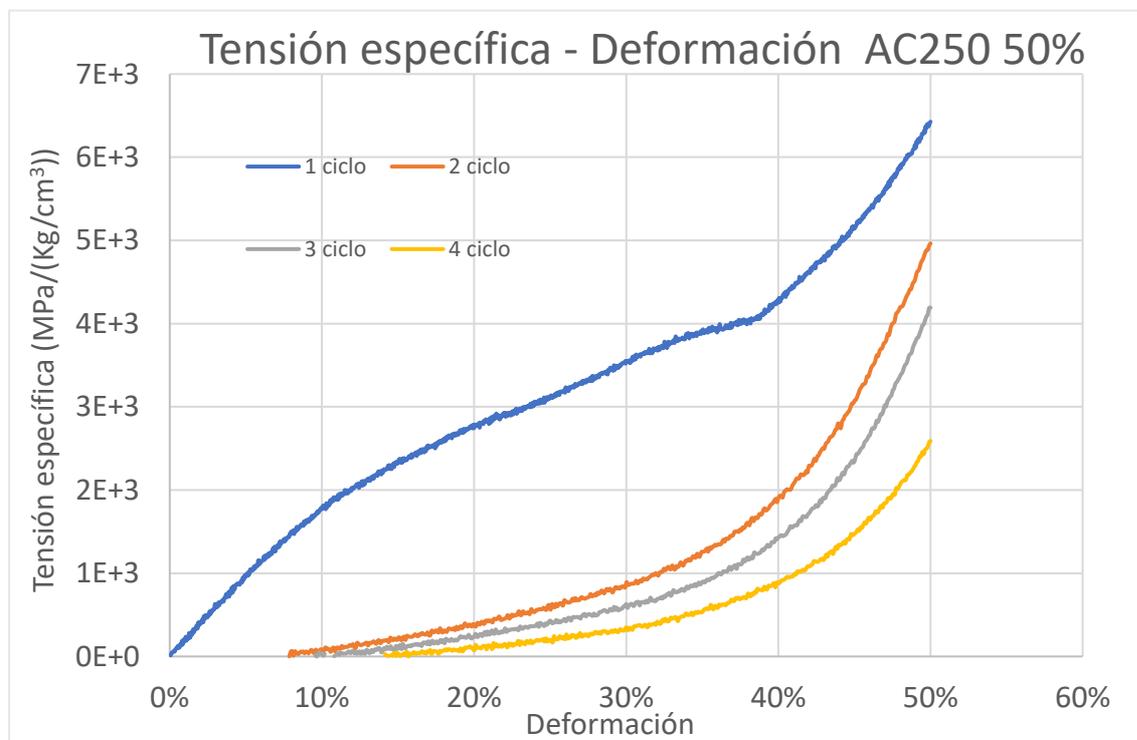


Figura 260

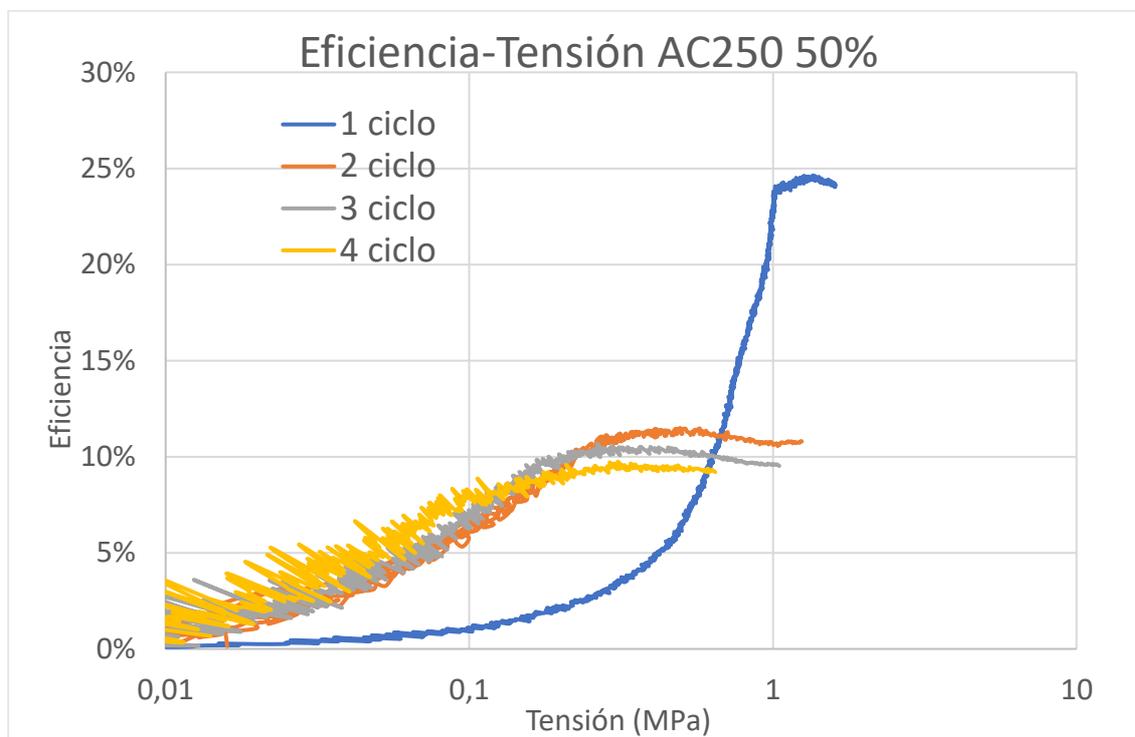


Figura 262

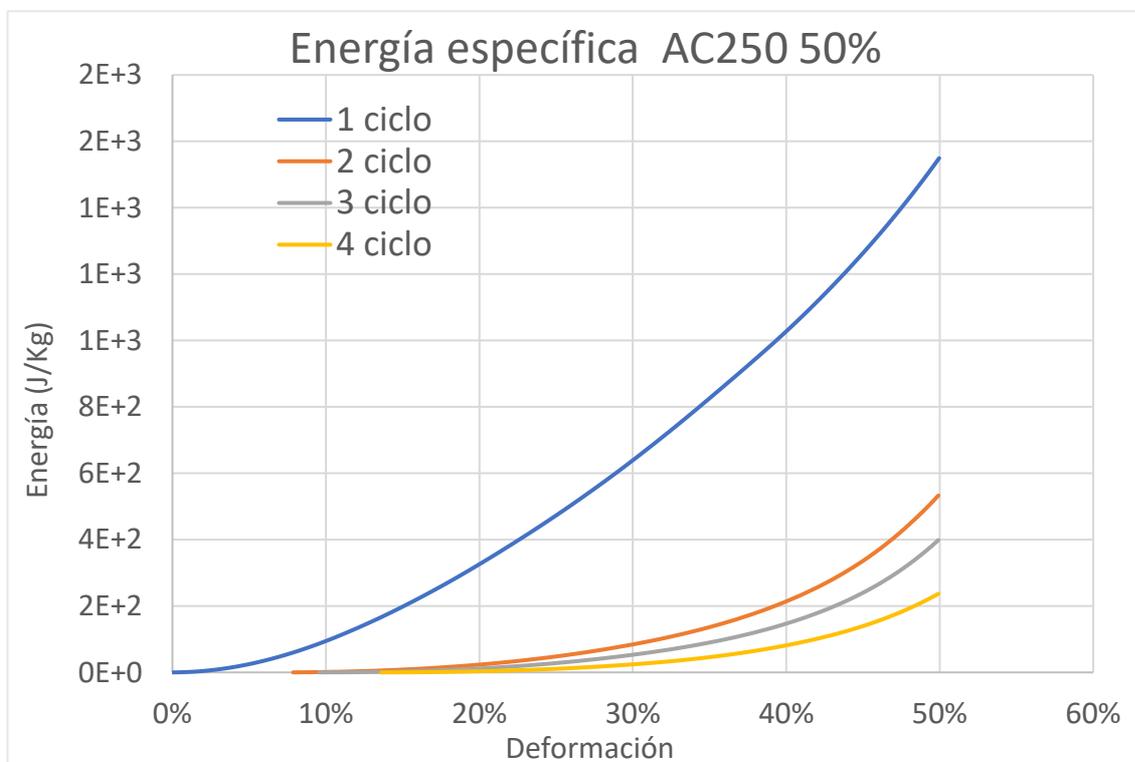


Figura 263

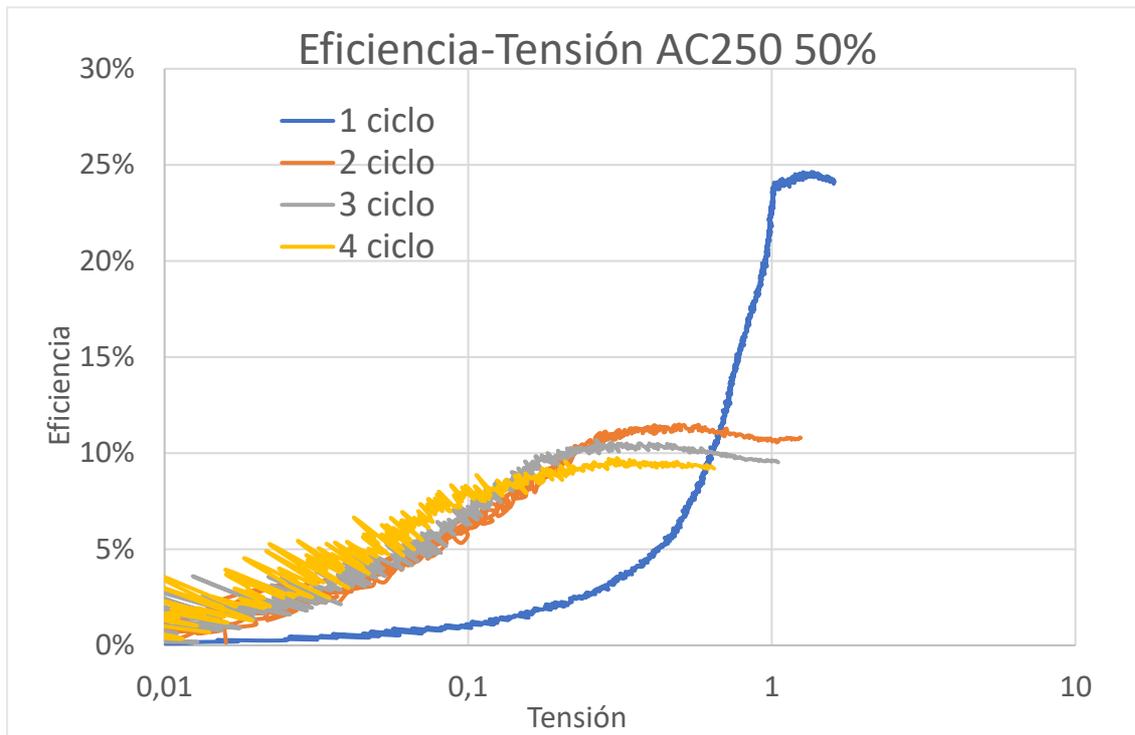


Figura 264

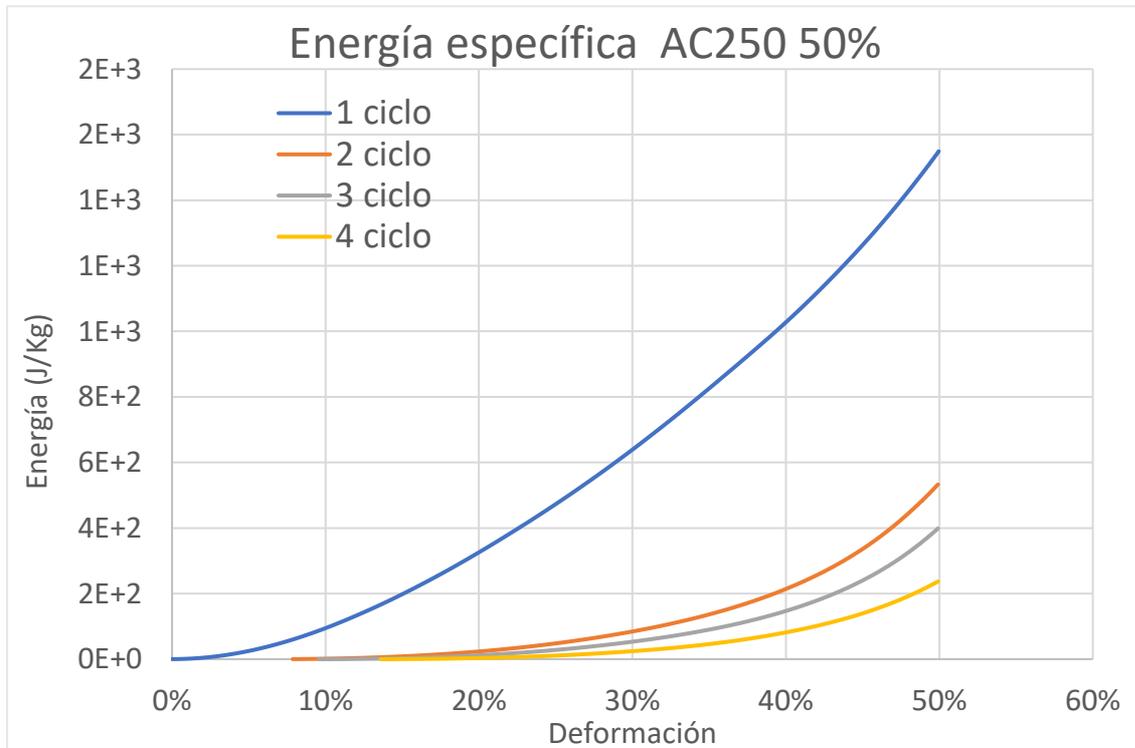


Figura 265

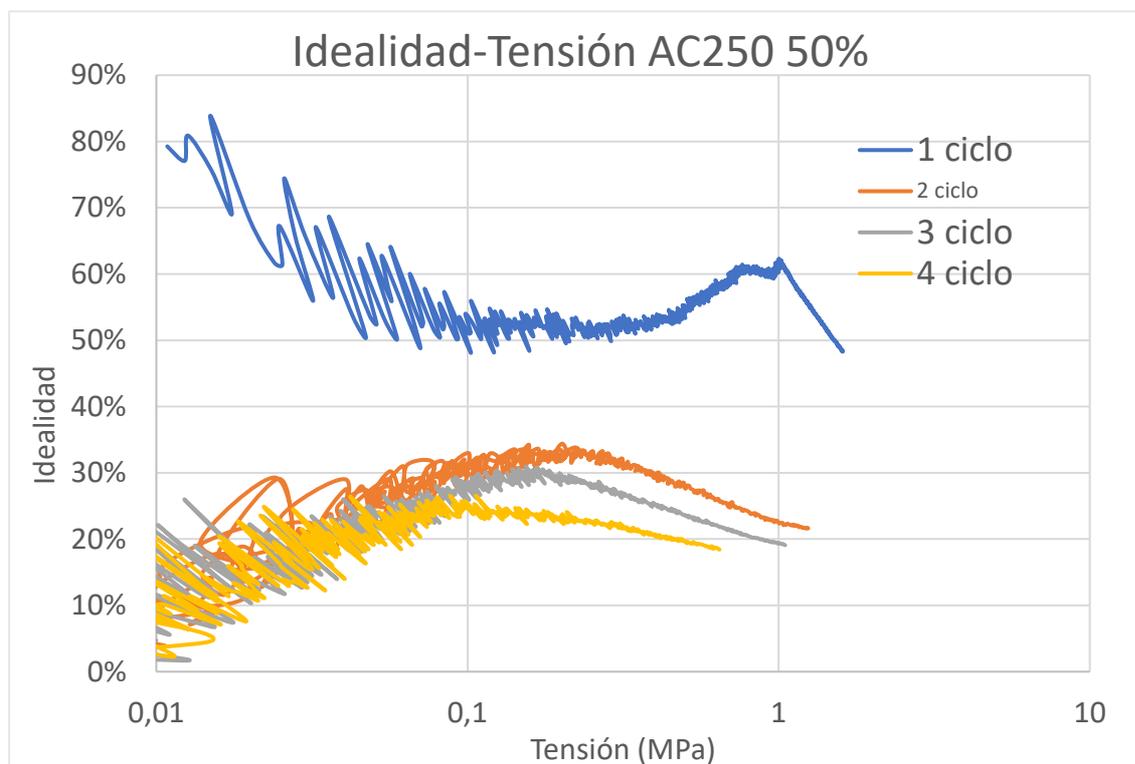


Figura 266

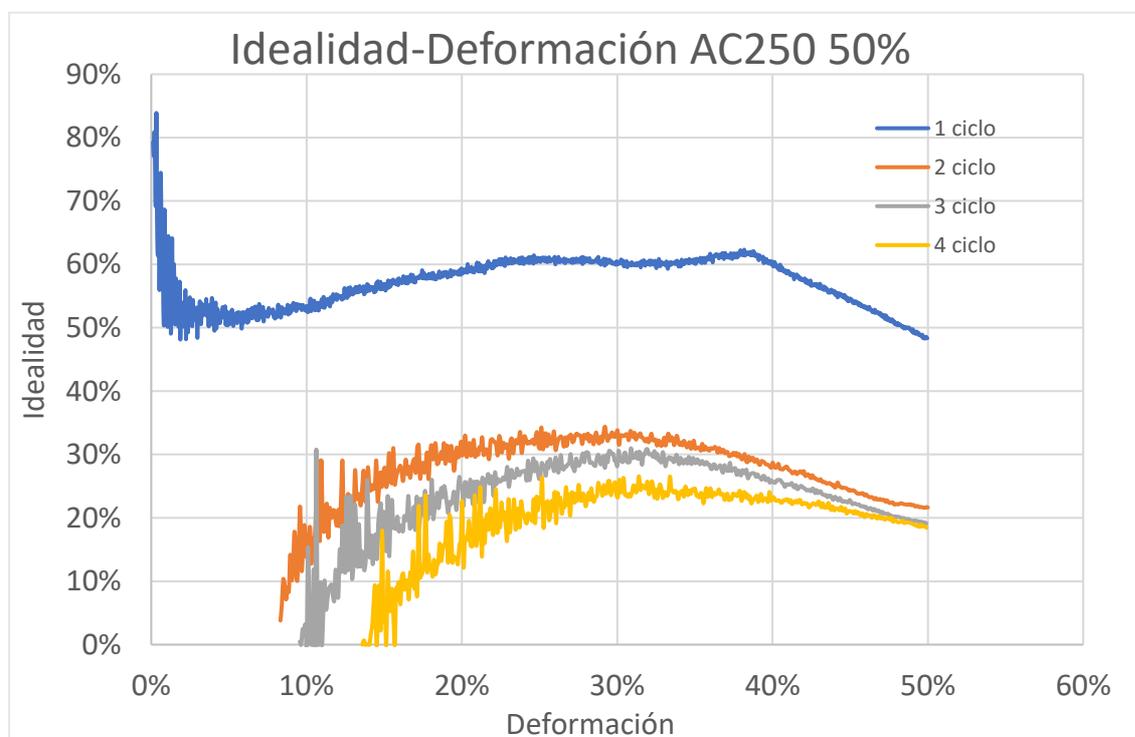


Figura 267

M.6 Material BA120

M.6.1 Ensayos al 90%

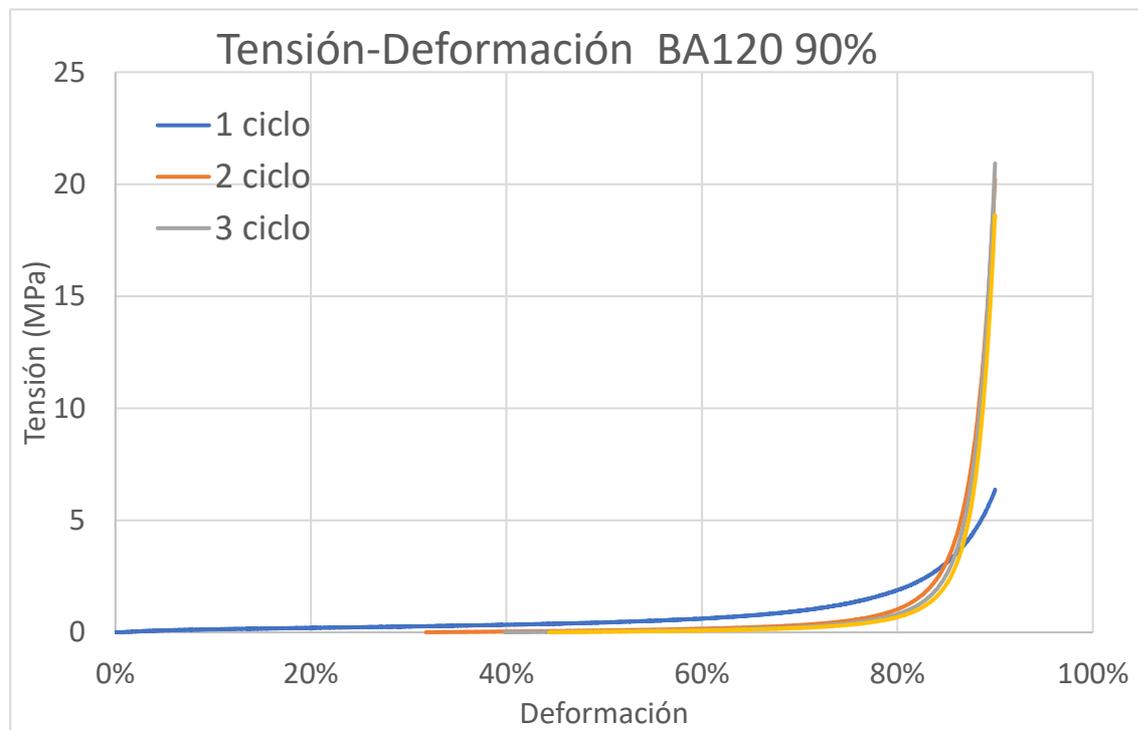


Figura 268

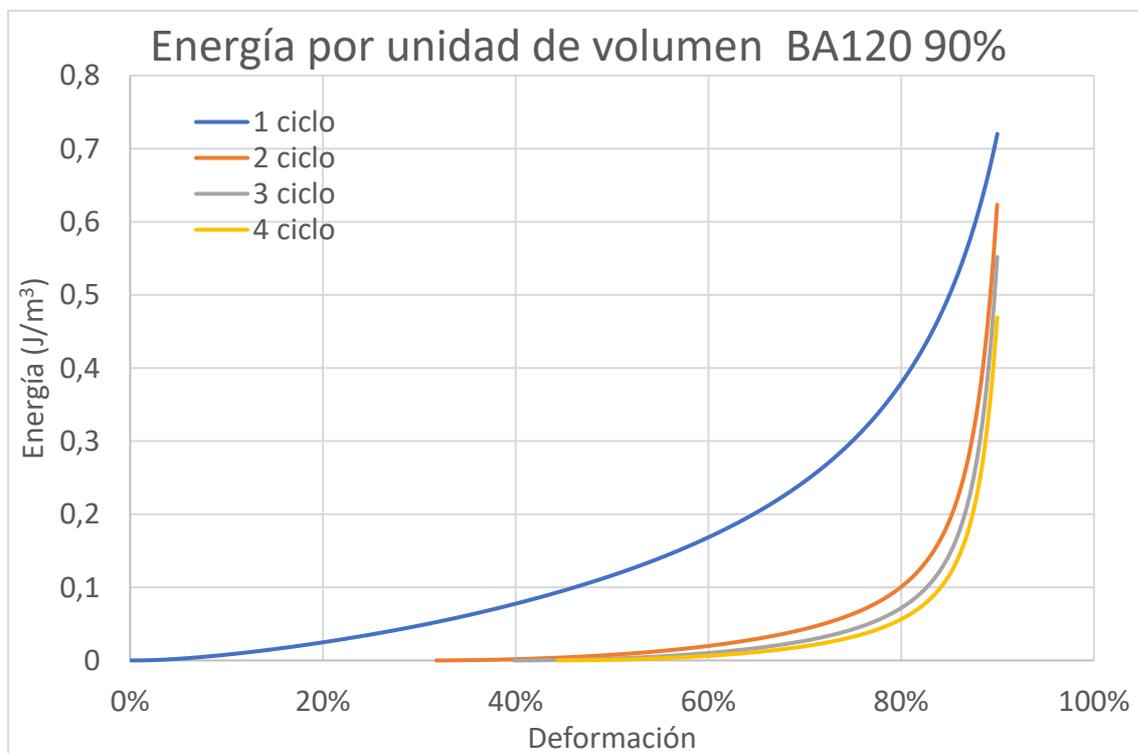


Figura 269

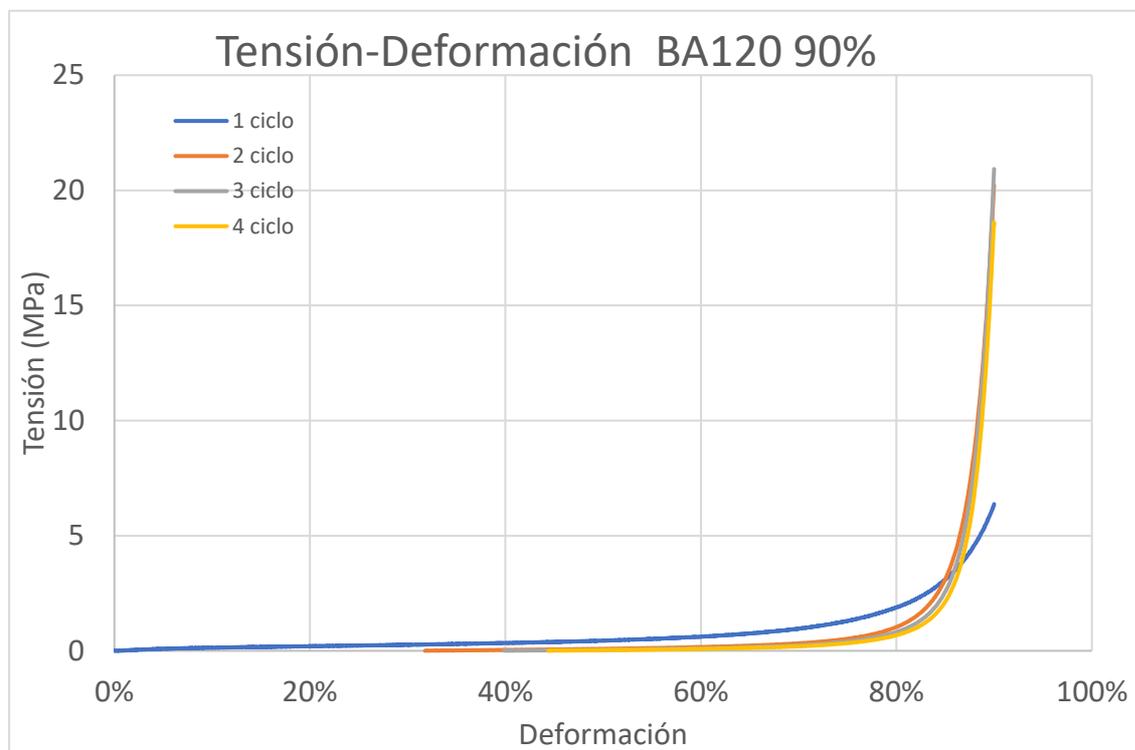


Figura 270

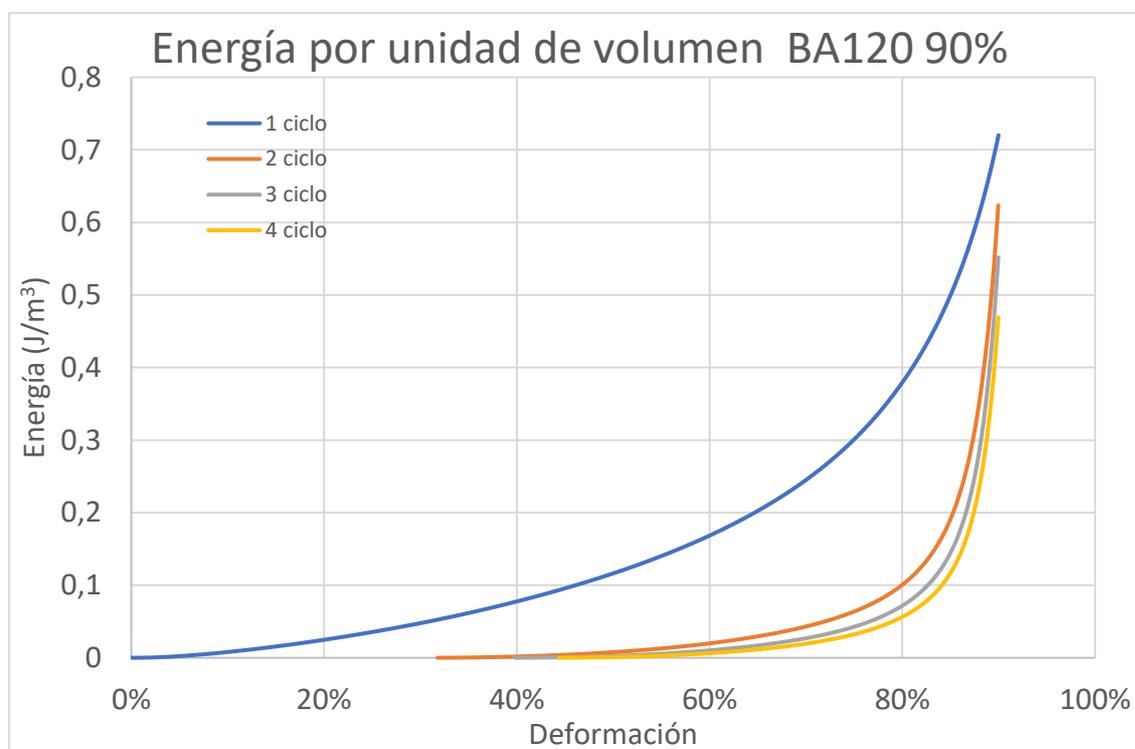


Figura 271

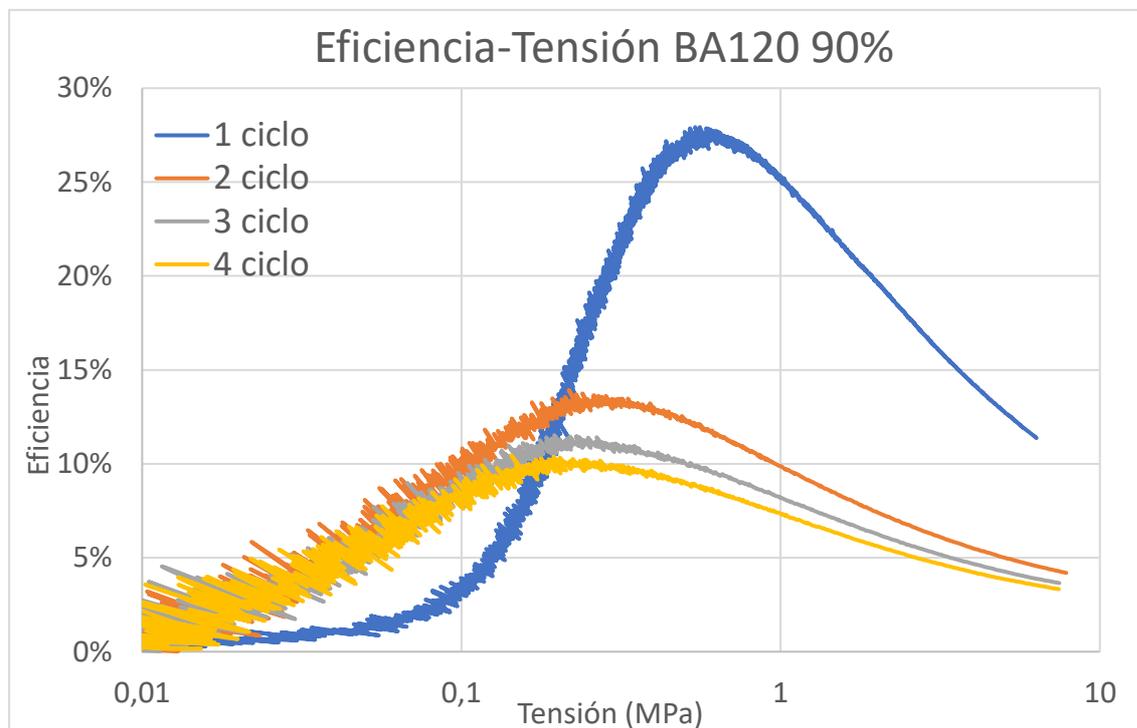


Figura 272

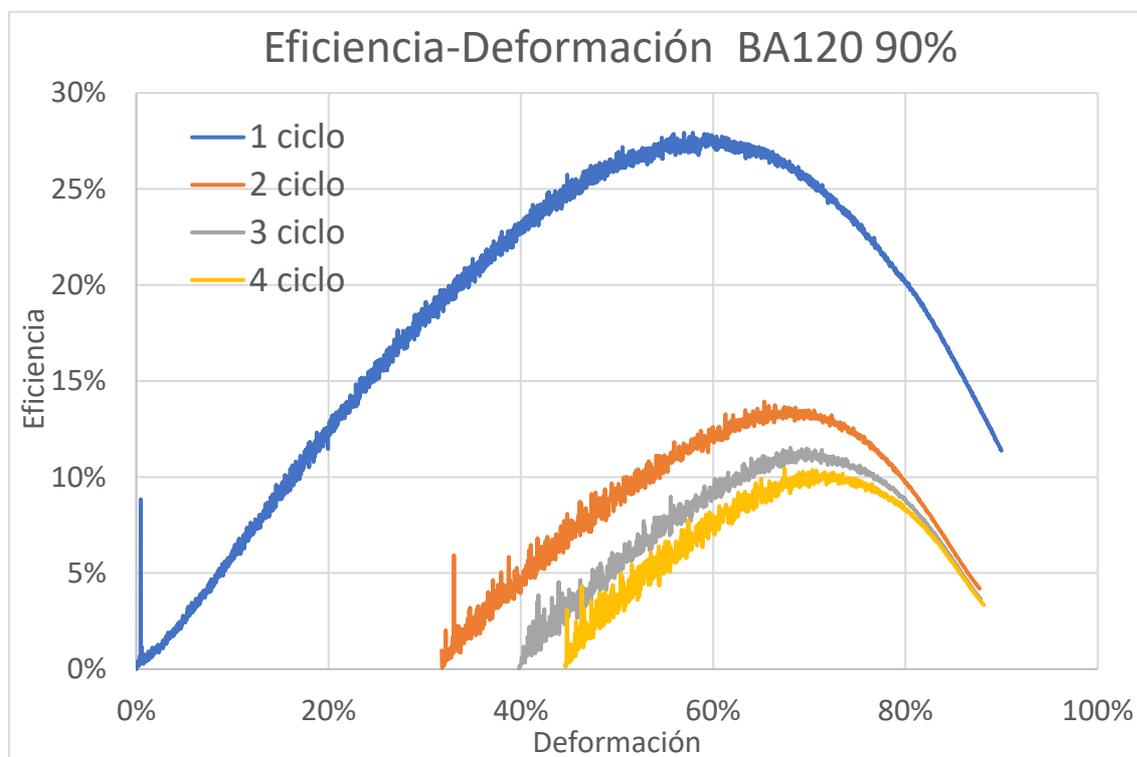


Figura 273

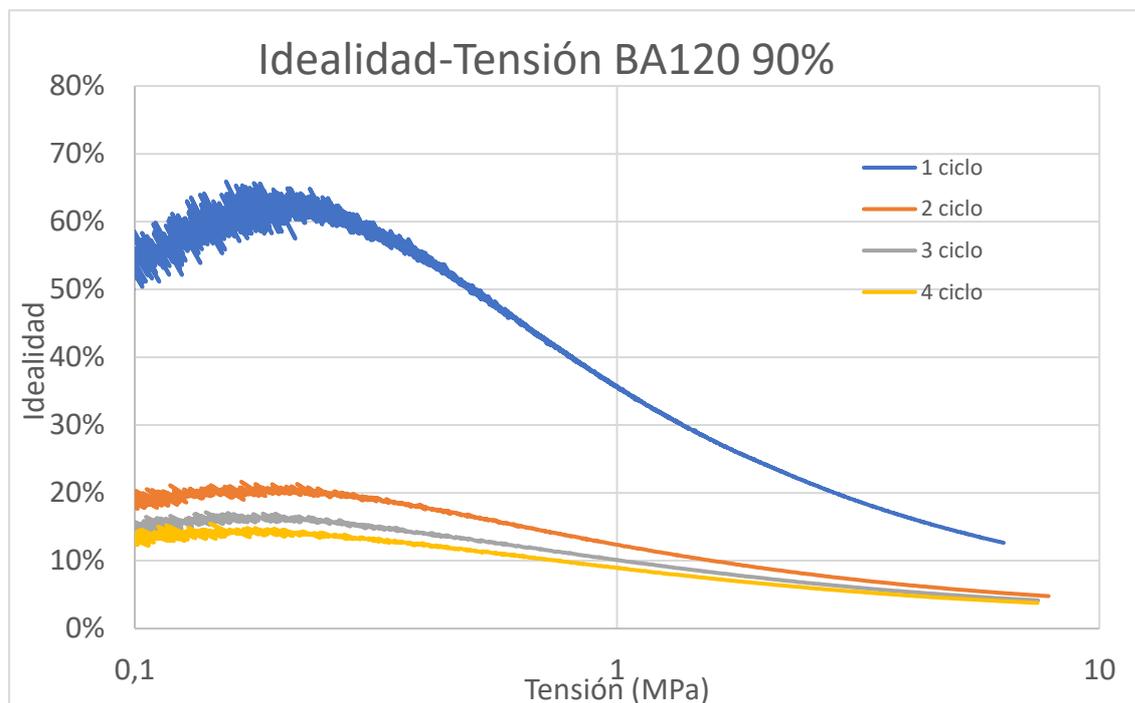


Figura 274

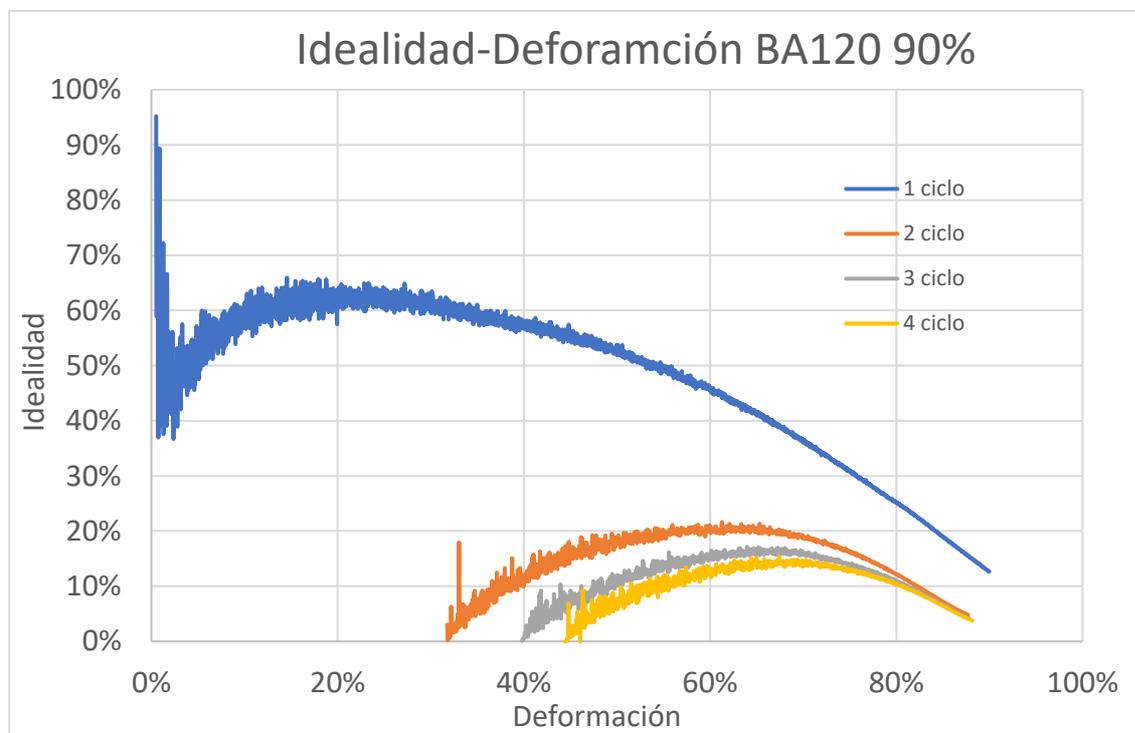


Figura 275

M.6.2 Ensayos al 75%

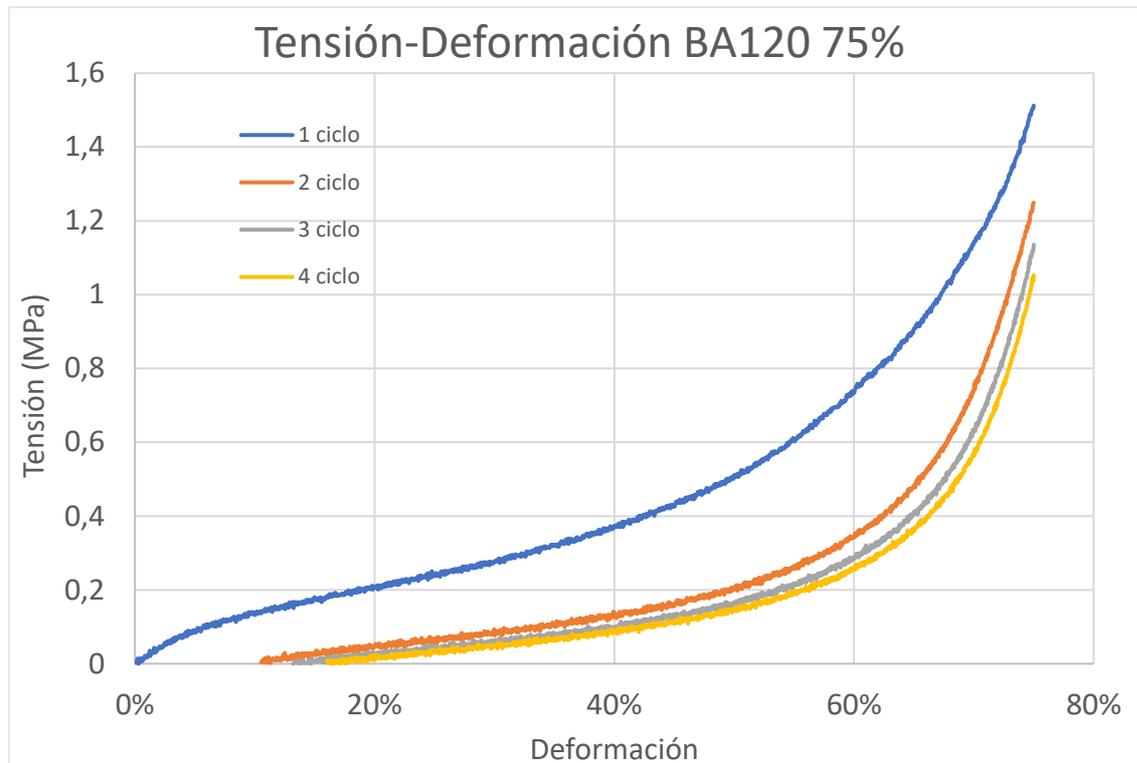


Figura 276

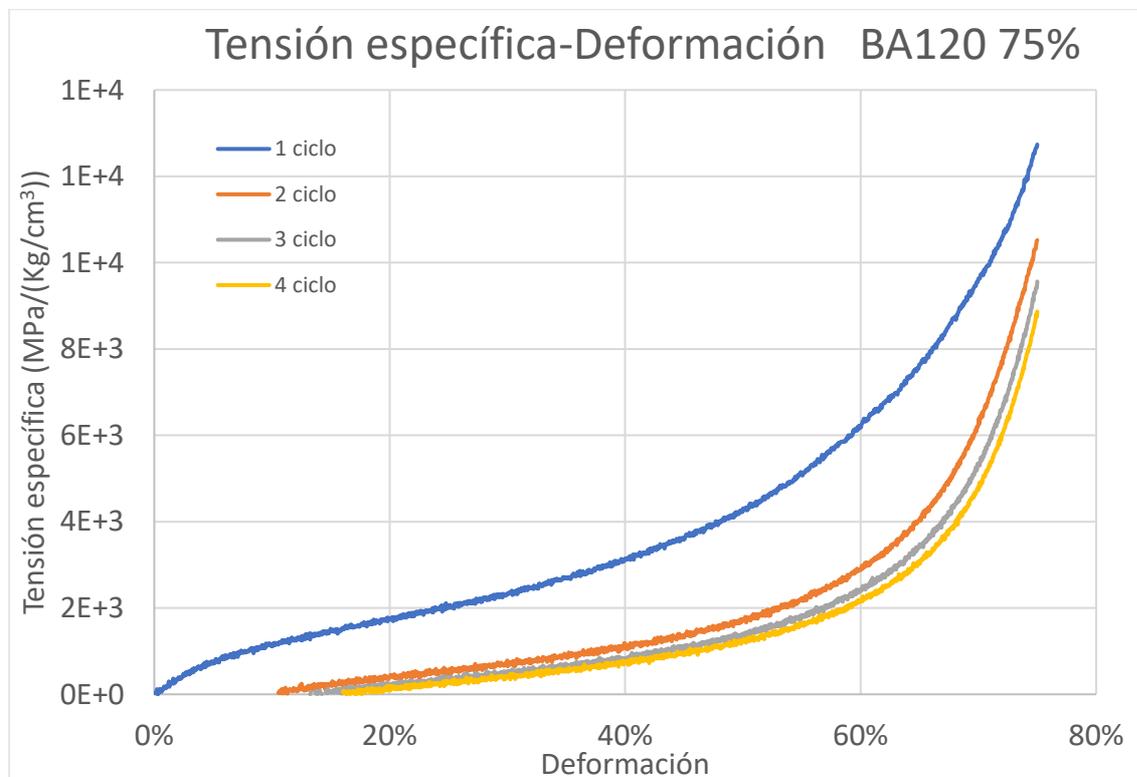


Figura 277

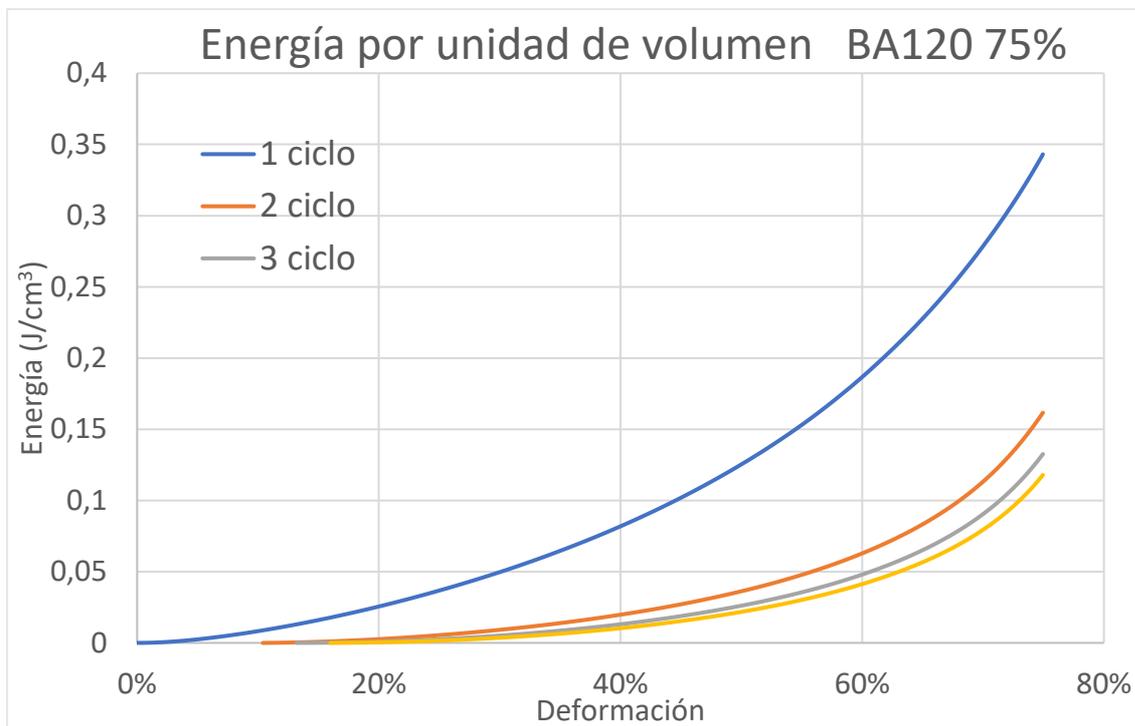


Figura 278

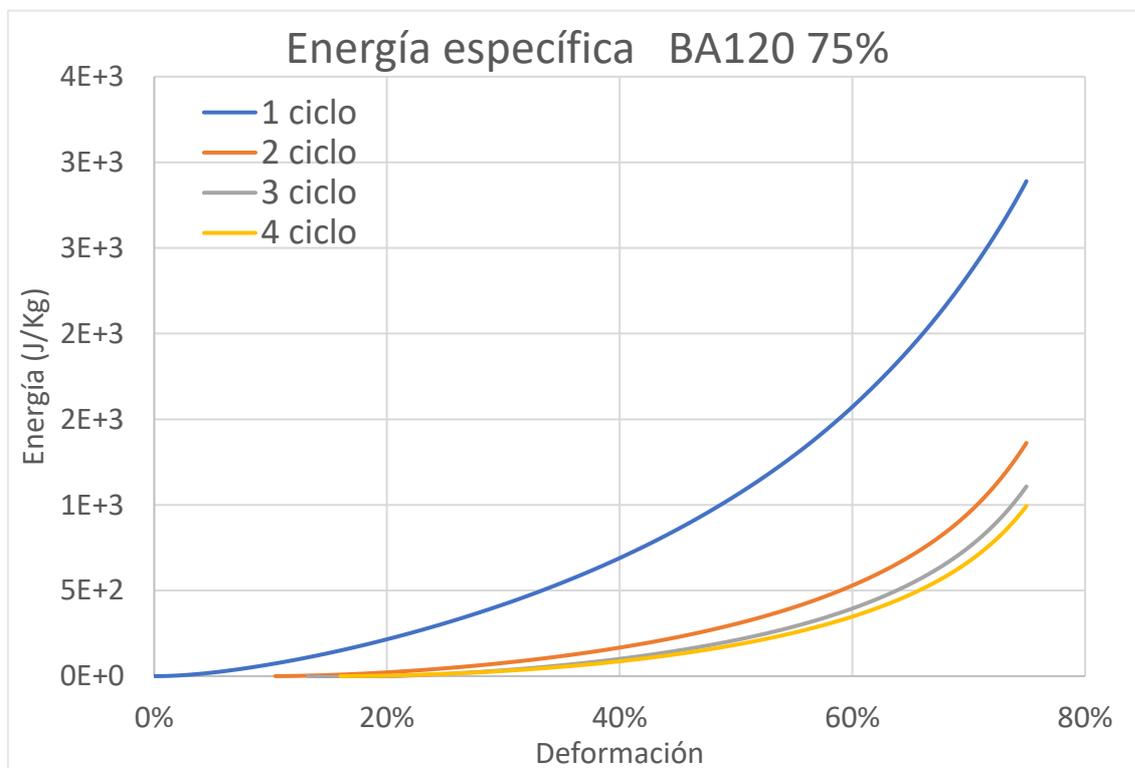


Figura 279

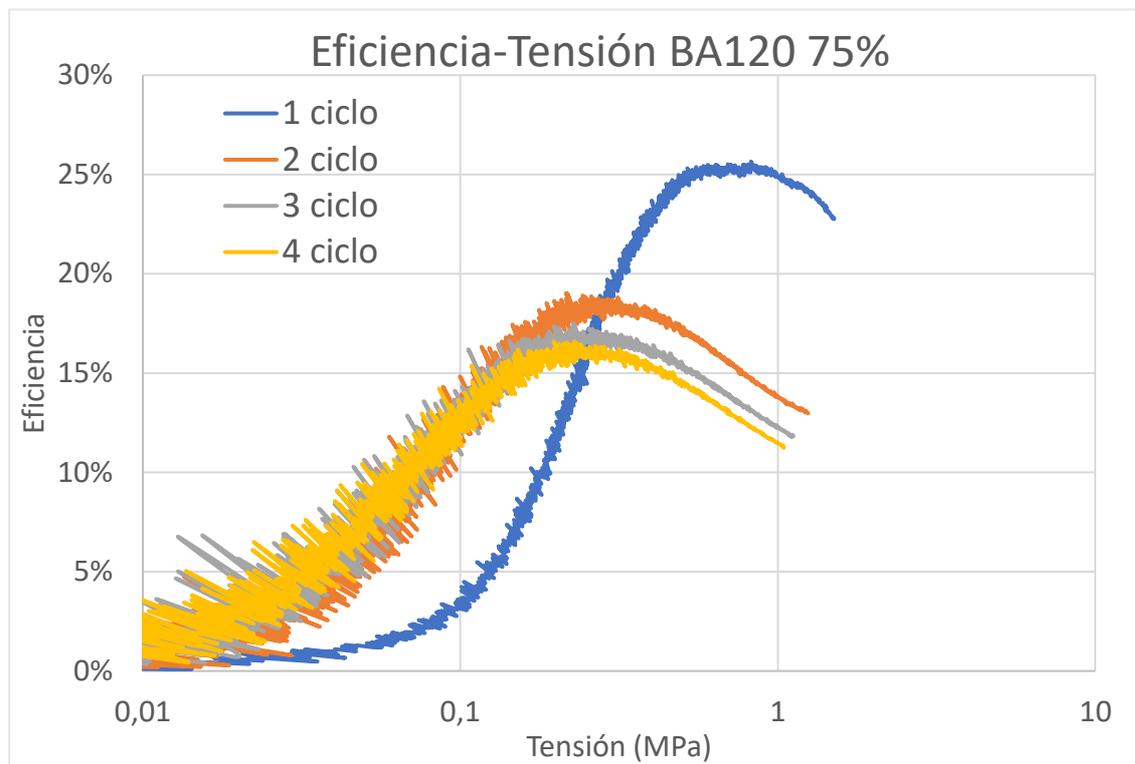


Figura 281

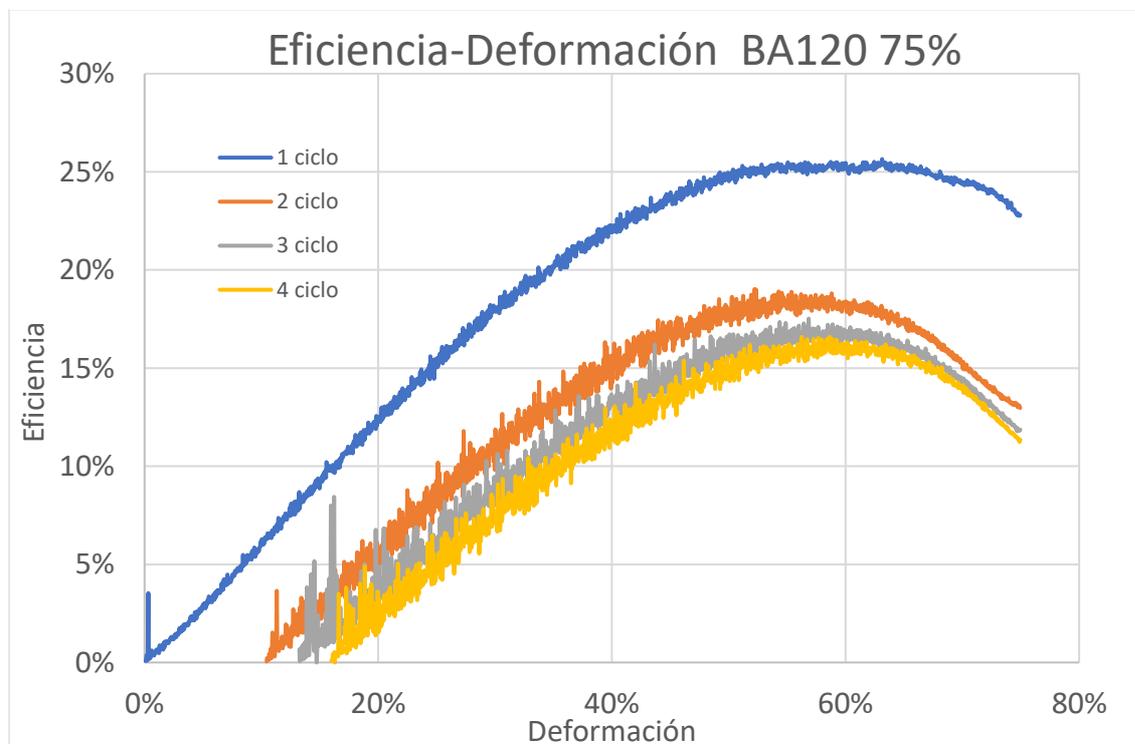


Figura 280

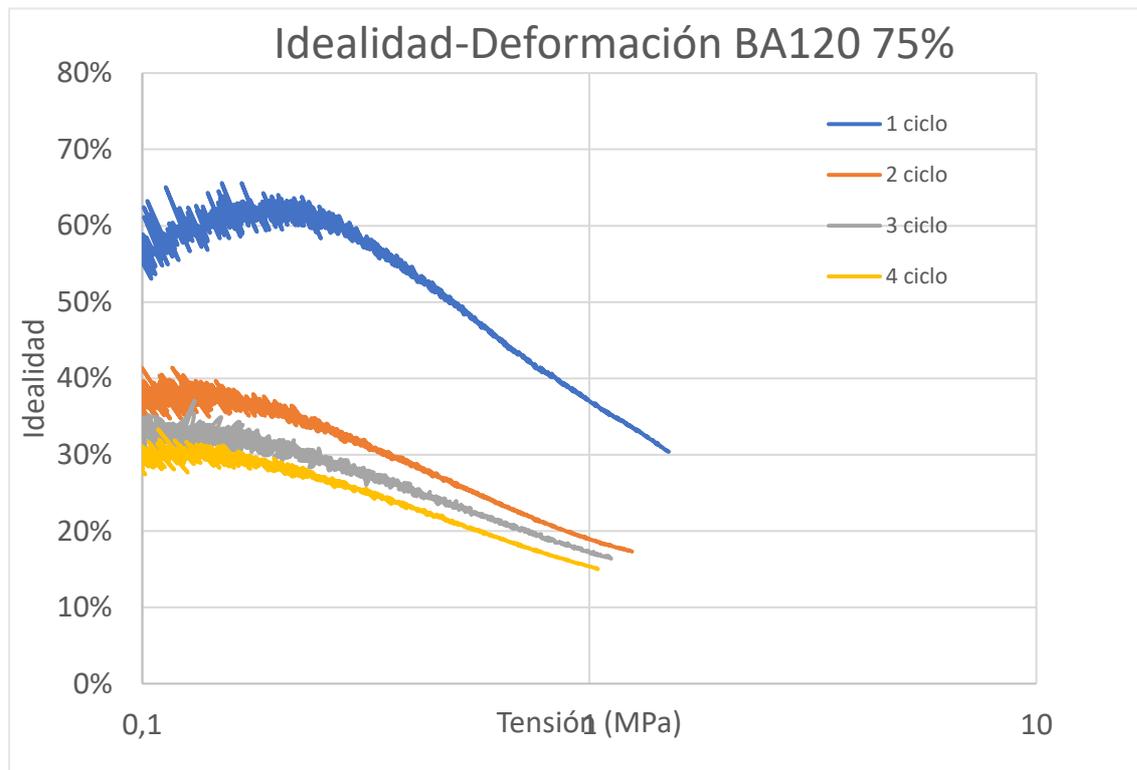


Figura 282

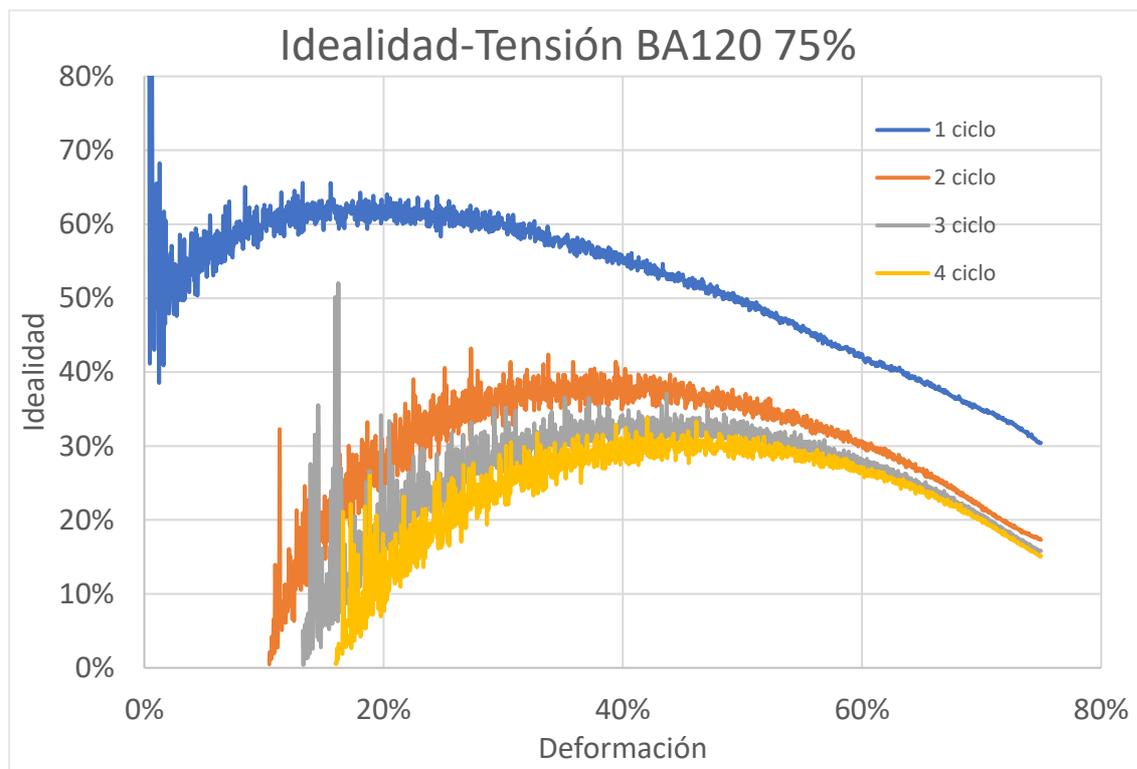


Figura 283

M.6.3 Ensayo 62,5%

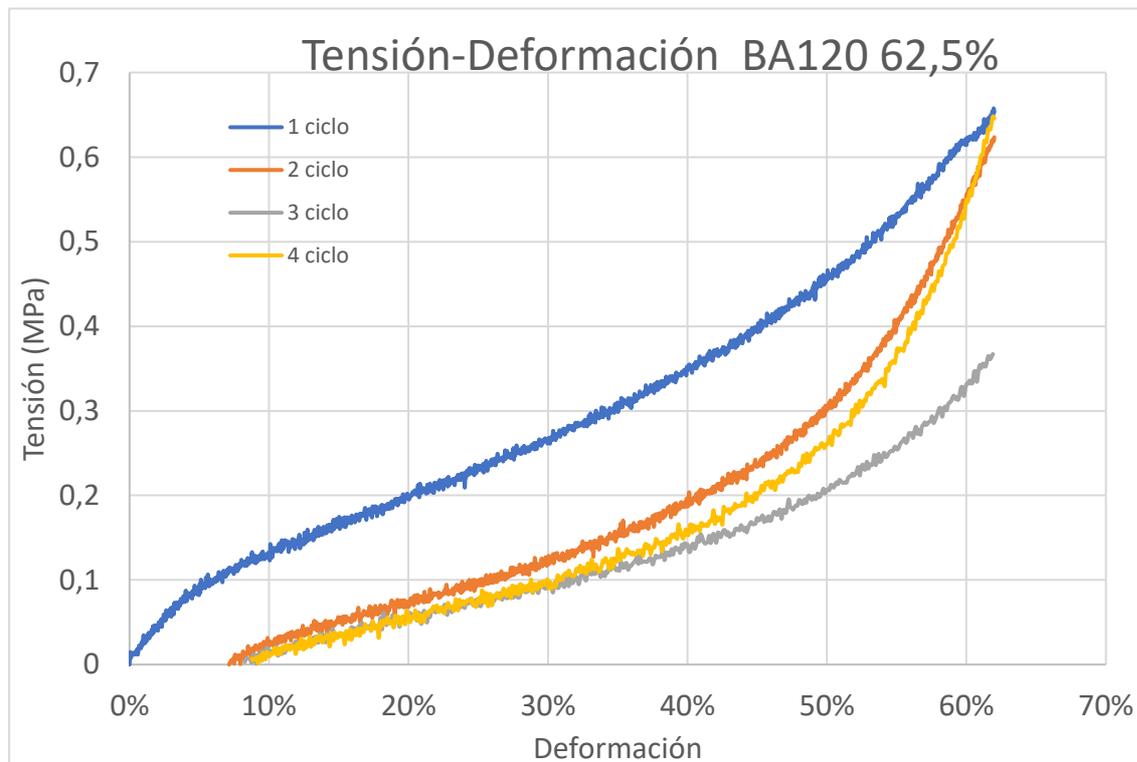


Figura 284

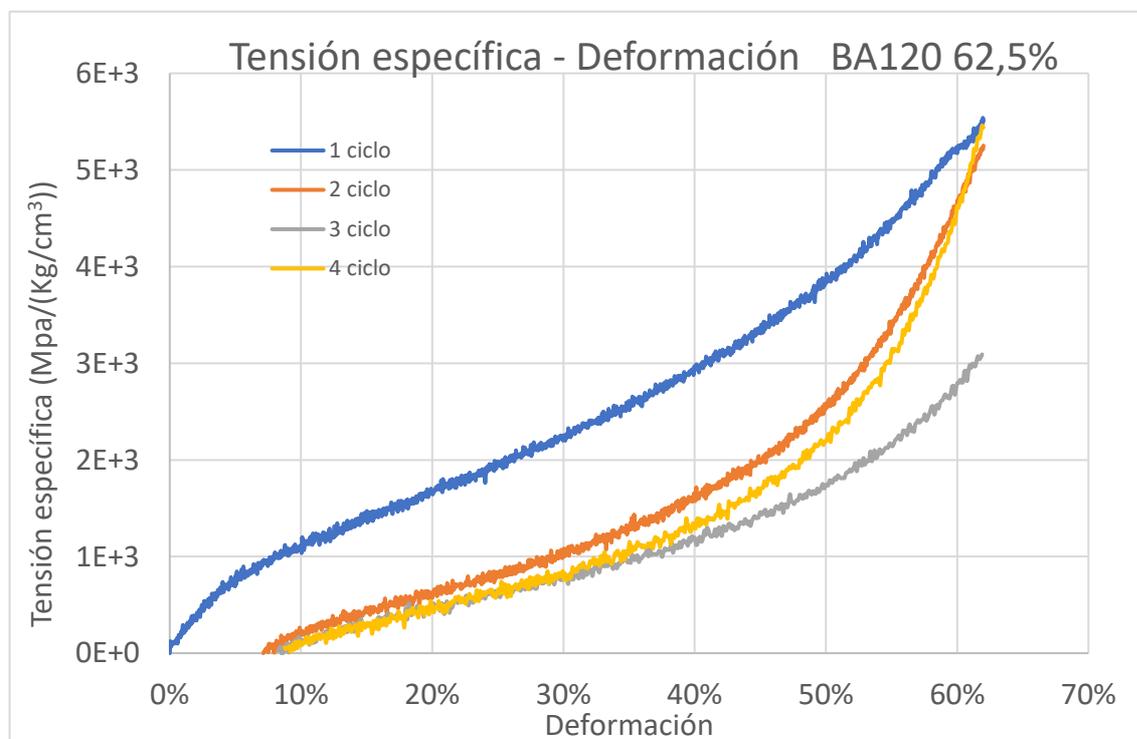


Figura 285

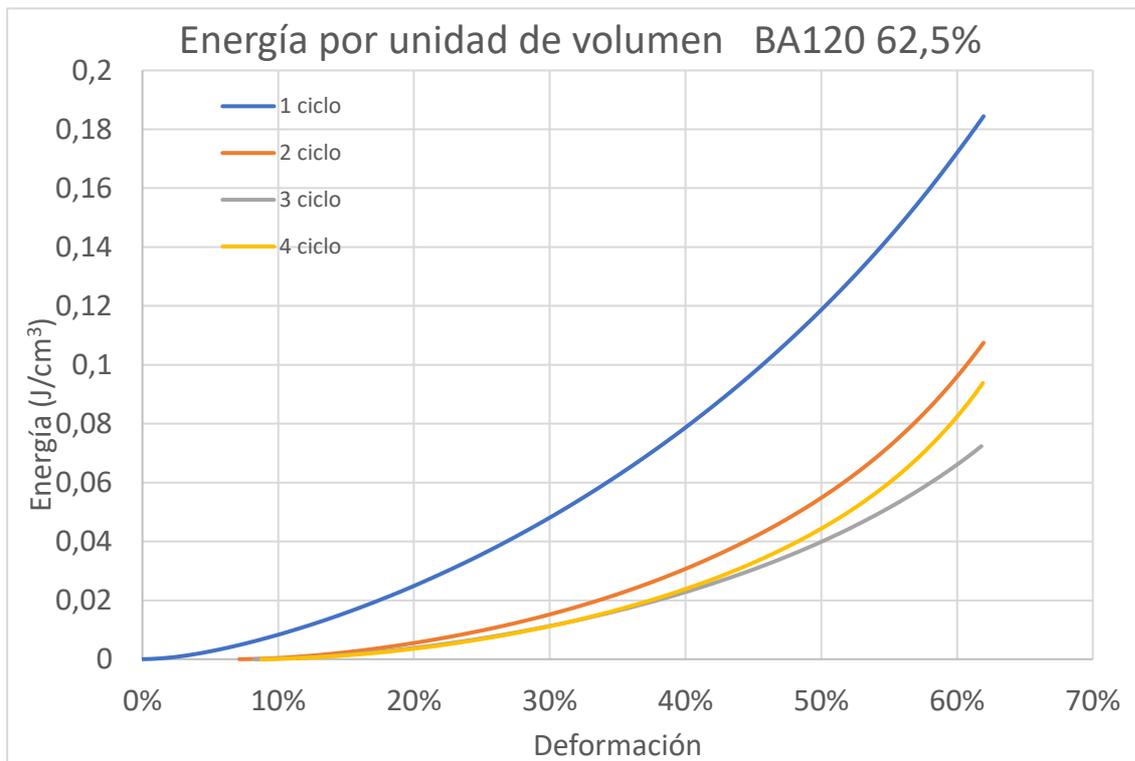


Figura 286

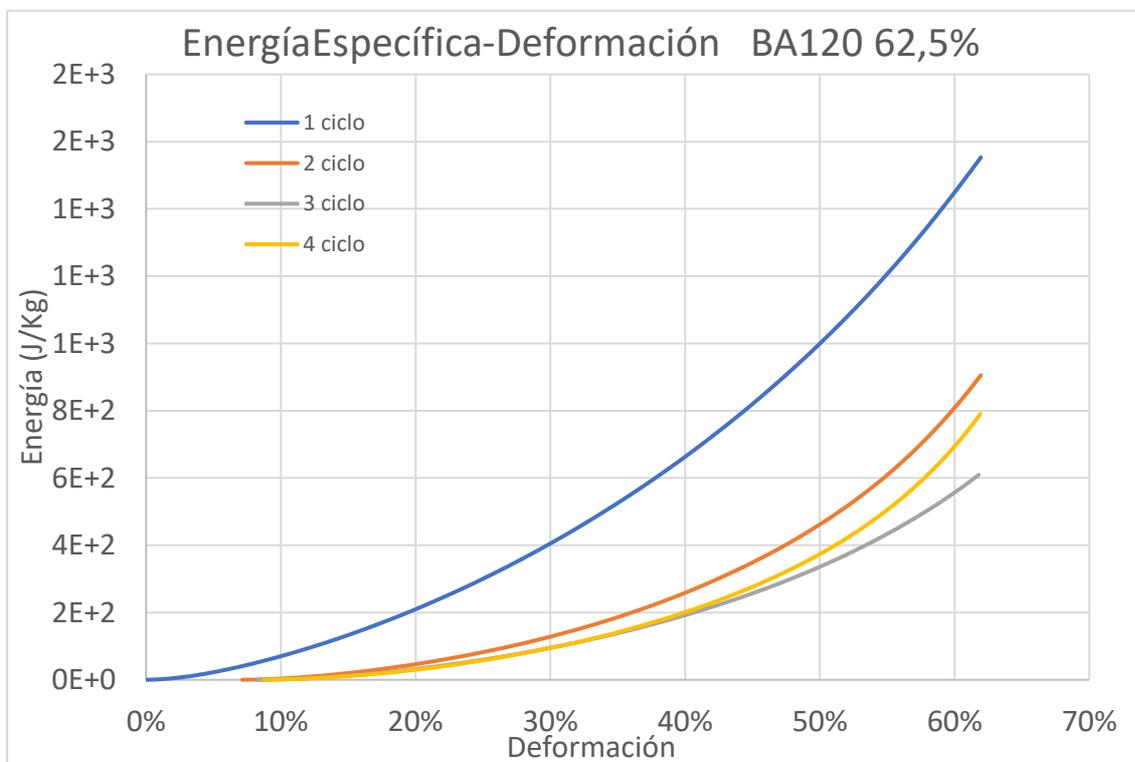


Figura 287

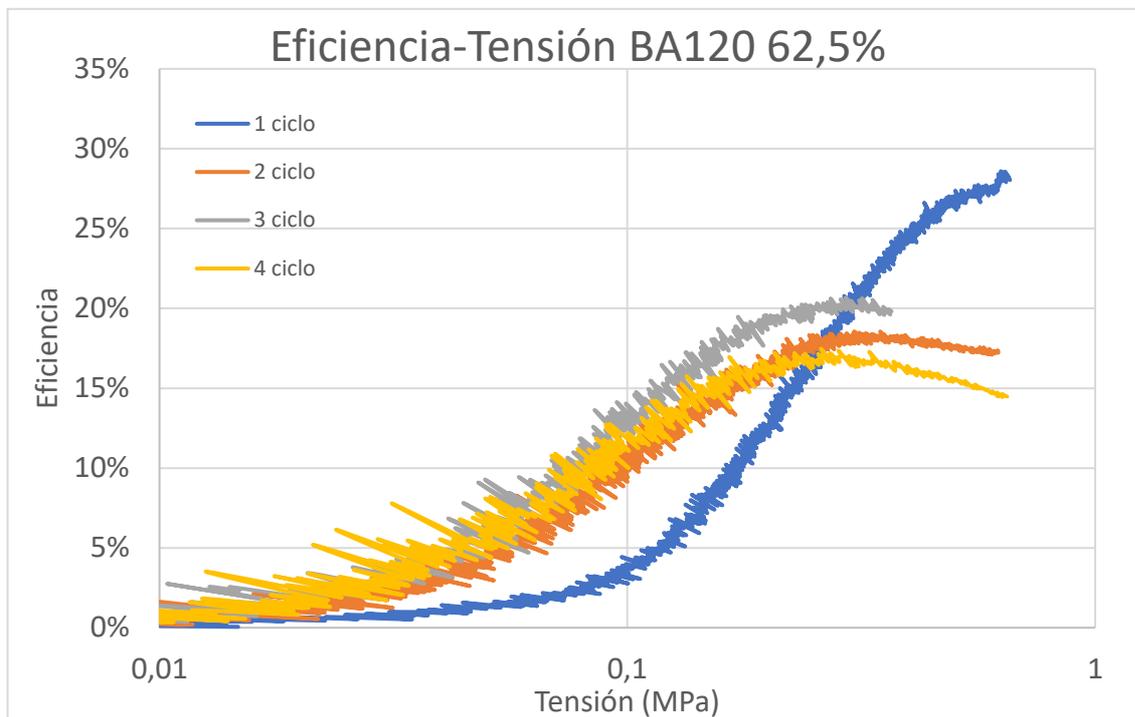


Figura 288

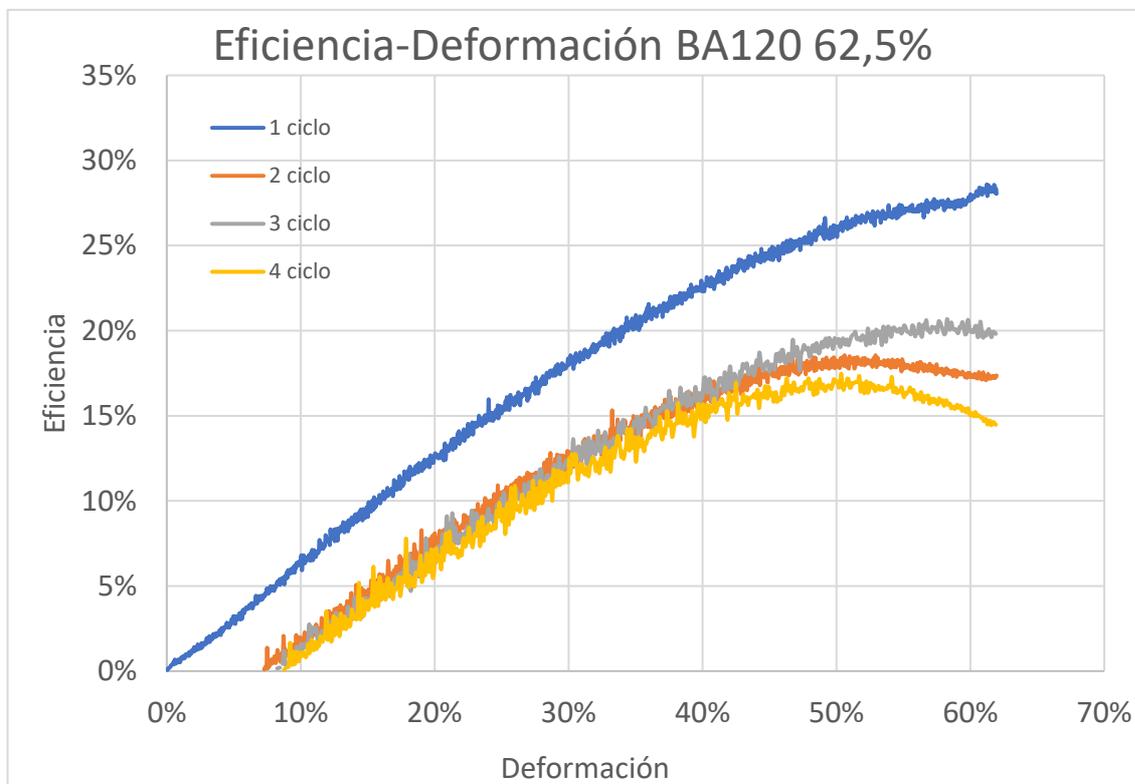


Figura 289

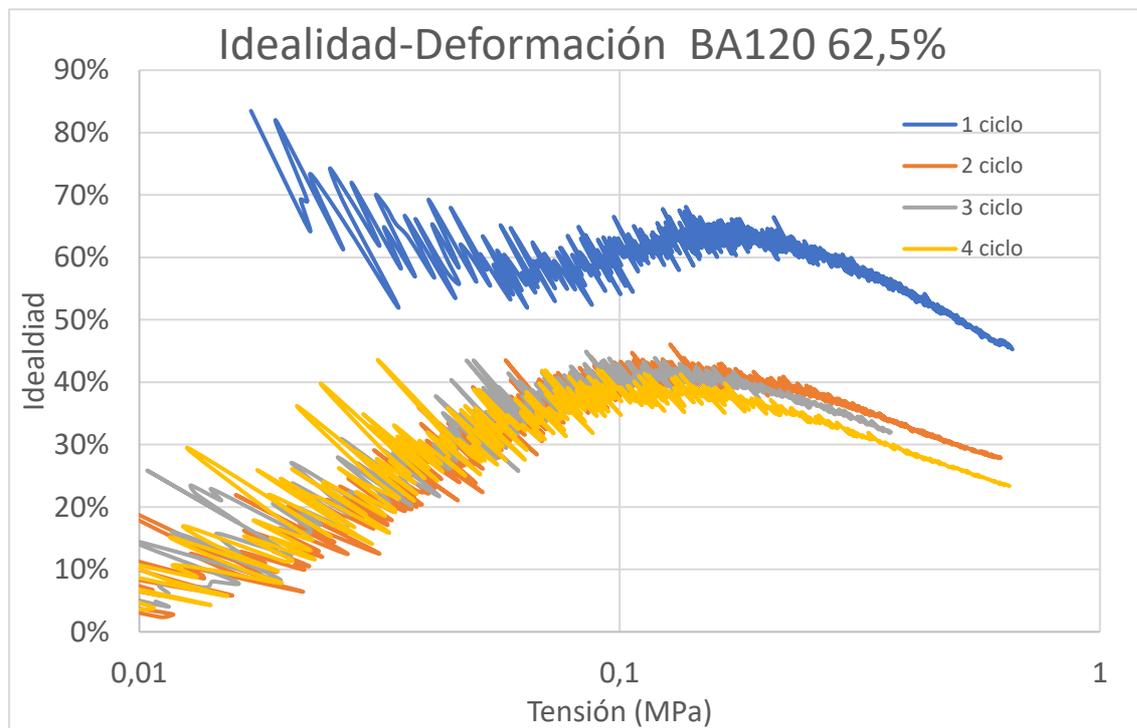


Figura 290

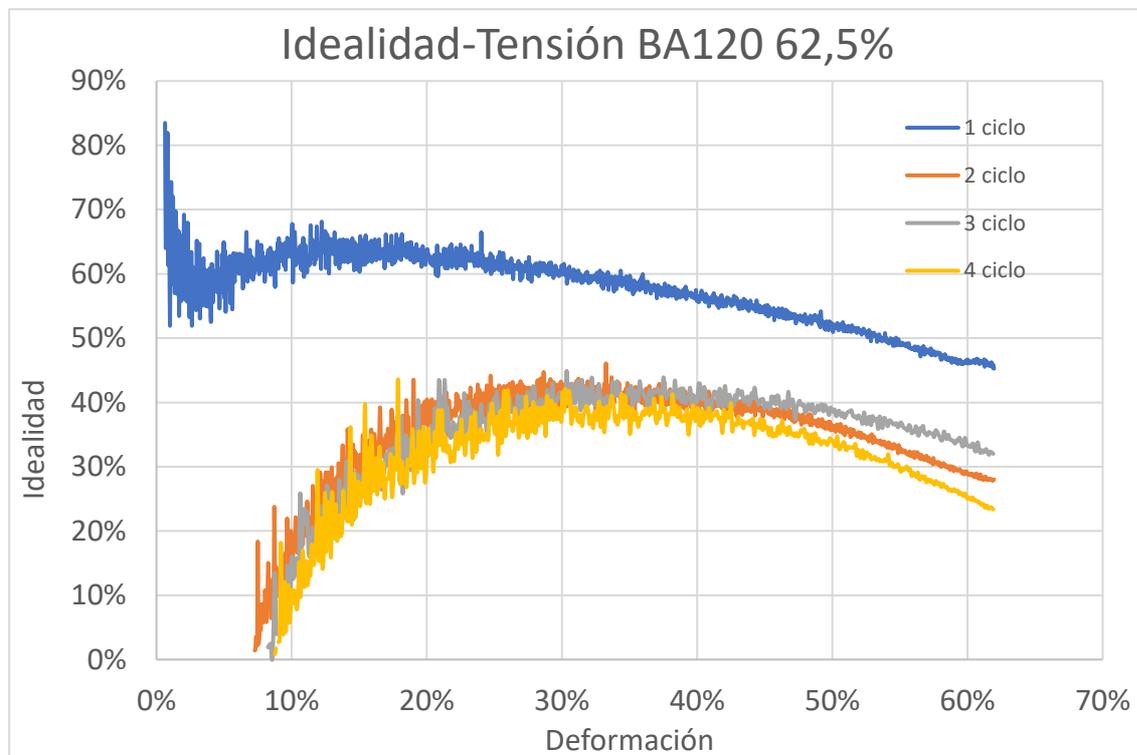


Figura 291

M.6.4 Ensayos 50%

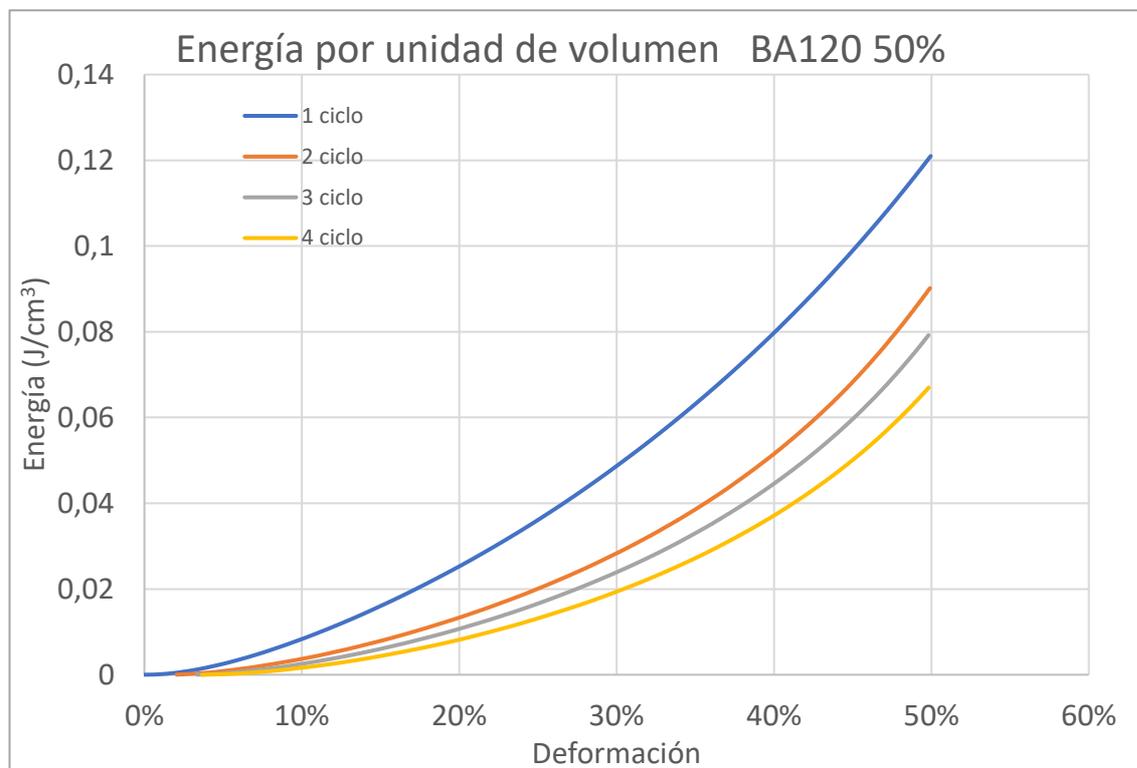


Figura 293

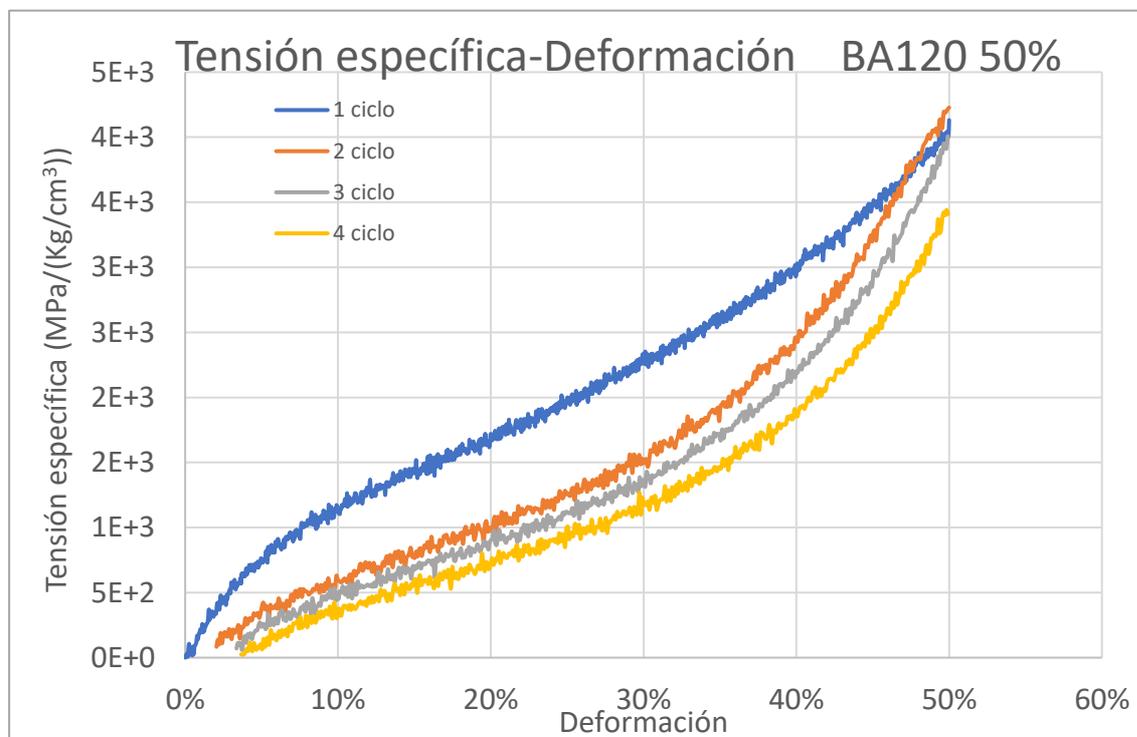


Figura 292

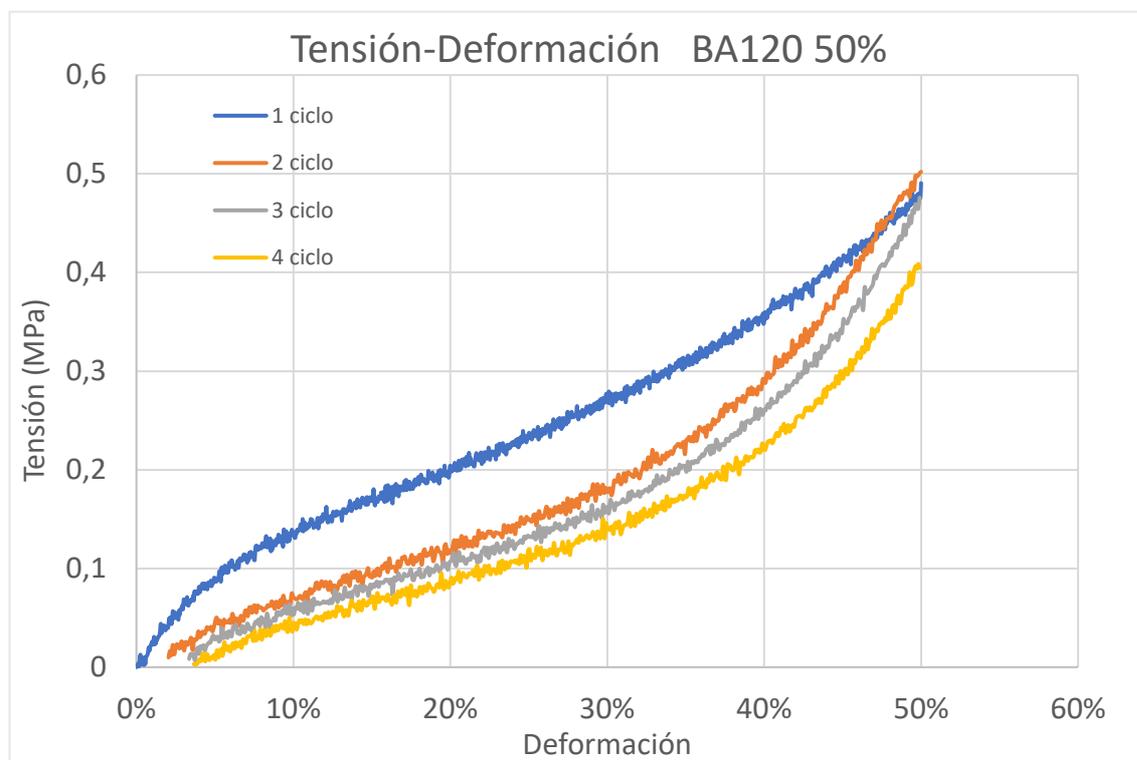


Figura 295

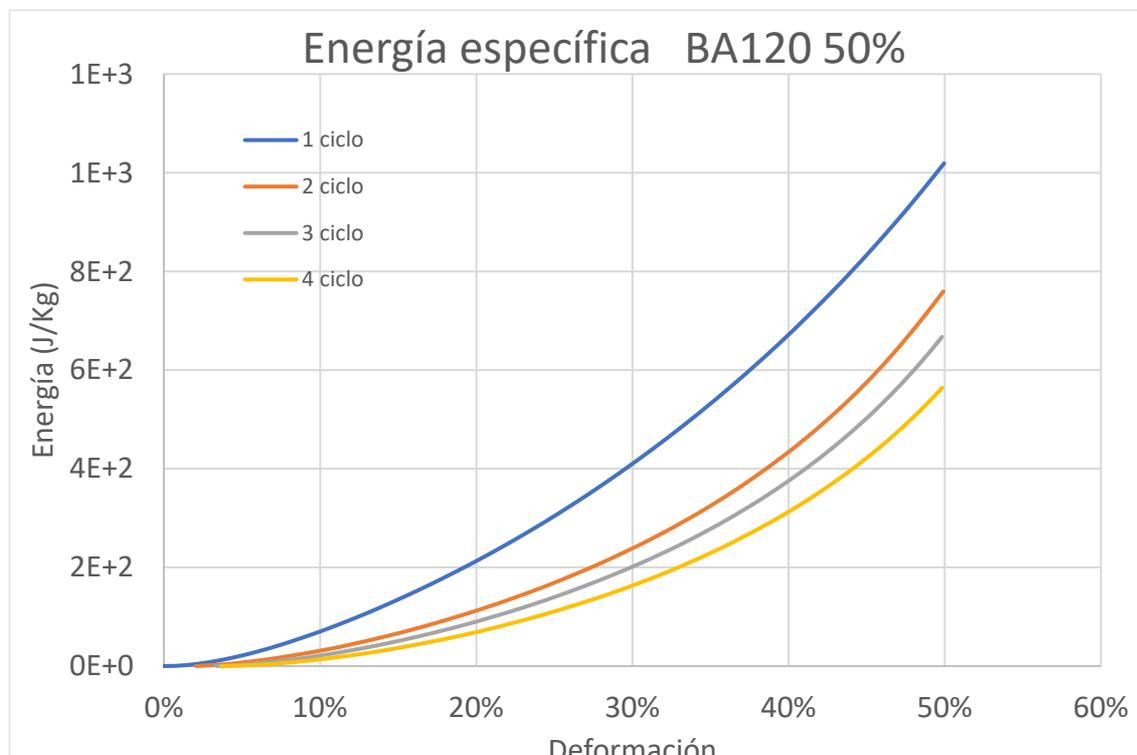


Figura 294

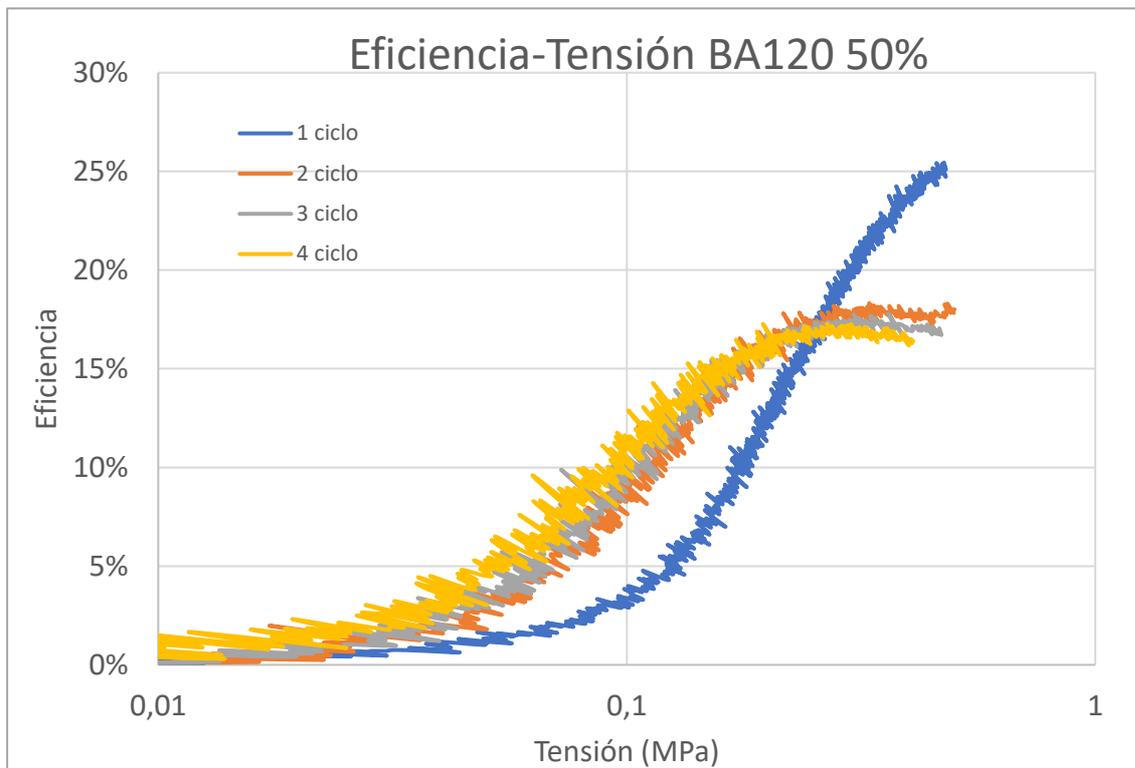


Figura 296

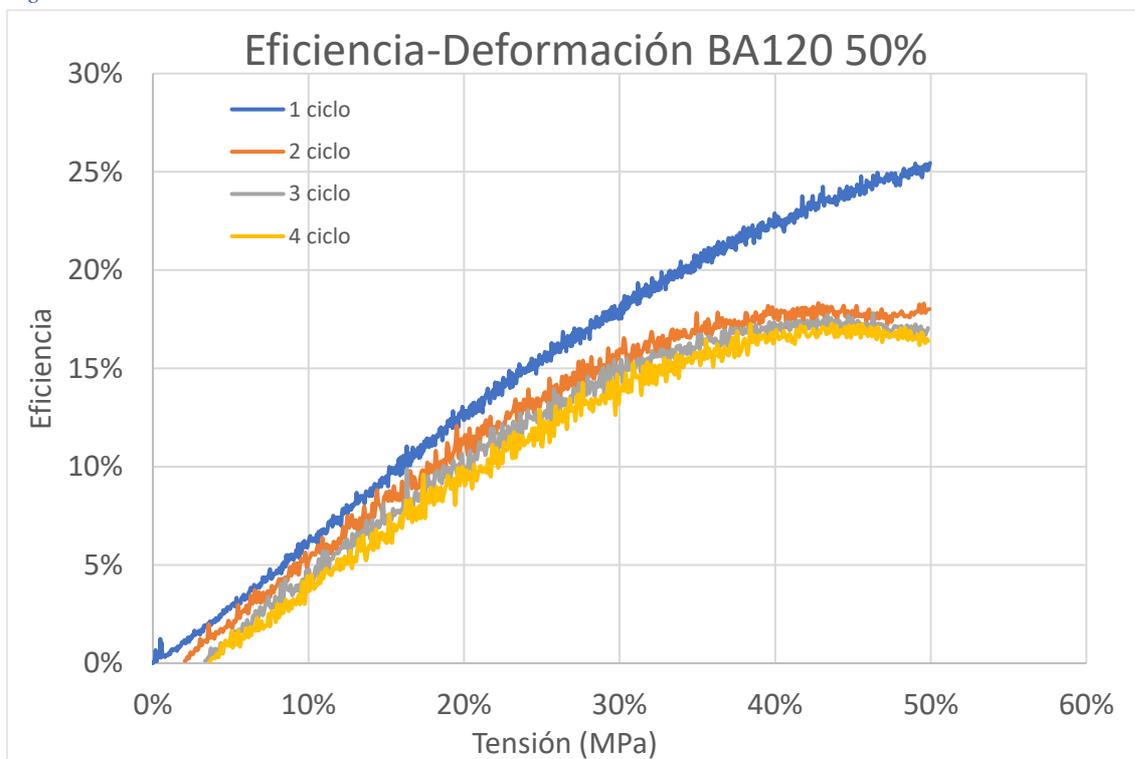


Figura 297

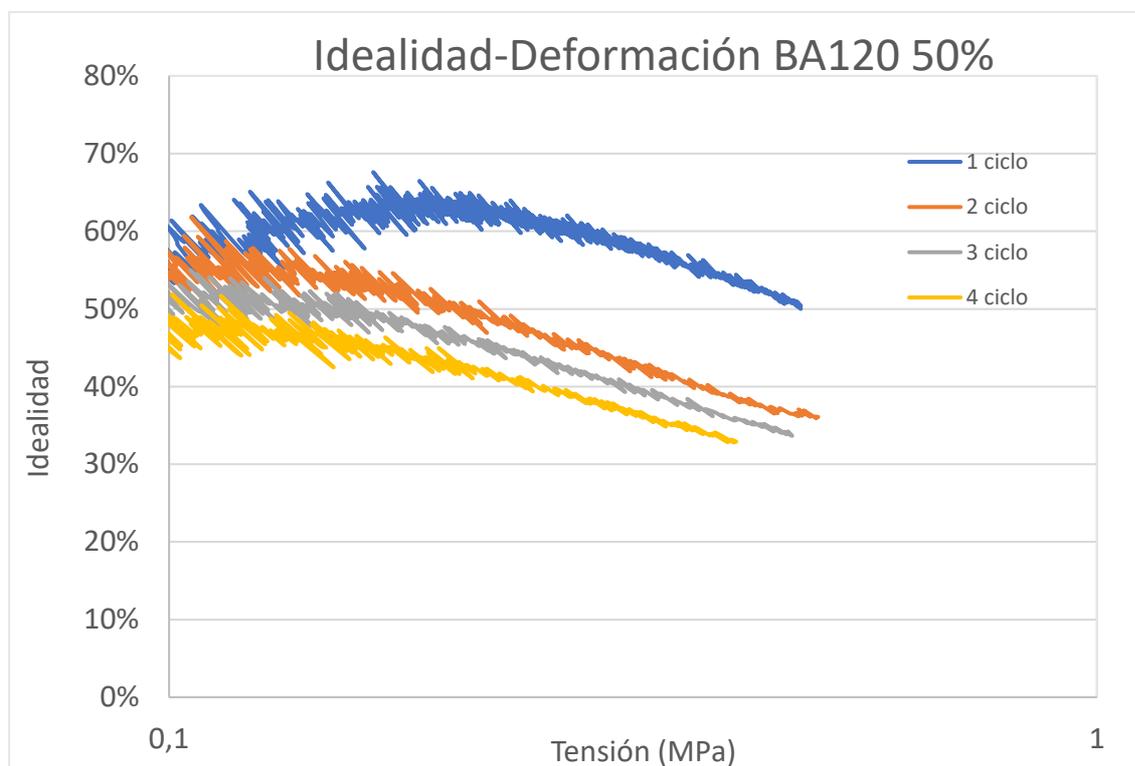


Figura 298

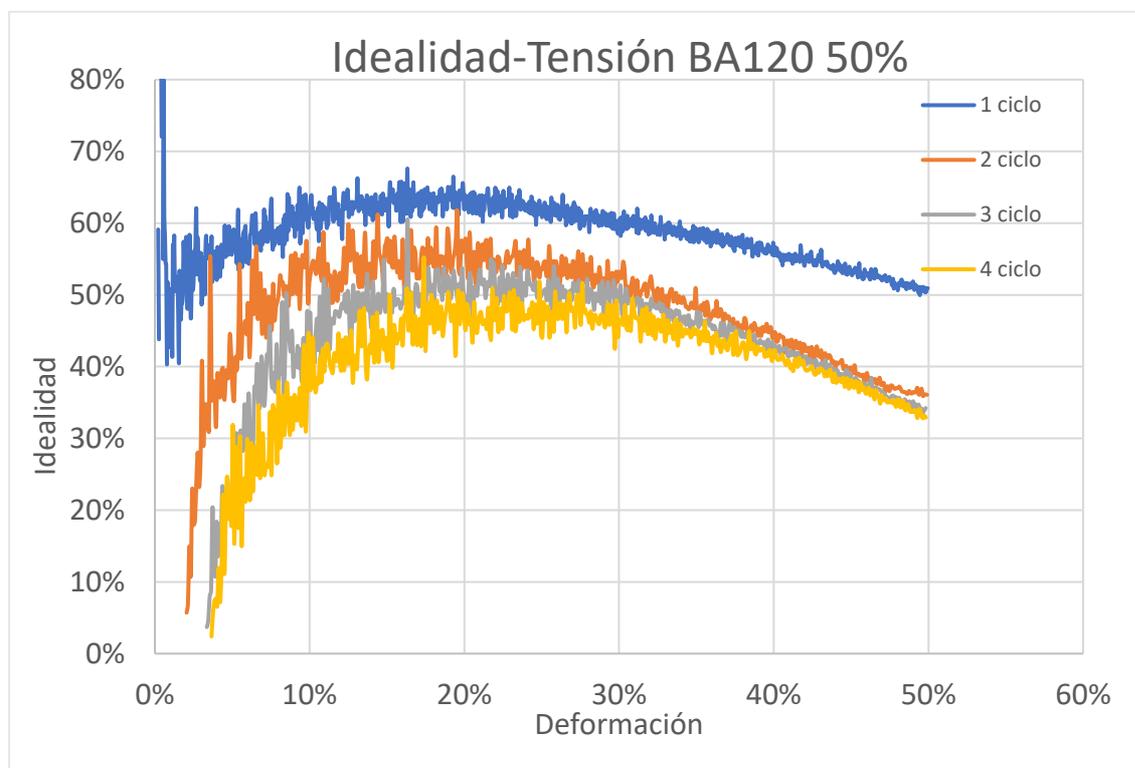


Figura 299

M.7 Material EPS75

M.7.1 Ensayos al 90%

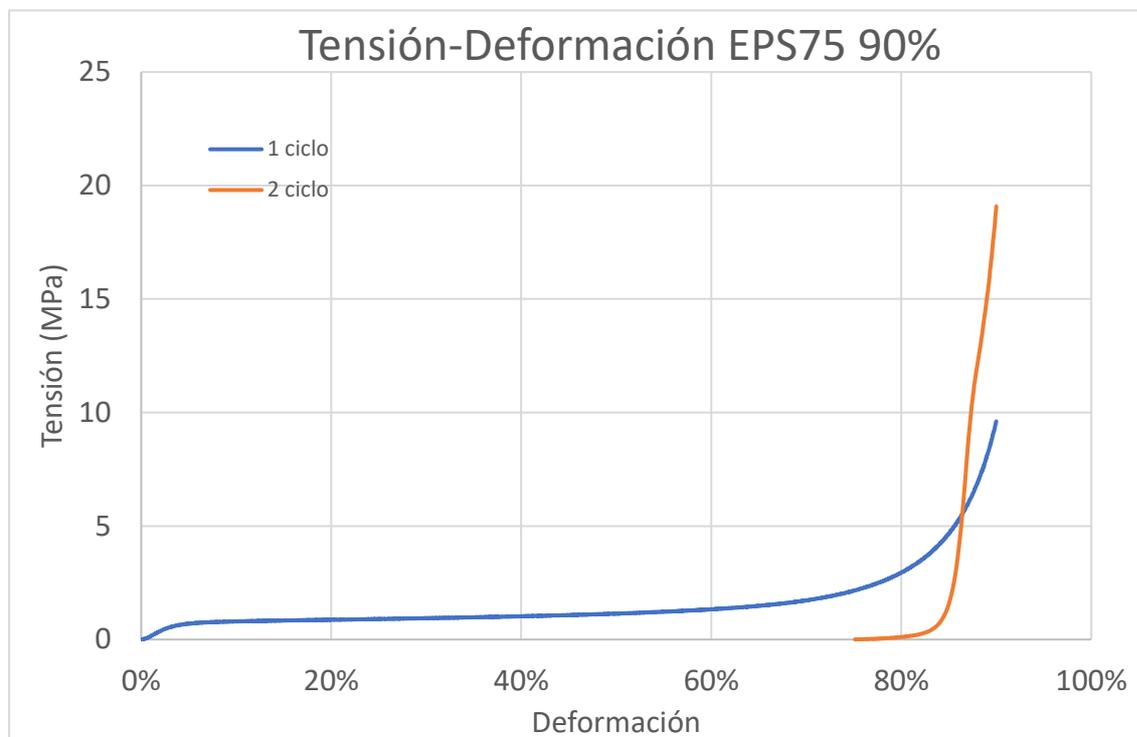


Figura 301

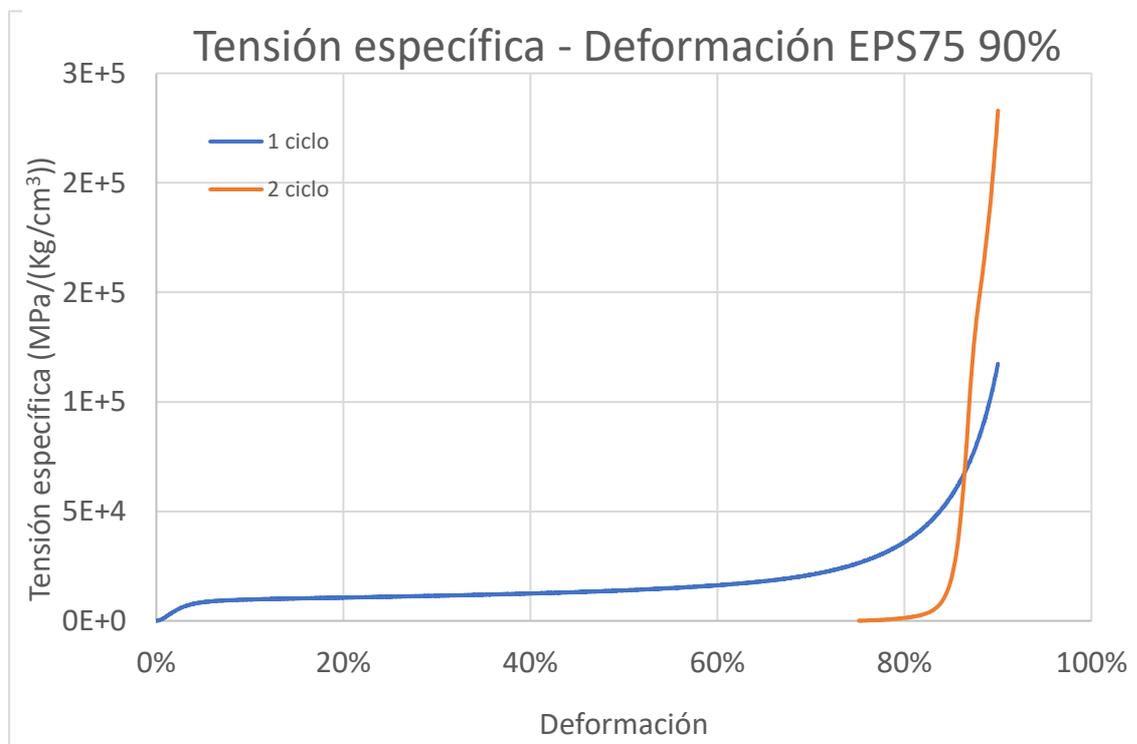


Figura 300

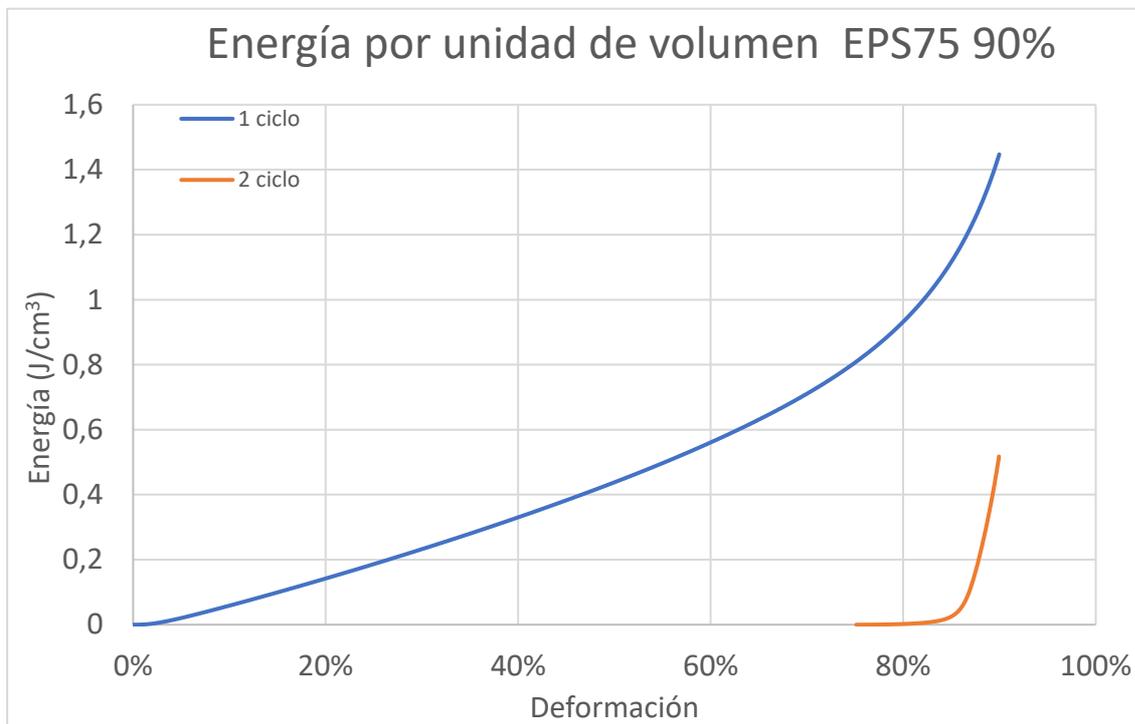


Figura 302

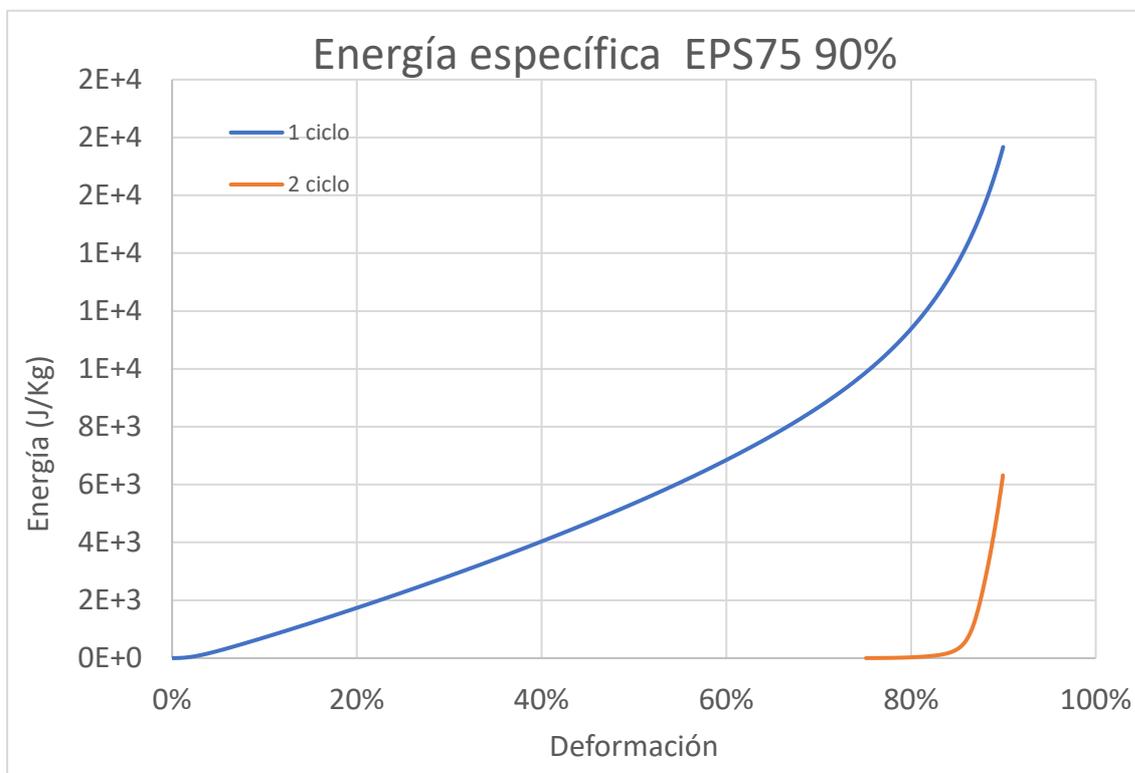


Figura 303

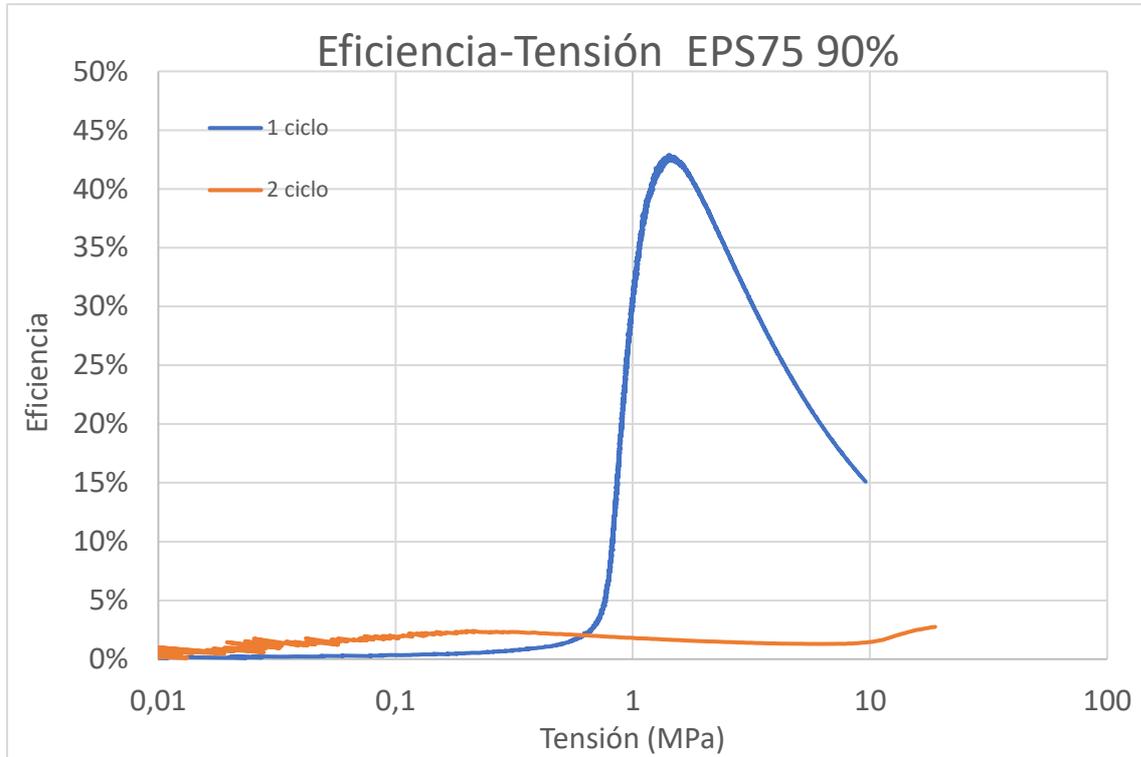


Figura 304

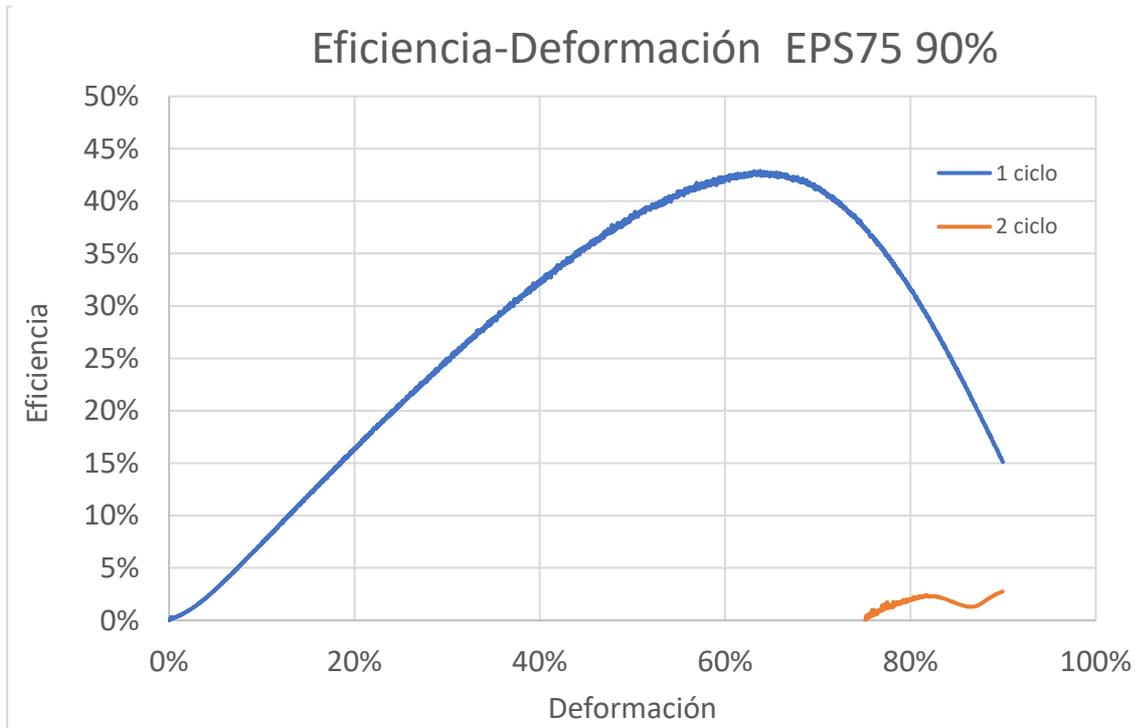


Figura 305

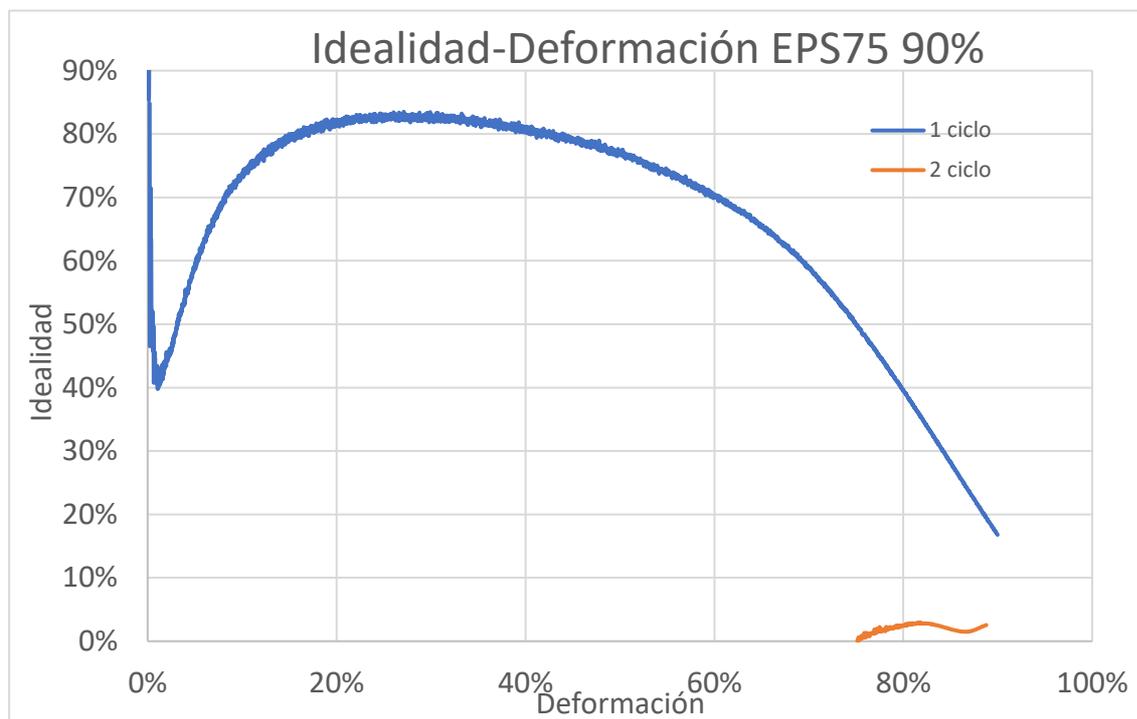


Figura 306

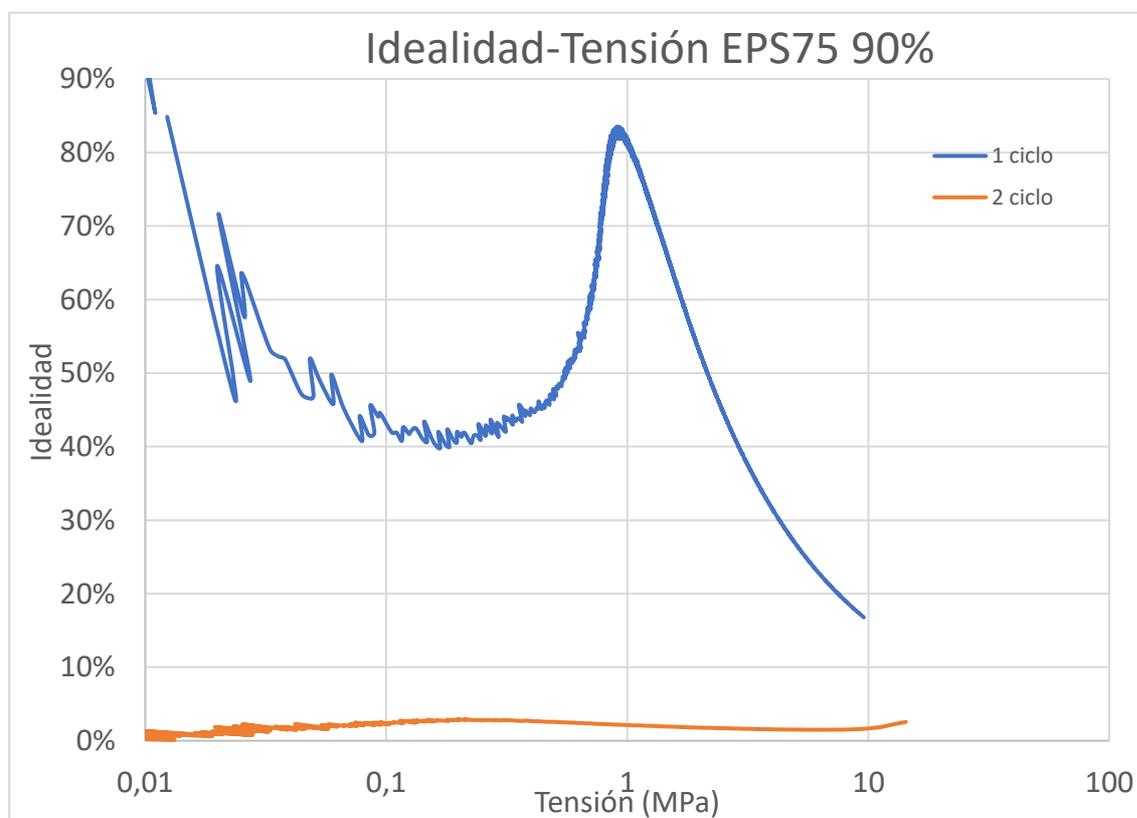


Figura 307

M.7.2 Ensayos al 75%

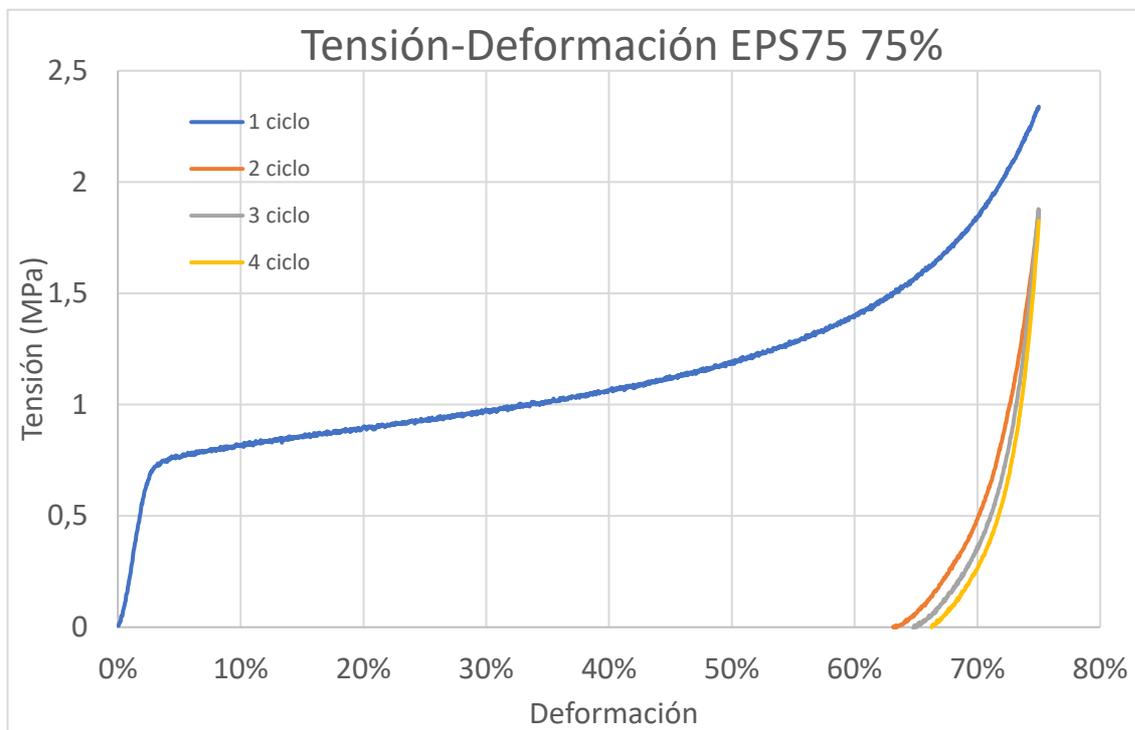


Figura 309

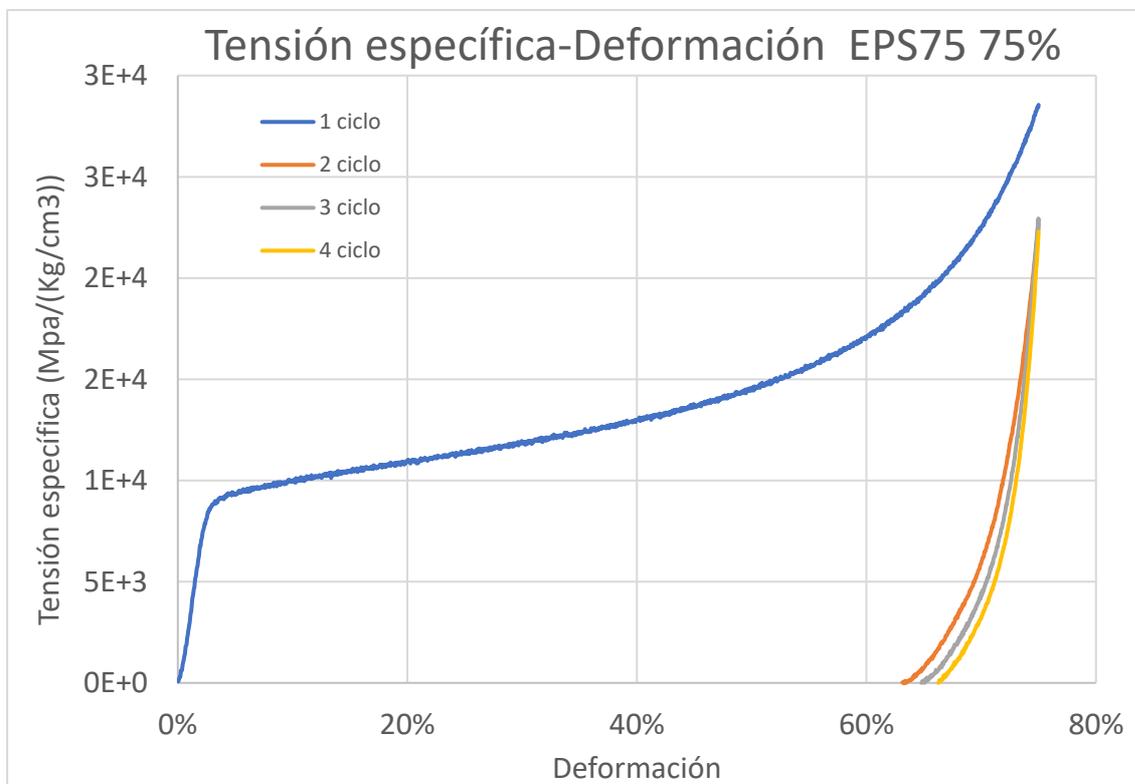


Figura 308

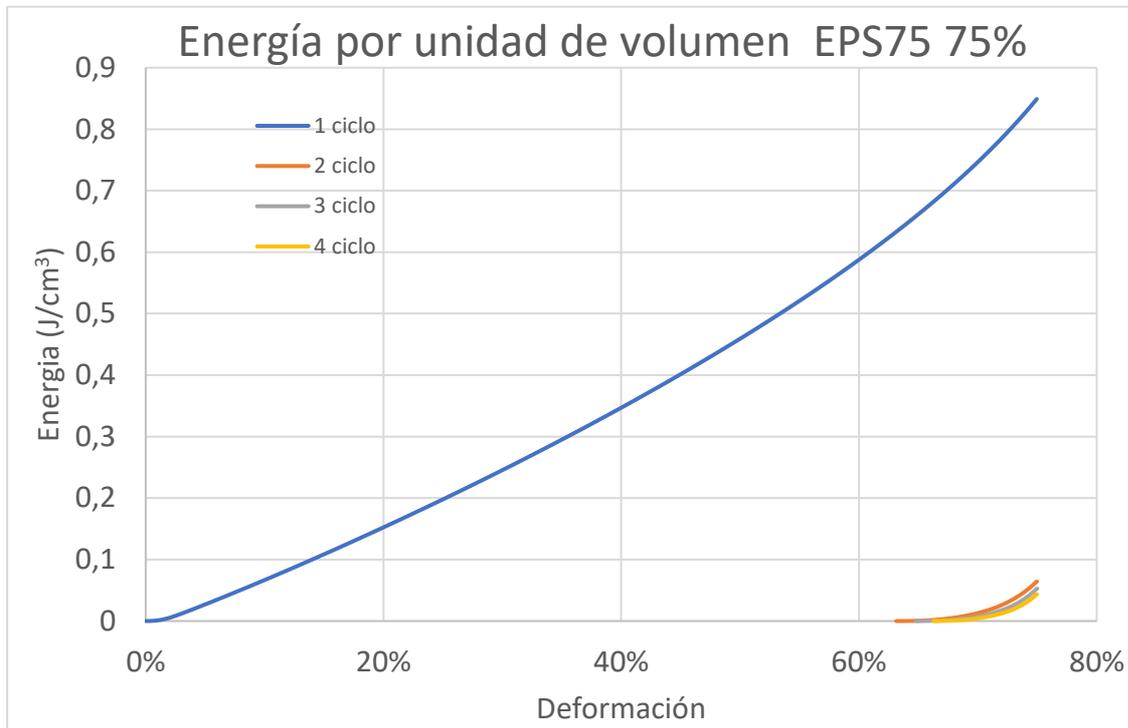


Figura 310

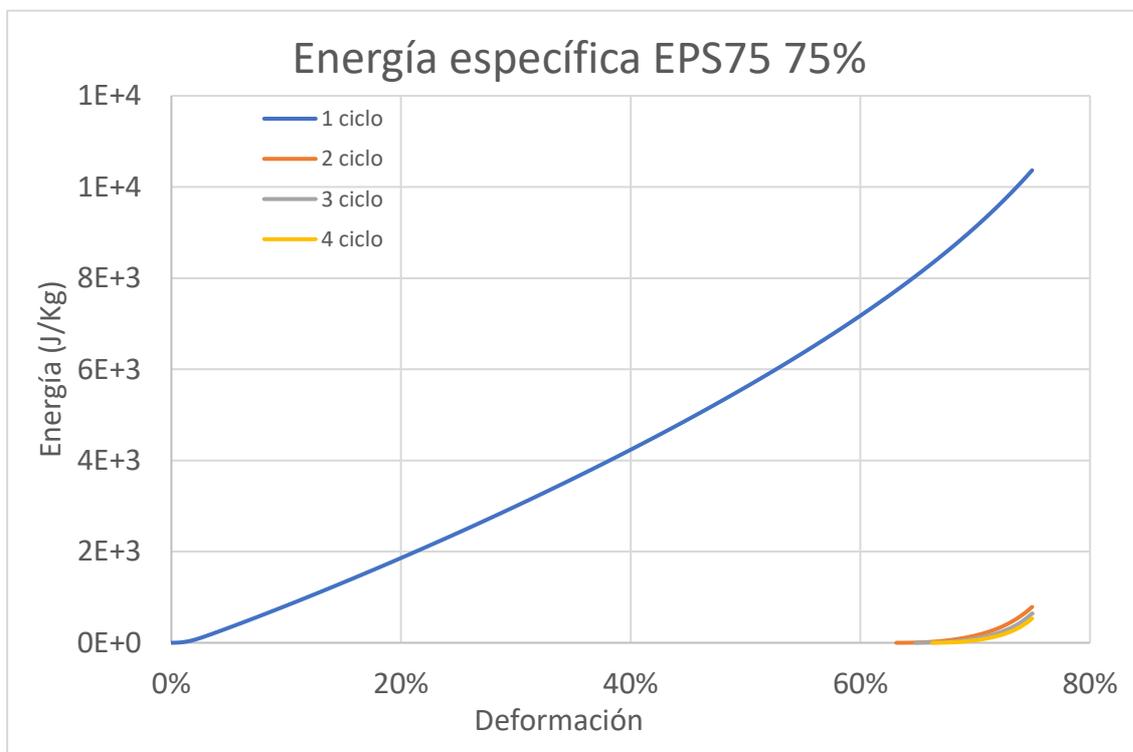


Figura 311

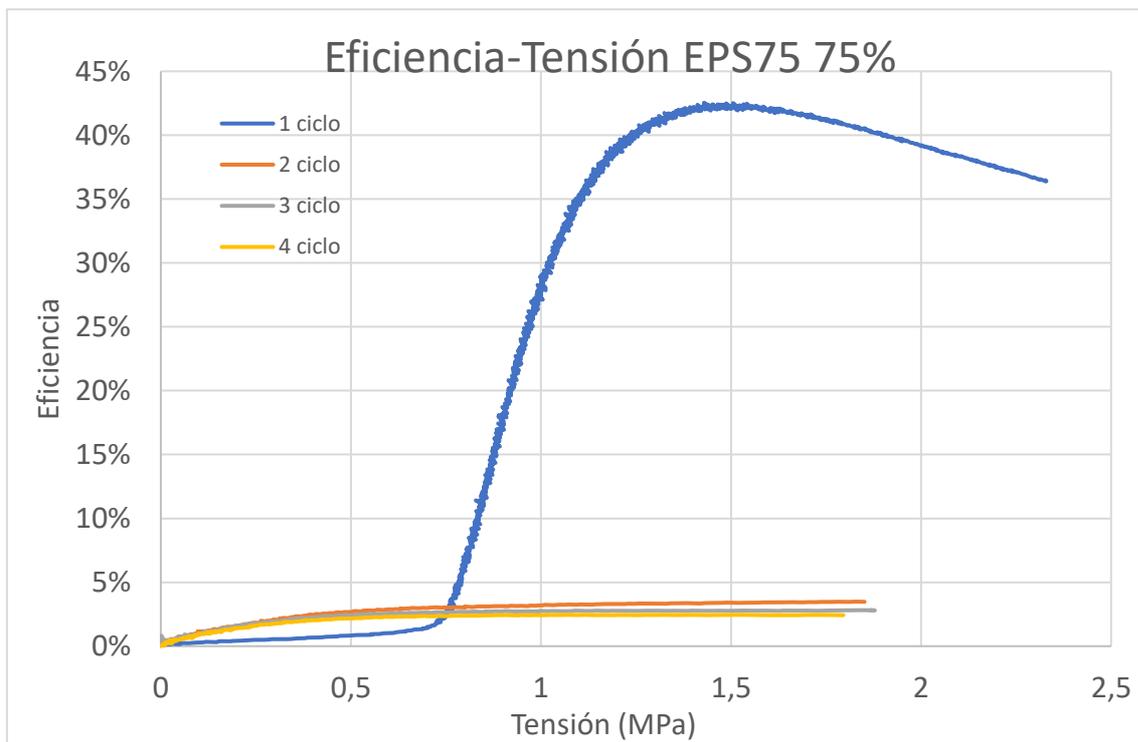


Figura 312

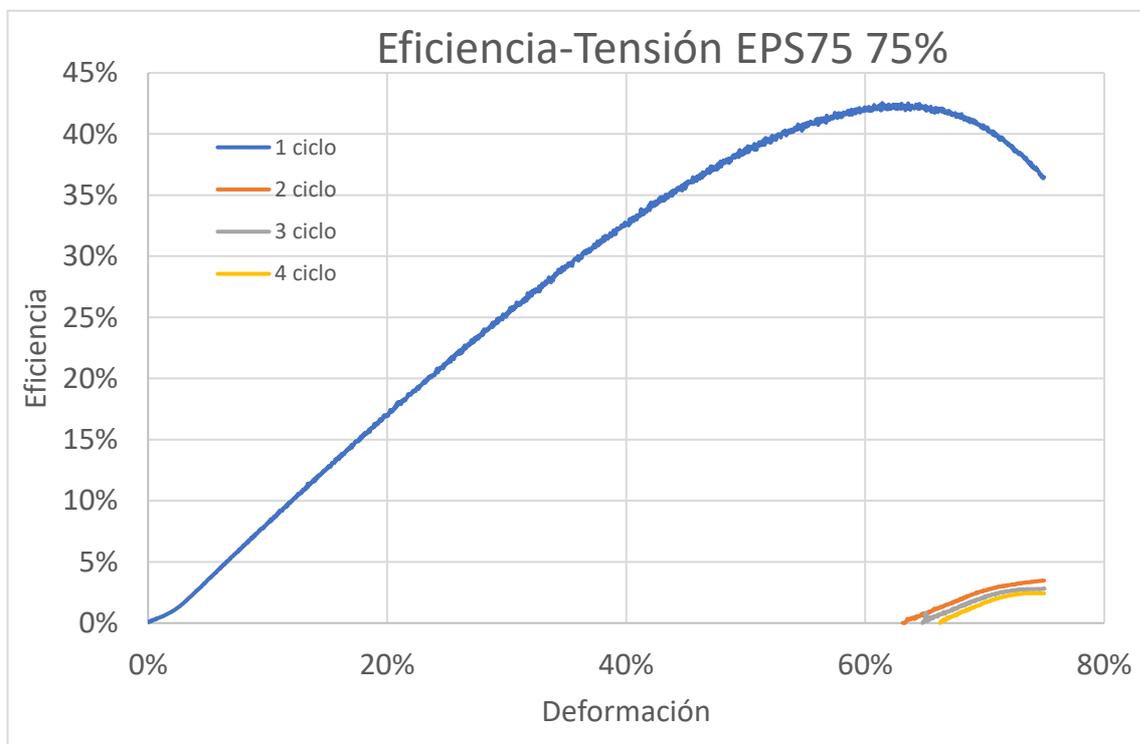


Figura 313

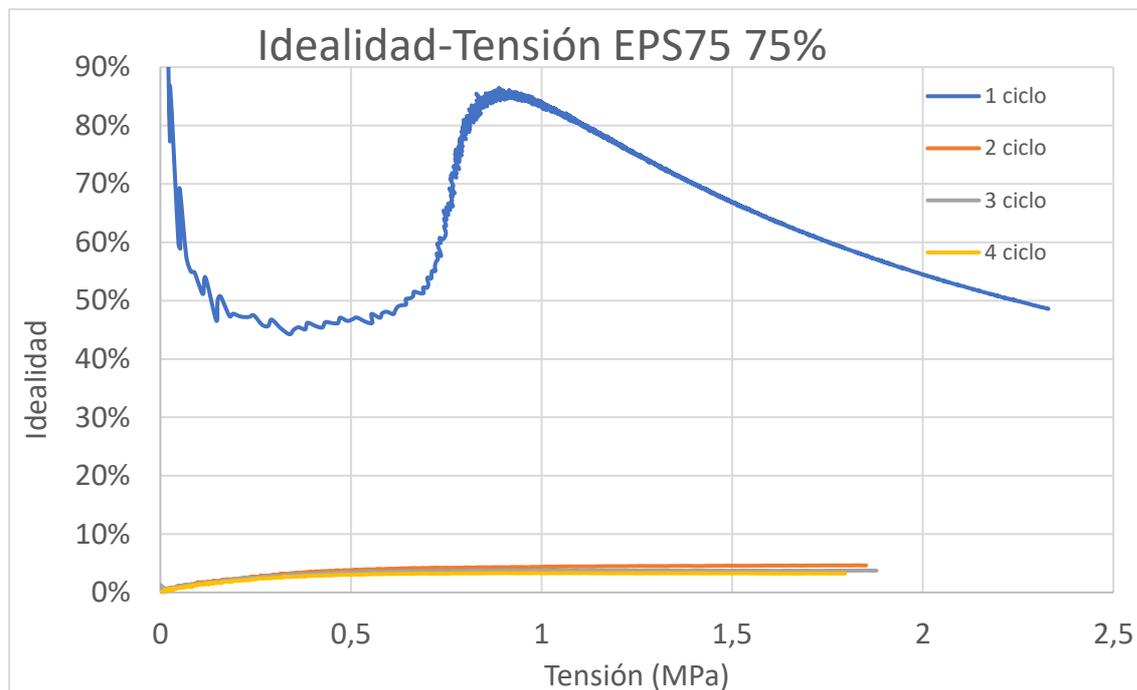


Figura 314

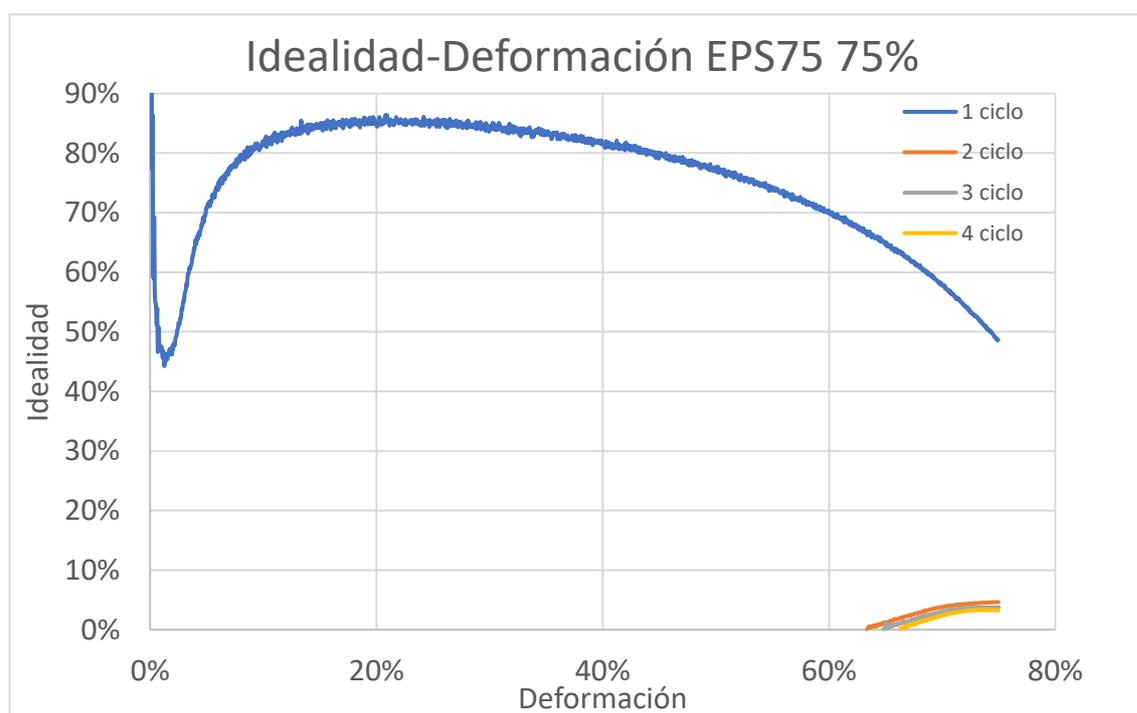


Figura 315

M.7.3 Ensayos al 62,5%

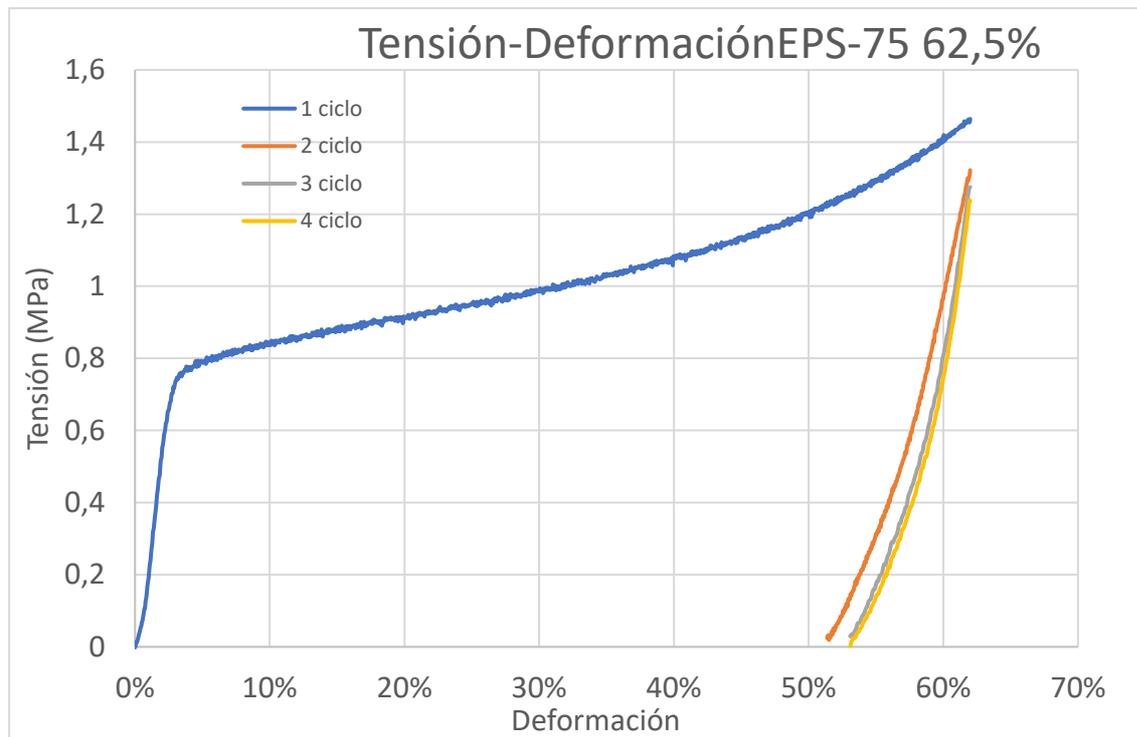


Figura 316

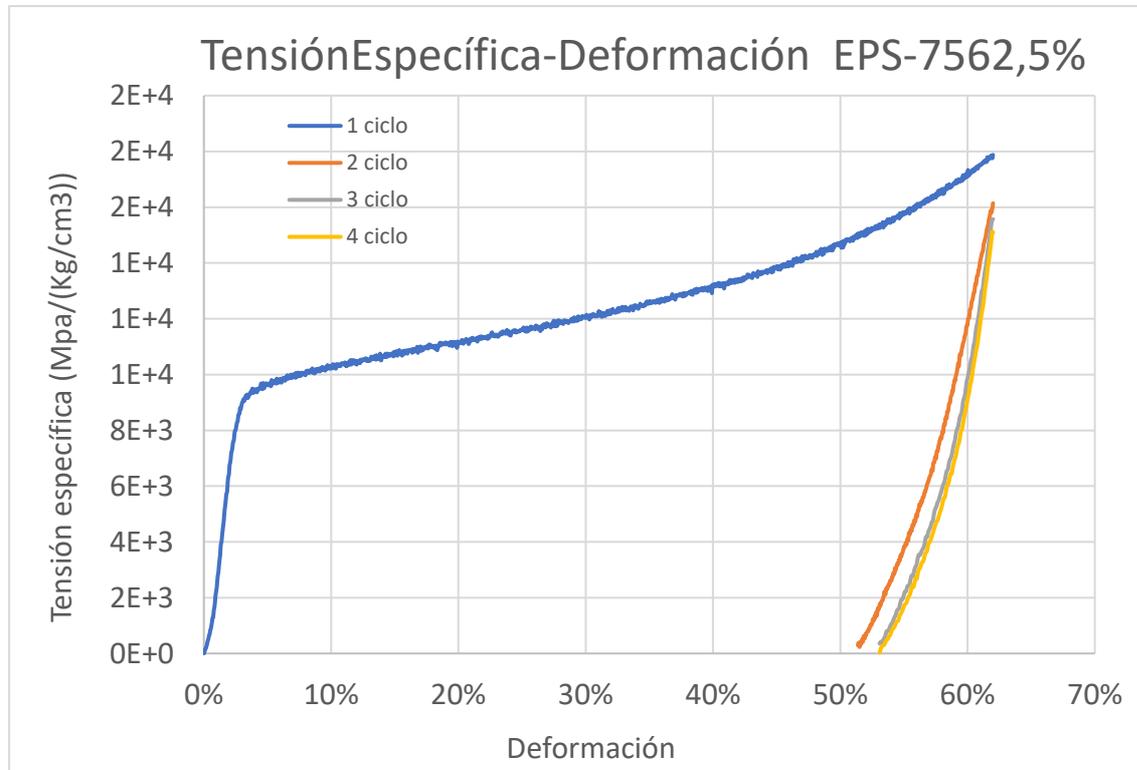


Figura 317

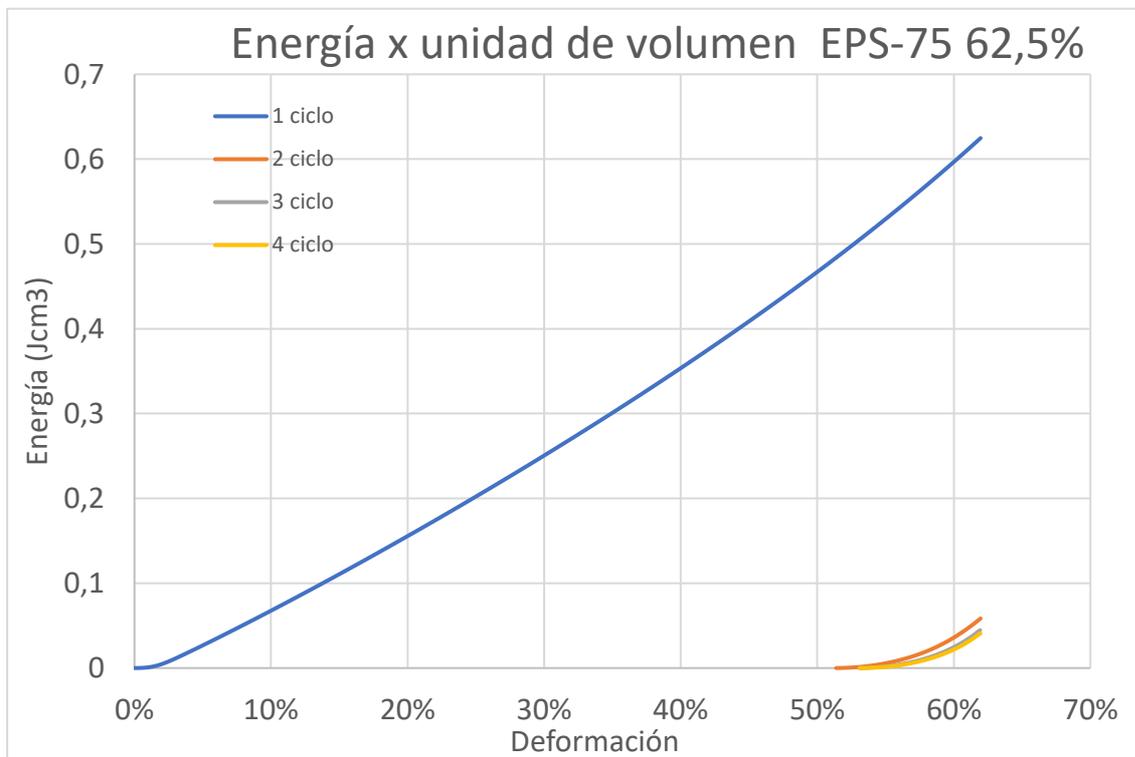


Figura 319

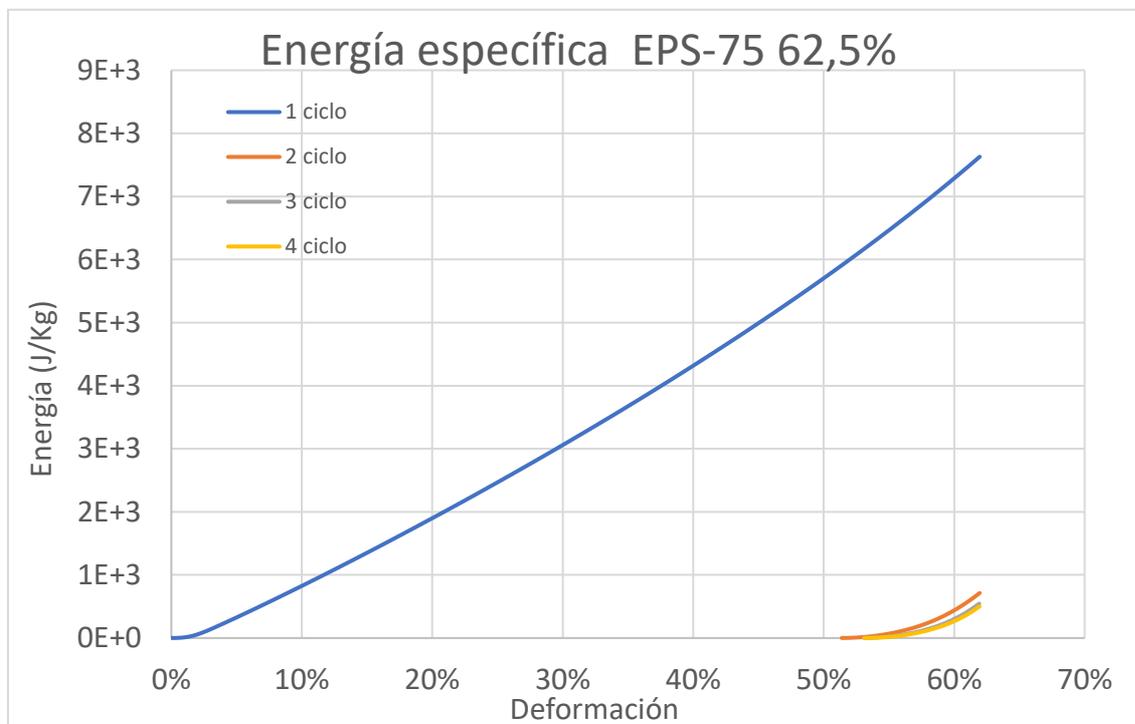


Figura 318

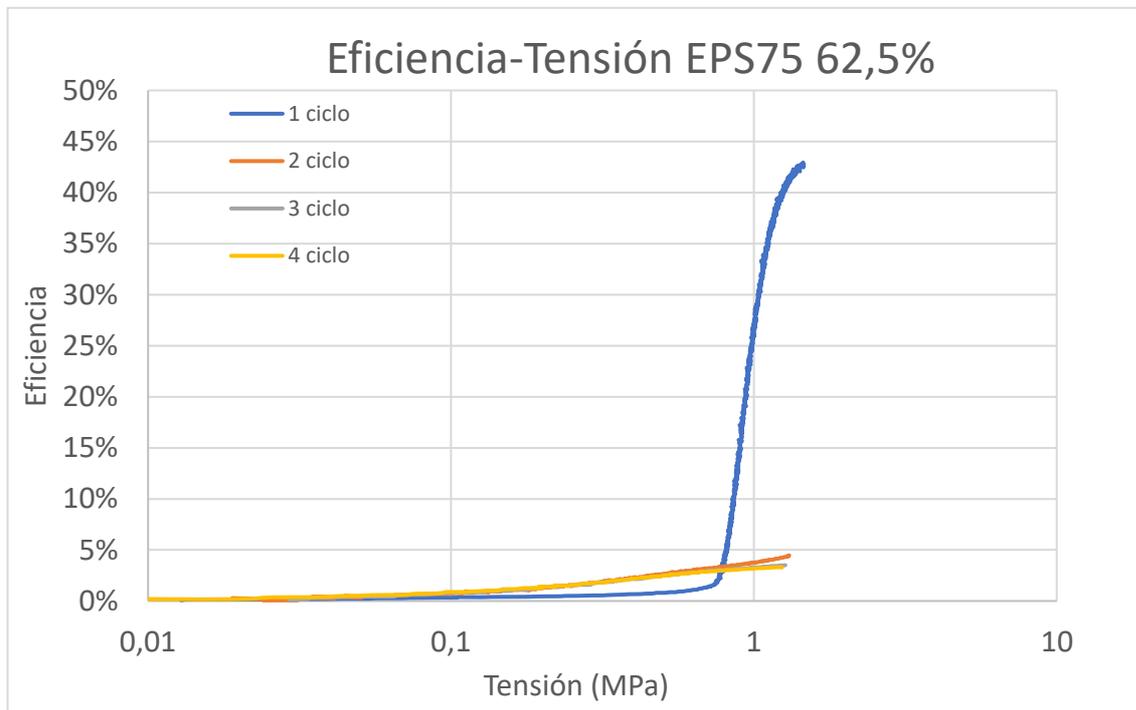


Figura 320

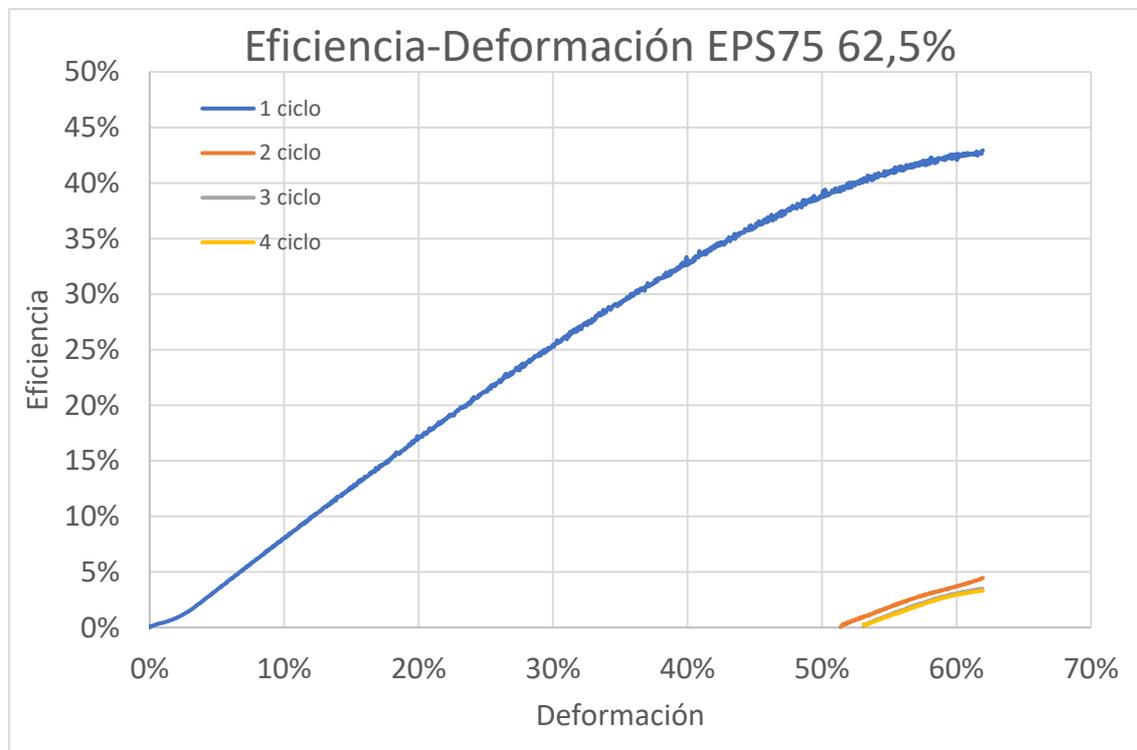


Figura 321

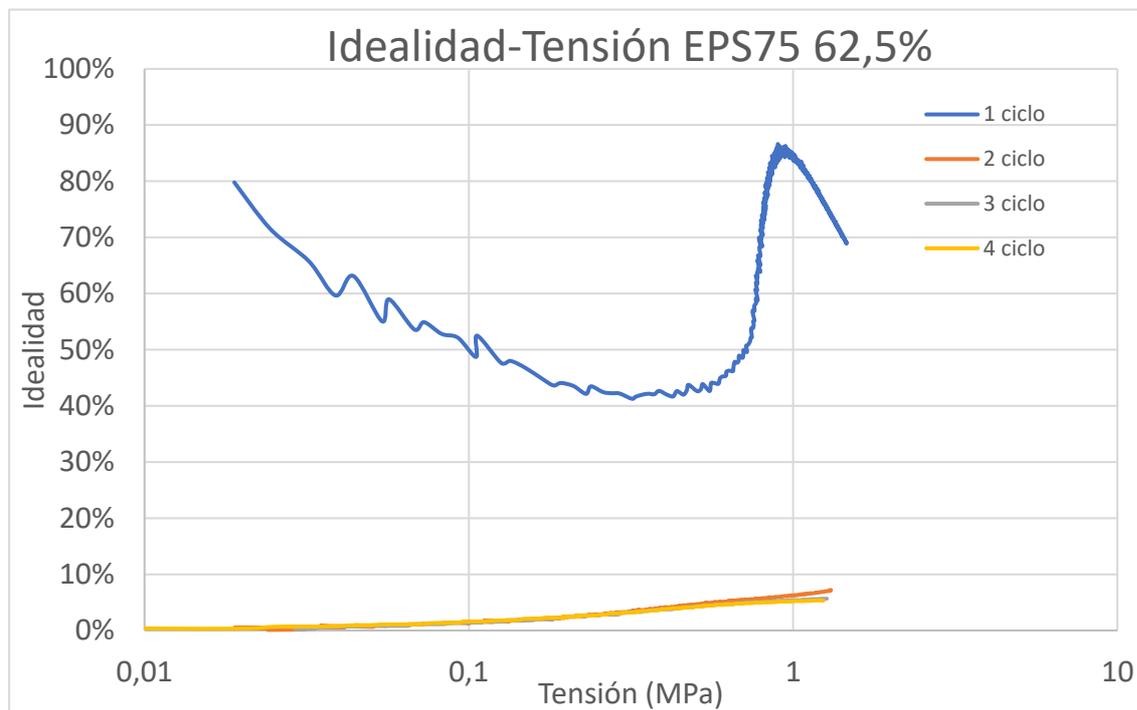


Figura 322

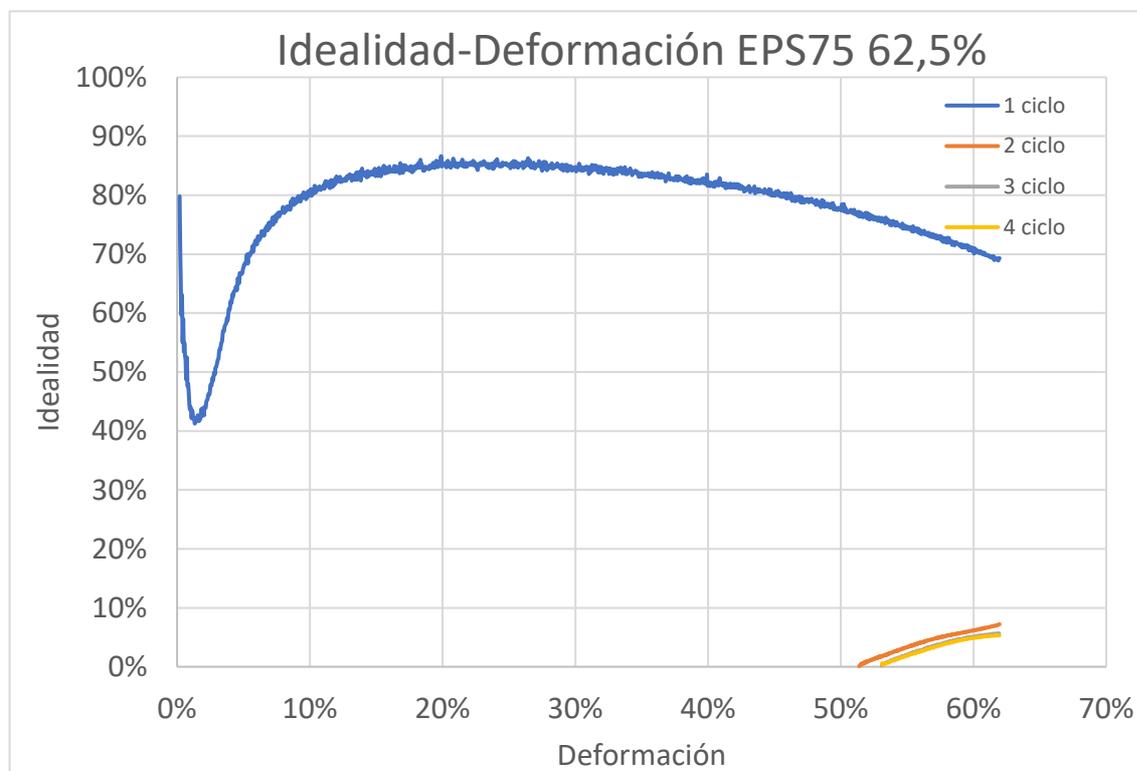


Figura 323

M.7.4 Ensayos al 50%

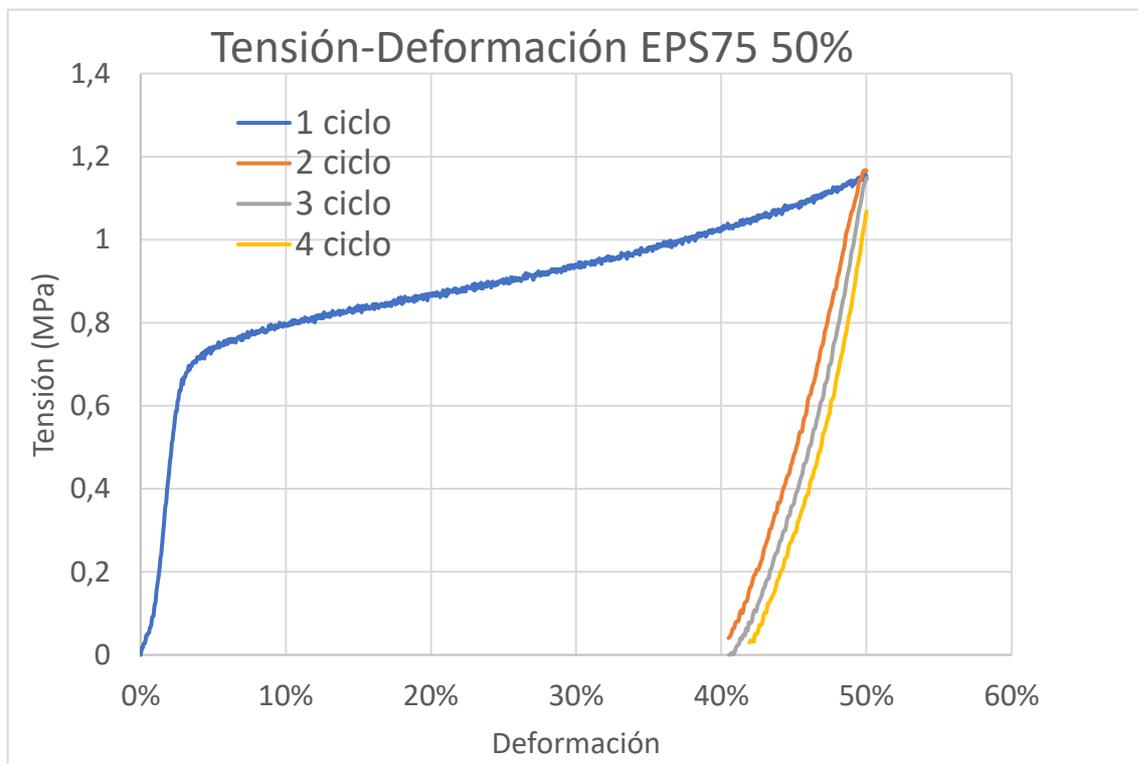


Figura 324

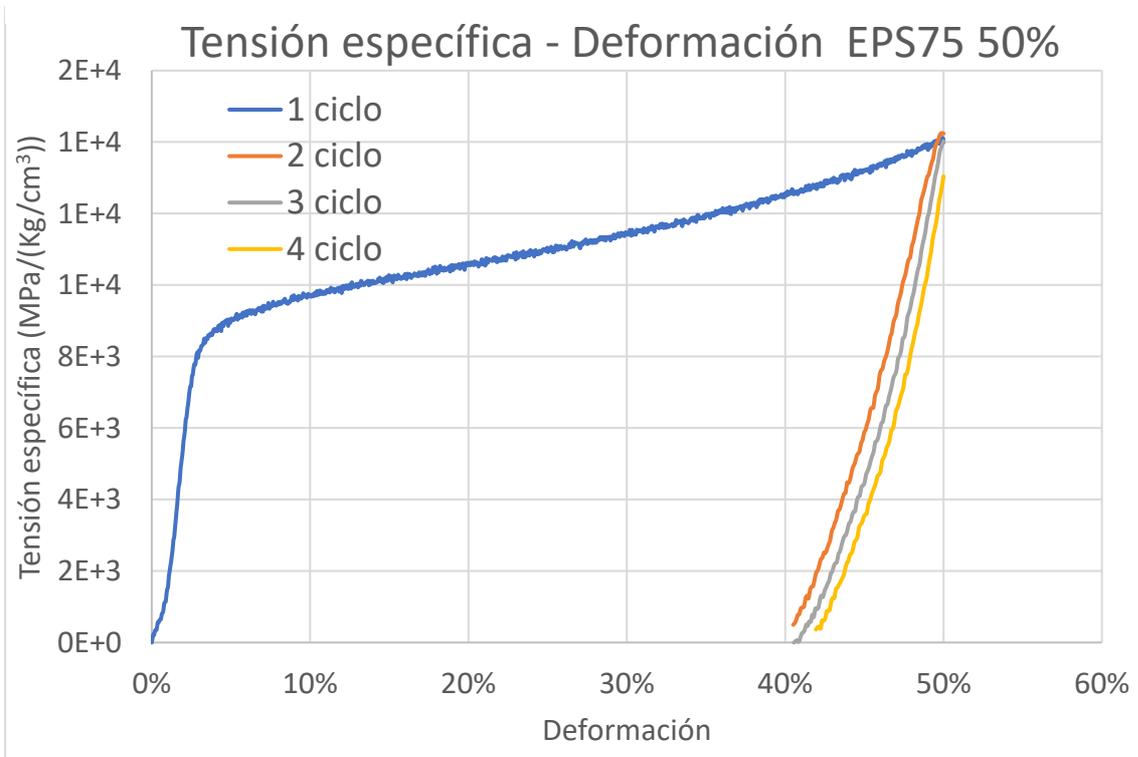


Figura 325

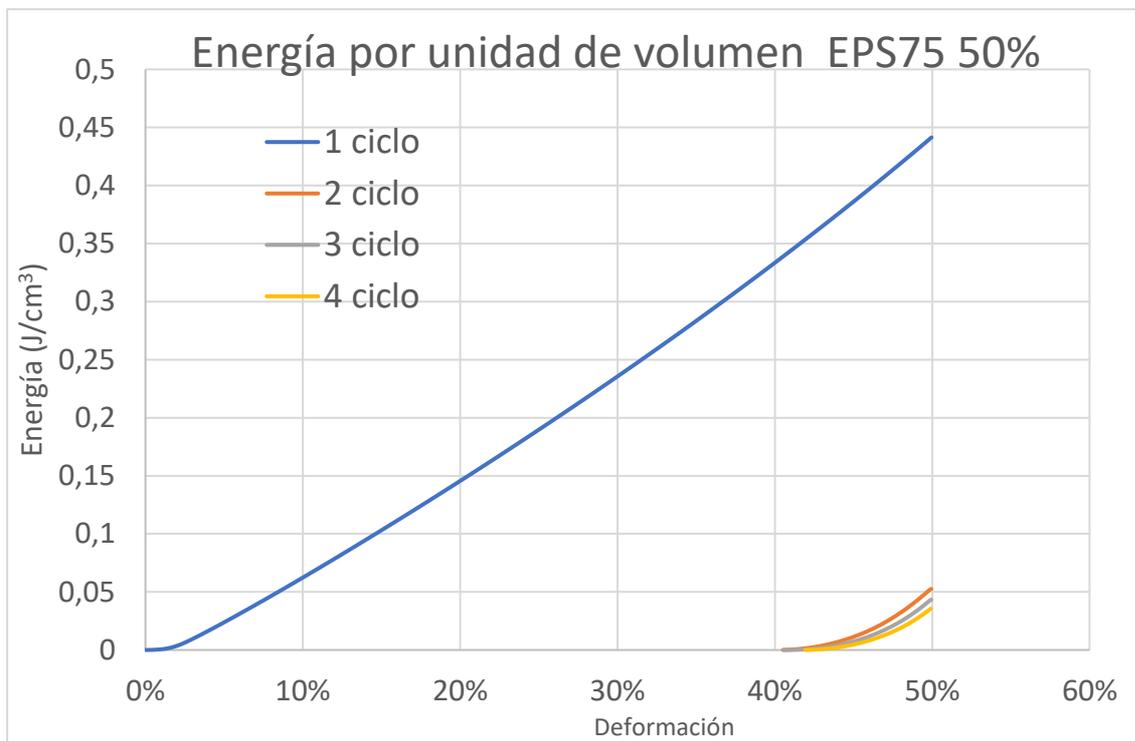


Figura 326

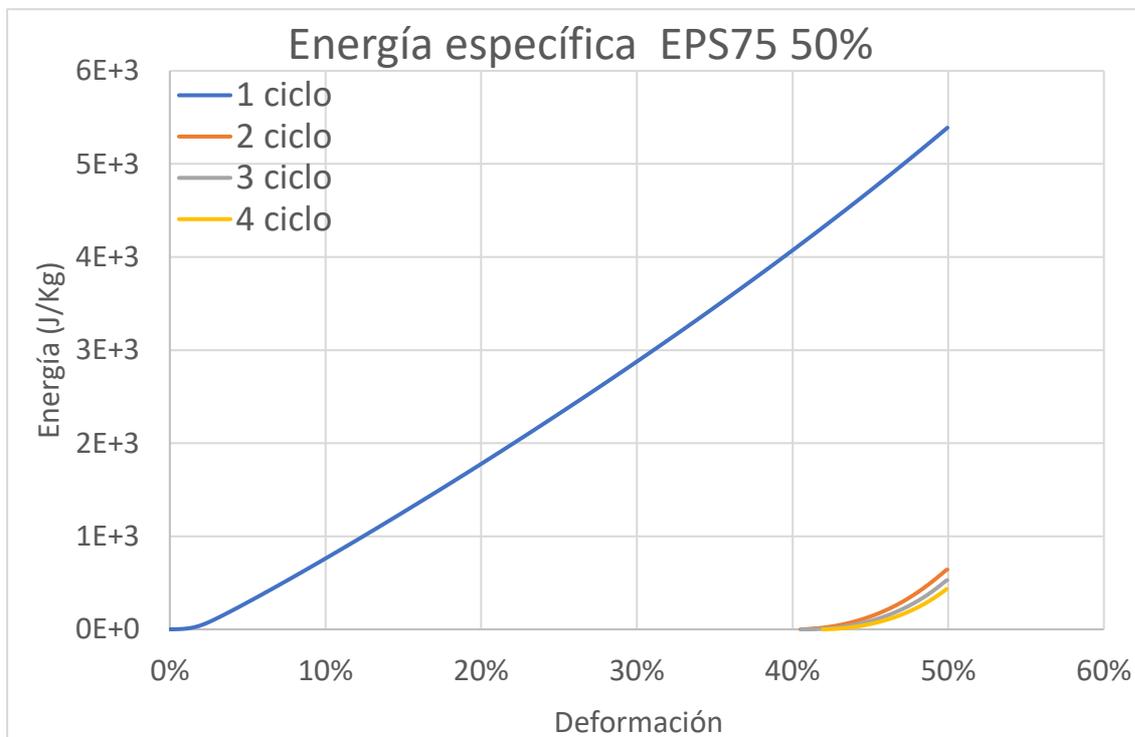


Figura 327

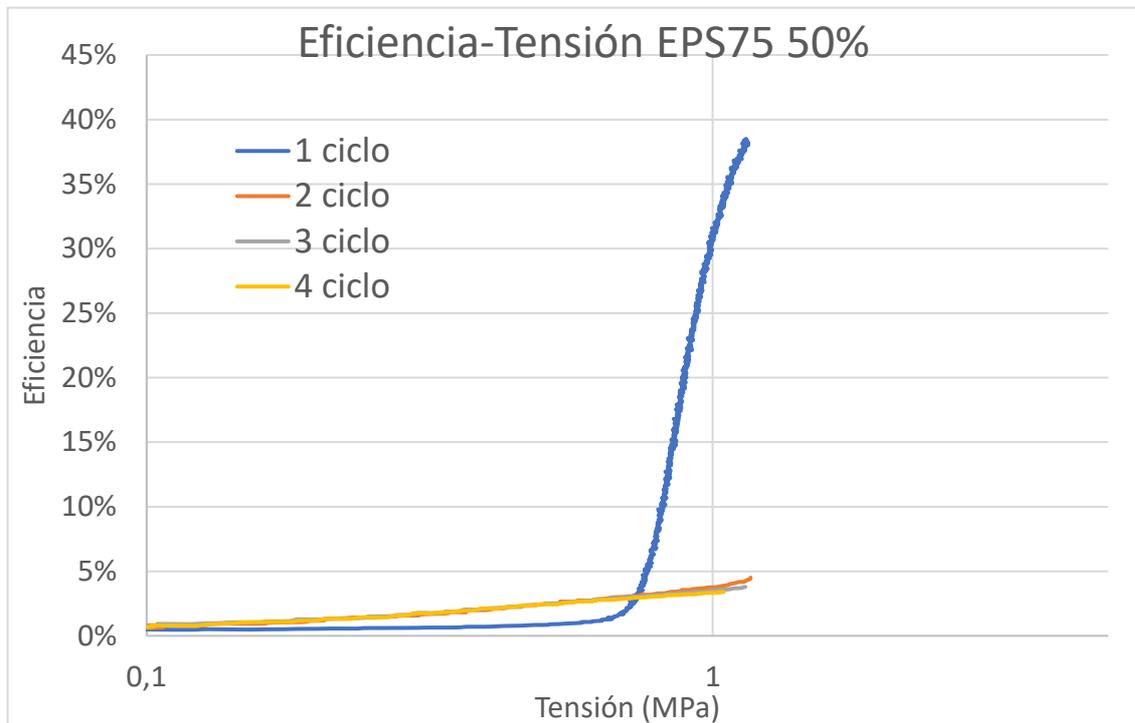


Figura 328

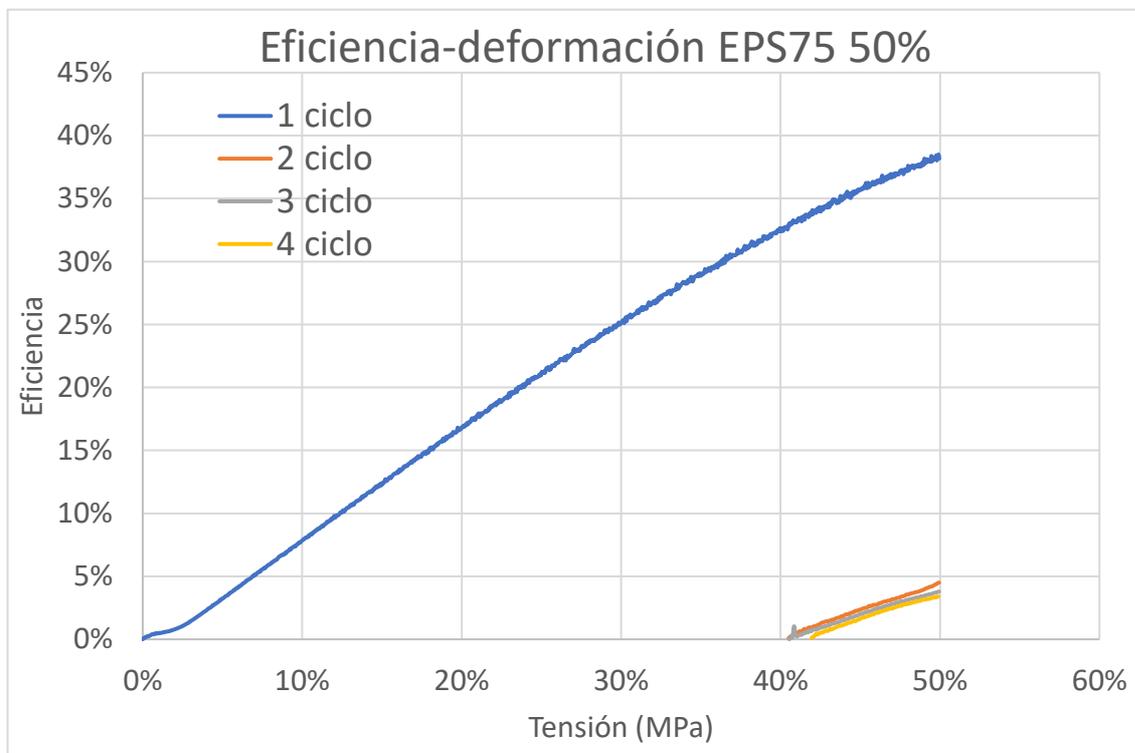


Figura 329

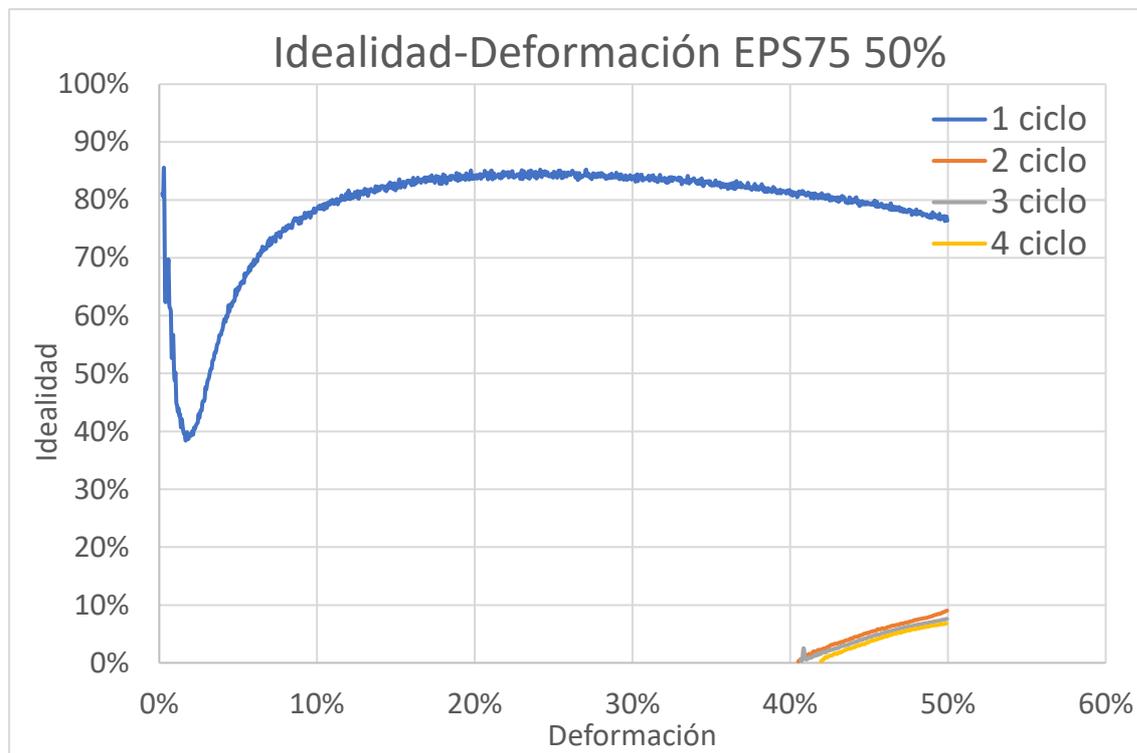


Figura 330

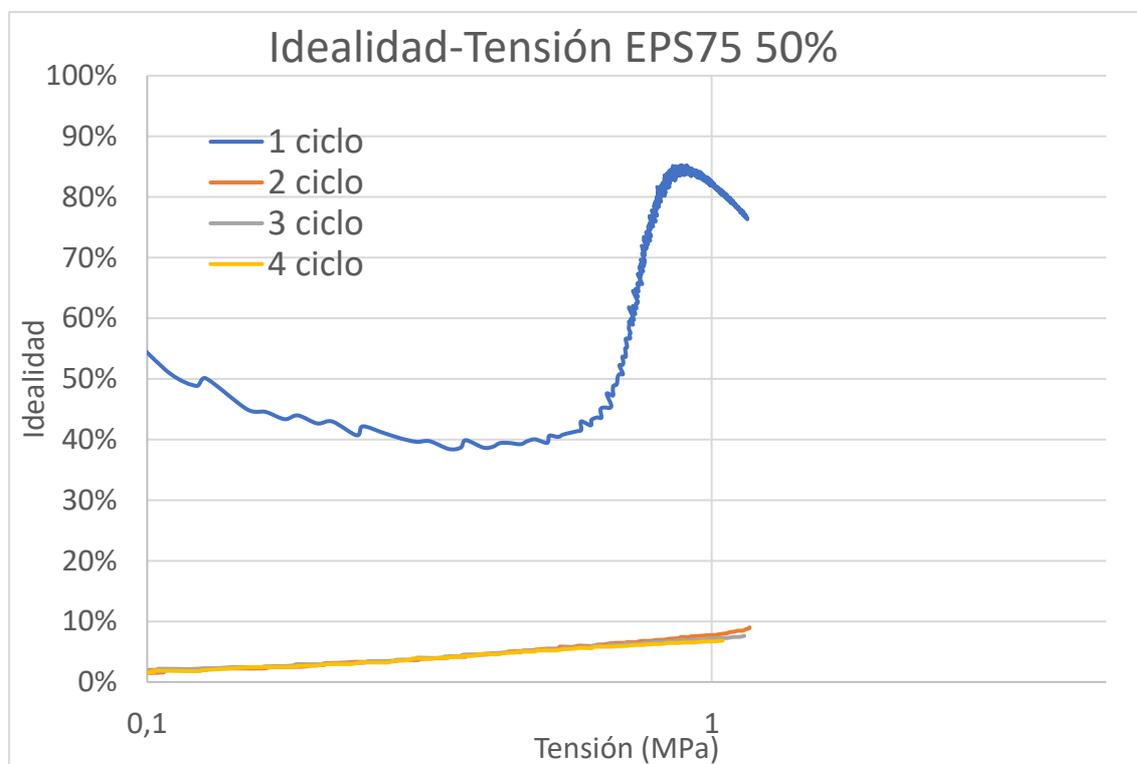


Figura 331