

# Estudio de efecto en propiedades mecánicas por el uso de solventes para suavizar superficies de impresiones 3D tipo FDM

Francisca Alarcón<sup>1</sup>, Angelo Oñate Soto<sup>2</sup>, Carlos Medina Muñoz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería de Materiales, Facultad de ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.

Email: cmedinam@udec.cl

## Resumen

Estudio sistemático de comparar dos solventes (cloroformo y diclorometano) para el tratamiento superficial y el efecto de estos tratamientos en las propiedades mecánicas de impresiones 3D tipo FDM con PLA, por medio de ensayos de tracción, relajación y fluencia (Creep) bajo diferentes condiciones de carga y así analizar si el material se afecta completamente o solo es un tratamiento superficial. Se obtiene una disminución de la rugosidad de las piezas de hasta un 79% para el caso del cloroformo una vez transcurrido 30 minutos y un 57% al usar diclorometano con un tiempo de exposición de 10 minutos, también desde los 15 minutos el módulo elástico al igual que la resistencia a la tracción van disminuyendo considerablemente llegando a un 80% y 70% menos respectivamente al usar diclorometano y una disminución de un 88% y 77% al exponer las muestras al cloroformo en comparación a la probeta sin tratamiento.

**Palabras clave:** Comportamiento viscoelástico; PLA; rugosidad; propiedades mecánicas.

## Abstract

Systematic study to compare two solvents (chloroform and dichloromethane) for surface treatment and the effect of these treatments on the mechanical properties of FDM 3D prints with PLA, by means of tensile, relaxation and creep tests under different loading conditions and thus analyze whether the material is completely affected or only by a surface treatment. A decrease in the roughness of the parts of up to 79% is obtained in the case of chloroform after 30 minutes and 57% when using dichloromethane with an exposure time of 10 minutes, also from 15 minutes the elastic modulus as well as the tensile strength decrease considerably reaching 80% and 70% less respectively when using dichloromethane and a decrease of 88% and 77% when exposing the samples to chloroform compared to the untreated test piece.

**Keywords:** Viscoelastic behavior; PLA; rugosity; mechanical properties.

## 1. Introducción

Existen diferentes métodos de creación de prototipos y fabricación siendo uno de ellos la impresión 3D, dentro de esta tecnología se encuentra la técnica de prototipado rápido o fabricación aditiva (FA), que ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años por presentar numerosas ventajas como flexibilidad, libertad de diseño, capacidad de imprimir estructuras complejas y alta sostenibilidad [1], siendo el ácido poliláctico (PLA) el polímero biodegradable más utilizado en el proceso[2].

El modelado por deposición fundida (FDM) es uno de los métodos más comunes que se basa en la extrusión [3], se libera un filamento polimérico el que se va depositando capa a capa produciendo un efecto escalera, este factor principal afecta la rugosidad de la superficie [4].

El acabado superficial juega un papel clave en las propiedades del producto. Para su análisis, la rugosidad superficial es el indicador más común, predecirlo con precisión es de especial interés para el diseño y selección de las condiciones de fabricación, ya que la rugosidad afecta el comportamiento mecánico de los productos, como la resistencia al

desgaste, la iniciación de grietas, el rodamiento y la vida de fatiga.

Para mejorar las características superficiales de las piezas se tienen las técnicas de post-procesamiento, donde una de ellas son los tratamientos químicos los cuales proporcionan una mayor reducción de la rugosidad de la superficie al tiempo que mantienen un flujo de trabajo sencillo y bajo costo, para llevar a cabo los tratamientos superficiales químicos el polímero interactúa con un solvente orgánico por medio de la exposición al vapor o por inmersión, por lo que es esencial la selección de solventes que son los que interactúan molecularmente con las piezas impresas llevando al polímero a un estado viscoso, este flujo de material viscoso se distribuye por los picos y valles superficiales lo que permite el alisado de la superficie [5].

Hay dos formas de realizar el tratamiento por medio de vapor, usando vapores a temperatura ambiente o alta. En este último, el recipiente se calienta para acelerar la cinética de la reacción, pero es más difícil de controlar y la evaporación no uniforme puede dar como resultado un acabado superficial irregular. Por otro lado, el alisado es más gradual a temperatura ambiente y menos agresiva que la inmersión en disolvente [6].

Se han hecho diversas investigaciones en el polímero ácido poliláctico (PLA), realizando tratamientos por medio de vapor con solventes como acetato de etilo, diclorometano, cloroformo y tetrahidrofurano, con tiempos de exposición de 0 a 180 minutos [6], espesor de capa de 0.2 mm, relleno 100% rectilíneo y ángulo de relleno 0°, llegando a la conclusión que la evaporación del solvente demostró dar un mejor acabado en las superficies, obteniendo una reducción en la rugosidad después de 60–120 minutos, de hasta un 98% en el caso del cloroformo, un 94% en el caso del diclorometano, casi un 80% en el caso del tetrahidrofurano y un 35% en el caso del acetato de etilo, además de presentar cristalización por parte del polímero [7], [5].

La interacción molecular entre solventes y las piezas impresas en 3D se puede analizar por medio de la espectroscopía Raman que es una técnica de alta resolución que proporciona en pocos segundos información química y estructural de casi cualquier material o compuesto. Las variaciones de frecuencia observadas en el fenómeno de dispersión Raman, son equivalentes a variaciones de energía, donde los iones y átomos enlazados químicamente para formar moléculas y redes cristalinas están sometidos a constantes movimientos vibracionales y rotacionales, a cada uno de estos movimientos le corresponde un valor determinado de la energía molecular entregando

un espectro para estos valores [8], donde cuanto más fuertes o rígidos son los enlaces químicos mayores son las frecuencias observadas [9].

Por el estado viscoso que se presenta al realizar el tratamiento químico y los movimientos vibracionales de las moléculas al interior de las probetas es fundamental conocer el comportamiento bajo distintos tipos de cargas [10], además de su comportamiento viscoelástico el que se manifiesta en los materiales de distintas formas, como un comportamiento de fluencia, así como en el comportamiento de relajación de la tensión [11].

Los estudios sobre las propiedades mecánicas y viscoelásticas luego de realizar un post-procesamiento químico a piezas impresas en 3D son limitados, especialmente si se trata de PLA sin agregados y procesado por FDM.

En este trabajo se presenta un estudio de las propiedades mecánicas de piezas de PLA al exponerlas al vapor de diferentes disolventes orgánicos durante un periodo controlado de tiempo para mejorar la calidad de las superficies de las piezas. Para esto se fabrican probetas con forma de hueso de perro, según la norma ASTM D638 y por medio de la realización de ensayos de tracción, relajación y fluencia se busca caracterizar el comportamiento del PLA bajo diferentes condiciones de carga y así analizar si el tratamiento químico provoca cambios significativos al interior de las piezas, ya que esto no ha sido analizado en estudios previos.

### 1.1. Objetivo

Estudiar el efecto del uso de solventes para suavizar impresiones 3D en sus propiedades mecánicas y comportamiento viscoelástico.

### 1.2. Hipótesis de diseño

El post-procesado químico mejora la rugosidad, pero afecta negativamente las propiedades mecánicas y el comportamiento viscoelástico de las piezas fabricadas mediante impresión 3D por la presencia de solvente al interior de las muestras.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Materiales

Para la investigación se utilizó como material base el filamento ácido poliláctico (PLA) natural marca CICLA 3D y se fabricaron probetas tipo V basadas en la norma ASTM D638-14.

Se utilizó la impresora 3D UltiMaker 2+ para la fabricación de las muestras. Estas impresoras utilizan tecnología de formación FDM, adicionalmente para mejorar la adherencia a la cama de impresión se utilizó pegamento 3D LAC.

Se imprimieron un total de 315 probetas con una densidad de relleno del 100%, de las cuales a 21 se le mide la rugosidad y se le aplican a 3 el ensayo de tracción, a 9 el ensayo de fluencia, y a 9 el ensayo de relajación, para obtener las propiedades de base del material.

### 2.1.1. Solventes

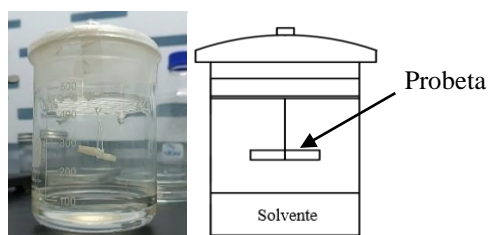
Se utiliza Cloroformo y Diclorometano para realizar el post-procesamiento químico por exposición al vapor, en la Tabla 2.11 se presentan algunas de sus propiedades.

**Tabla 2.1.** Propiedades solvente

Solvente	Fórmula química	Masa molar	Pto. Ebullición
Cloroformo	$\text{CHCl}_3$	119,38 [g/mol]	61 [°C]
Diclorometano	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$	84,93 [g/mol]	40 [°C]

### 2.1.2. Post-tratamiento químico

Se realiza el tratamiento químico exponiendo las probetas durante tiempos de 5, 10, 15, 30, 45, 60 y 120 [min] en un frasco donde se añade 100 ml de solvente y se deja suspendida la probeta con un hilo de algodón, el frasco cuenta con una tapa y se le posiciona una película de Parafilm por fuera para evitar la evaporación de los solventes hacia el exterior y placas de Petri para ir ubicando las probetas una vez realizado el tratamiento para almacenarlas a temperatura ambiente (20°C), lo que se observa en la Figura 2.1



**Figura 2.1.** Representación montaje probetas

### 2.1.3. Equipos

Para determinar la rugosidad de las probetas se utiliza un dispositivo electrónico llamado rugosímetro TIME 3221, este instrumento mide el valor de la rugosidad media aritmética (Ra) expresado en micras [ $\mu\text{m}$ ].

Posteriormente de medir la rugosidad se analizan las probetas químicamente con la máquina LabRam HR Evolution (HORIBA JOBIN YVON), utilizando una línea de excitación de 633 nm, con un rango de número de onda de 200-3500  $\text{cm}^{-1}$  y las muestras se presionaron suavemente sobre un portaobjetos de vidrio limpio.

Para todos los ensayos realizados se utilizó la máquina de ensayos universal ProLine Z005 de Zwick Roell, la cual permite una carga máxima de 5 kN. Esta máquina se controla por medio del software de ensayos testXpert III y se utilizó además un extensómetro para una mayor precisión en la toma de datos.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizan de acuerdo con la norma ASTM D638 que establece los métodos de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos, utilizando 3 probetas por cada solvente y tiempo en que se realizó el tratamiento químico.

Se utiliza la velocidad mínima presentada en la Tabla 1 de la norma ASTM D638, para muestras de tipo V barras y tubos, la velocidad del ensayo es de  $1 \pm 25\%$  [mm/min] [12].

Estos ensayos se realizan con el fin de conocer las propiedades mecánicas de límite elástico y deformación en el máximo esfuerzo alcanzado, los cuales servirán de parámetros para los ensayos de fluencia y relajación.

### 2.2.2. Ensayo de relajación

Este ensayo busca estudiar cómo disminuye la tensión a lo largo del tiempo cuando la deformación se mantiene constante [10].

De los datos obtenidos a través de los ensayos de tracción se consideraron tres valores de deformación correspondientes al 27%, 36% y 45% de la deformación en la tensión máxima según lo planteado en [10], donde estos valores se eligen para capturar diferentes etapas del comportamiento del material durante la relajación y facilitar la comparación de los resultados y se midió durante un tiempo de 600 [s].

### 2.2.3. Ensayo de fluencia

En el ensayo de fluencia el parámetro de entrada es la tensión, que se mantiene constante, y el parámetro de salida es la deformación, que se incrementa con el tiempo siguiendo una curva logarítmica [13].

La norma ASTM D2990-17 establece que, para ensayos de fluencia sin variación de temperatura, el número mínimo de probetas a ensayar es de tres si se ensayan menos de cuatro niveles de tensión [14]. En este caso, se considera el mínimo de ensayos por porcentaje de tensión.

Las tensiones escogidas están basadas en lo expuesto en el artículo [15]. De esta manera, utilizando los datos obtenidos en los ensayos de tracción, se consideraron tres tensiones del 10%, 30% y 60% de la tensión del límite elástico, además se aplica un esfuerzo incremental en 5 segundos y se mantiene por 10 minutos.

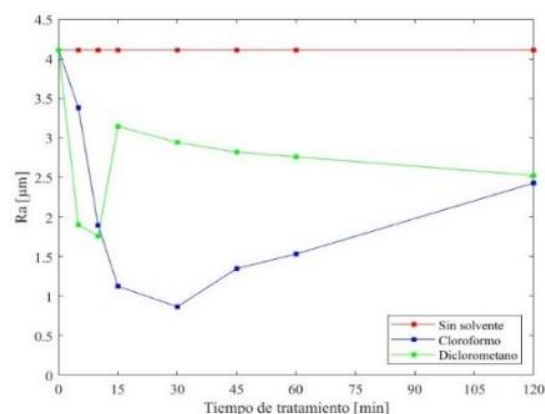
## 3. Resultados y análisis

### 3.1. Rugosidad

El tiempo 0 se refiere a las probetas sin tratamiento, luego se exponen al vapor 3 probetas durante 5 minutos en cloroformo y diclorometano y así sucesivamente hasta realizar el tratamiento a los 10, 15, 30, 45, 60 y 120 minutos, al terminar el postratamiento se mide su rugosidad y los resultados se presentan en la Tabla 3.21 y se hace una comparación gráfica lo que se observa en la Figura 3.1

**Tabla 3.1.** Rugosidad probetas

Tiempo [min]	Cloroformo Ra [um]	Diclorometano Ra [um]
0	4,108 ± 0,2527	4,108 ± 0,2527
5	3,380 ± 0,3176	1,901 ± 0,1145
10	1,894 ± 0,1835	1,757 ± 0,1146
15	1,124 ± 0,1914	3,145 ± 0,3374
30	0,865 ± 0,0949	2,942 ± 0,1707
45	1,348 ± 0,2756	2,819 ± 0,1334
60	1,531 ± 0,1985	2,760 ± 0,3446
120	2,428 ± 0,4651	2,523 ± 0,0300

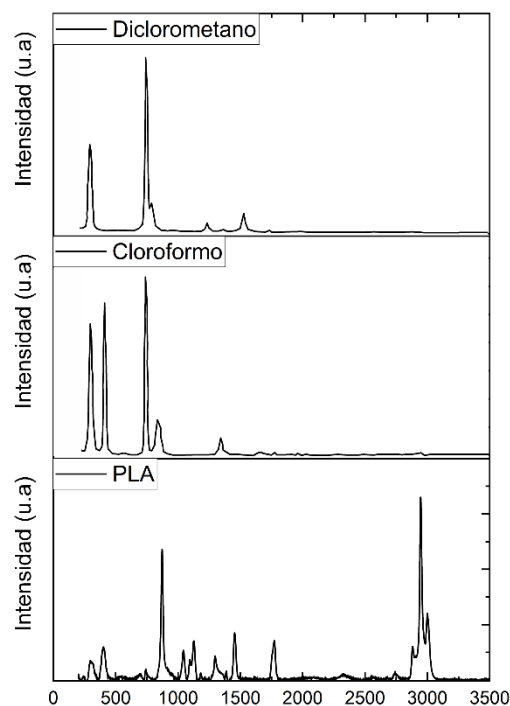


**Figura 3.1.** Promedio rugosidad en función de los tiempos de exposición al vapor

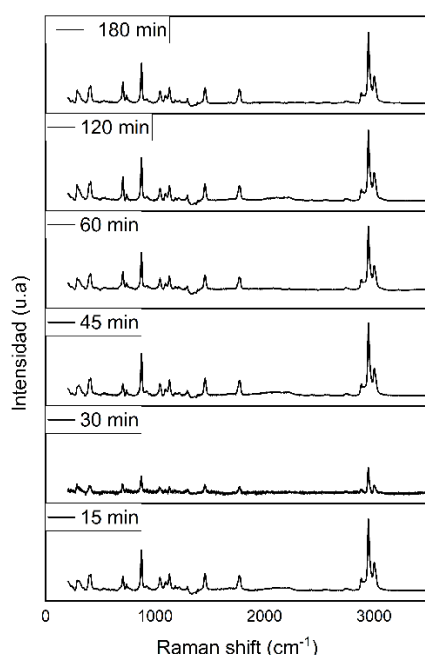
Al analizar los resultados presentados y observando el gráfico el cloroformo y diclorometano son útiles para suavizar superficies de impresiones 3D tipo FDM, hay una disminución de la rugosidad de las piezas de hasta un 79% para el caso del cloroformo una vez transcurrido 30 minutos y un 57% al usar diclorometano con un tiempo de exposición de 10 minutos, siendo el cloroformo el solvente más óptimo por obtener mejores resultados.

### 3.2. Espectroscopía Raman

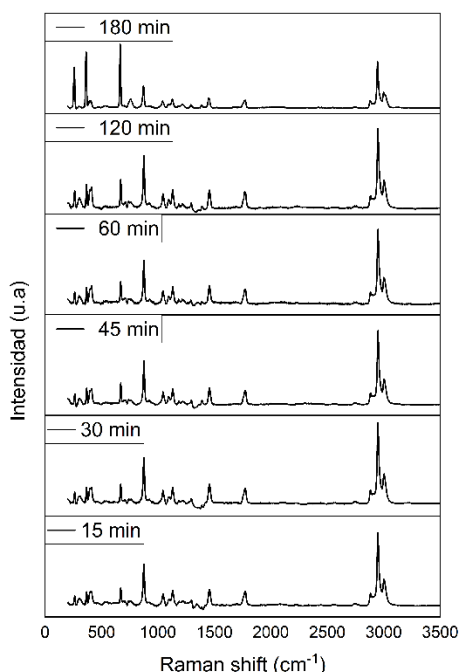
Es espectro raman del PLA, diclorometano y cloroformo se presentan en la Figura 3.2. Los espectros de las muestras sometidas a los solventes se aprecian en la Figura 3.3 y Figura 3.4, para el diclorometano y el cloroformo respectivamente.



**Figura 3.2.** Espectro raman de los materiales base.



**Figura 3.3.** Espectroscopia Raman PLA + Diclorometano para diferentes tiempos de exposición a los vapores.



**Figura 3.4.** Espectroscopia Raman PLA + Cloroformo para diferentes tiempos de exposición a los vapores.

En la Tabla 3.2, se presenta un resumen del significado de cada pico mostrado en el gráfico, donde se puede ver que al exponer las probetas a los solventes estos generan movimientos moleculares como es la vibración y el estiramiento de algunos enlaces lo que provoca cambios en la estructura interna del polímero, además de ver picos que no

concuerdan los del PLA los que demuestran que hay solvente al interior de las piezas.

**Tabla 3.2.** Interpretación de los espectros

Posición (cm <sup>-1</sup> )	Asignación	Intensidad del pico (a.u.)		
		PLA	PLA/CHCl <sub>3</sub>	PLA/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
3002	Vibración simétrica y asimétrica del CH <sub>3</sub>	19850	10749	9935
2947		41765	20889	20518
2882		14697	8953	6786
1772	Estiramiento del C=O	20646	22465	15356
1211	Vibración del C-O-C	22938	32711	23361
1045	Estiramiento del C-CH <sub>3</sub>	27317	34823	26170
738	Estiramiento del C=O	25669	37342	26160
401	Vibración del C-CO	29551	38348	27112

Las frecuencias anormalmente altas de CH<sub>3</sub> que se encuentran entre los 3000-2800 cm<sup>-1</sup> y sus bandas de vibración asimétricas junto con el estiramiento de los enlaces donde se encuentran presentes indican la existencia de enlaces de hidrógeno C – H / O lo que resulta en propiedades mecánicas deficientes del producto final, además de presentar una disminución de aproximadamente un 50% del valor de la intensidad para el caso del uso del cloroformo y del diclorometano lo que indica una menor energía (unión de enlace) en la molécula que está presente en la estructura del PLA.

La banda del tramo C = O, ubicada a 1772 cm<sup>-1</sup> para el espectro de la muestra amorfa, cambia antes y después del tratamiento químico, lo que indica que se produjo el proceso de cristalización.

Las probetas sometidas a los vapores químicos de ambos solventes presentan peaks en la posición 665 cm<sup>-1</sup> y 259 cm<sup>-1</sup> que representan enlaces C-Cl, lo cual sugiere la presencia de solventes en las probetas sometidas.

### 3.3. Ensayos de tracción

A continuación, en los gráficos presentados en la Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3., están los resultados de los ensayos de tracción realizados a las probetas

luego de ser expuestas al vapor de diferentes solventes y distintos tiempos, se calculó un promedio y comparan las probetas sin tratamiento (Sin0), las probetas expuestas al cloroformo (C) y las probetas expuestas al diclorometano (D).

La probeta a la que no se le realiza postratamiento químico tiene un esfuerzo máximo de 54,1 [MPa], en cambio luego de aplicar el post-procesado químico hay una disminución de las propiedades mecánicas, el módulo elástico al igual que la resistencia a la tracción van disminuyendo considerablemente llegando a valores máximos de un 80% y 70% menor respectivamente al usar diclorometano y una disminución de un 88% y 77% al exponer las muestras al cloroformo durante 120 minutos en comparación a la probeta sin tratamiento, en cambio la deformación iba aumentando, mostrando una tendencia que mientras mayor tiempo de exposición

menor resistencia y mayor ductilidad. En la Tabla 3.3. se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.3. Resultados ensayo de tracción

Tiempo [min]	Módulo elástico		Resistencia a la tracción	
	Cloro formo	Dicloro metano	Cloro formo	Dicloro metano
0	26,68	26,68	54,10	54,10
5	28,42	30,44	51,65	49,49
10	33,34	24,69	48,70	42,28
15	20,17	20,86	37,73	38,62
30	15,53	15,63	30,89	32,82
45	11,95	11,03	23,88	24,74
60	7,78	7,02	19,97	19,29
120	3,31	5,31	12,28	16,19

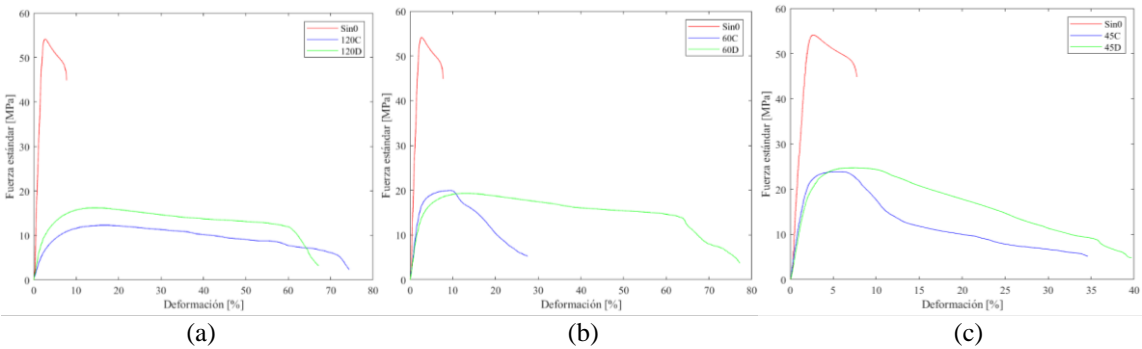


Figura 3.7. Curva esfuerzo-deformación para tratamiento de, (a) 45, (b) 60 y (c) 120 minutos

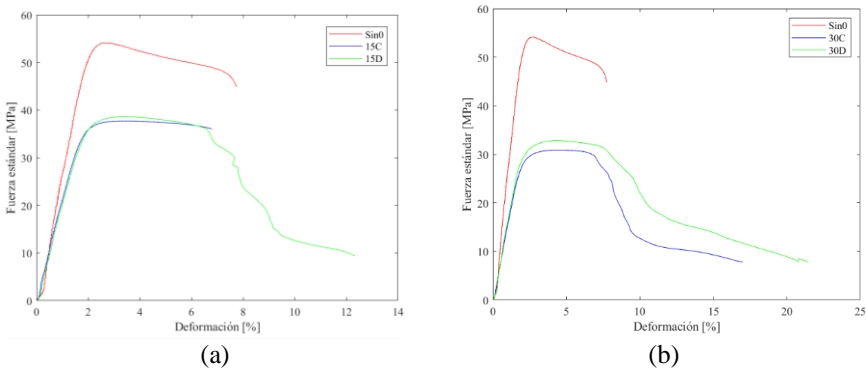


Figura 3.5: Curva esfuerzo-deformación para tratamiento de, (a) 15 minutos y (b) 30 minutos

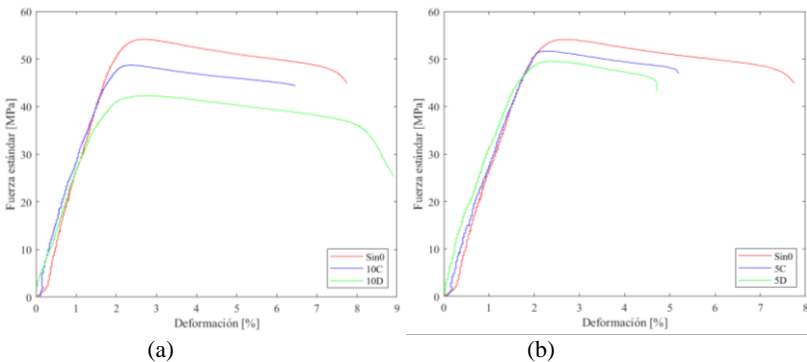
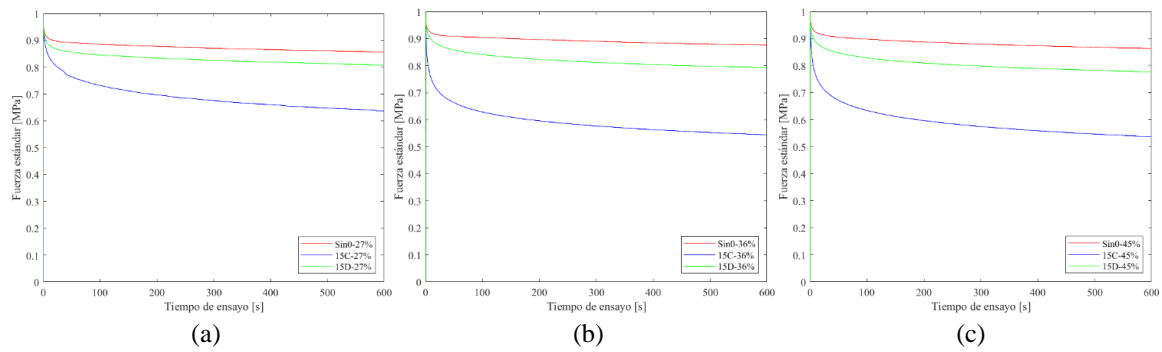
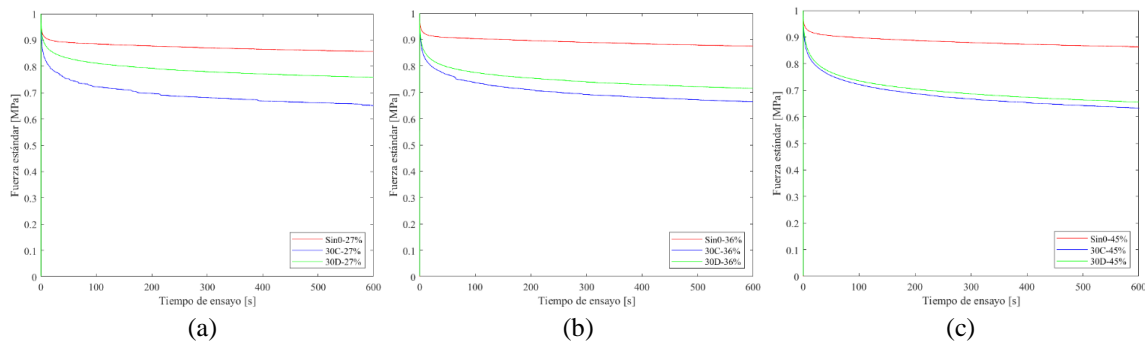


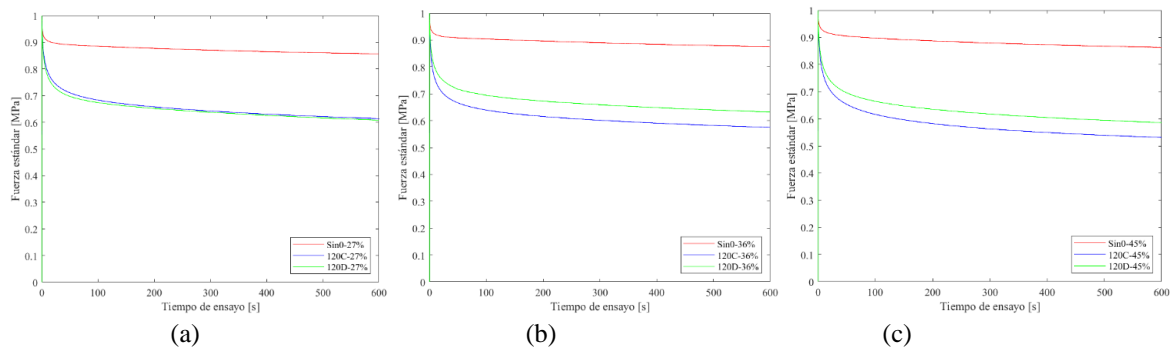
Figura 3.6. Curva esfuerzo-deformación para tratamiento de, (a) 5 minutos y (b) 10 minutos



**Figura 3.8.** Comportamiento a la relajación normalizado a través del tiempo; tiempo de exposición al solvente de 15 minutos, (a) 27%, (b) 36% y (c) 45% de la deformación aplicada



**Figura 3.9.** Comportamiento a la relajación normalizado a través del tiempo; tiempo de exposición al solvente de 30 minutos, (a) 27%, (b) 36% y (c) 45% de la deformación aplicada



**Figura 3.10.** Comportamiento a la relajación normalizado a través del tiempo; tiempo de exposición al solvente de 120 minutos, (a) 27%, (b) 36% y (c) 45% de la deformación aplicada

### 3.4. Ensayos de viscoelasticidad

Los polímeros biodegradables pueden sufrir fallas mucho antes de la fluencia prevista y la resistencia a la tracción máxima, en consecuencia, para conocer el comportamiento del material en estos casos se realizan ensayos de fluencia y relajación.

Para poder visualizar con mayor facilidad el comportamiento del material, se presentan los conjuntos de resultados para cada tiempo de exposición al vapor de diclorometano y cloroformo respectivamente.



### 3.4.1. Ensayo de relajación

Los resultados obtenidos en los ensayos de relajación normalizados se encuentran agrupados para cada uno de los valores de deformación aplicados, se presentan graficas en las figuras 3.8 a la 3.10 de los tiempos críticos determinados en la investigación que corresponden a 15, 30 y 120 minutos, respectivamente. En las gráficas se compara la exposición a ambos solventes y el material sin tratamiento, para el 27%, 36% y 45% de la resistencia a la tracción, respectivamente.

En forma general, se observa una rápida relajación del esfuerzo durante los primeros 200 segundos, seguida de una tasa de relajación más lenta que continua hacia un valor asintótico.

Para los tiempos 15 minutos el esfuerzo disminuye en gran medida para el caso del cloroformo a medida que transcurre el tiempo en comparación a la probeta que no tiene ningún tipo de post-tratamiento, lo que indica una disminución en la vida útil. Por otro lado, para el caso del diclorometano se presenta una pequeña diferencia, pero el comportamiento es similar a las probetas que no fueron expuestas a los solventes.

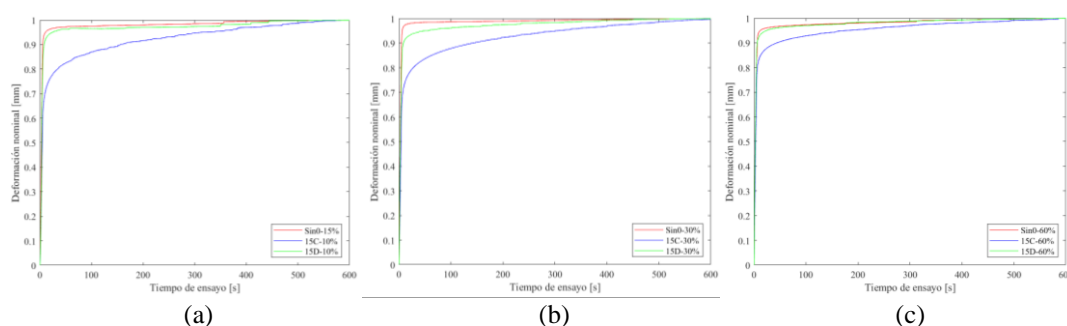
Para los tiempos de 30 y 120 minutos se observa un comportamiento similar entre las curvas con tratamiento de cloroformo y diclorometano, donde para el caso del diclorometano se presenta una caída del valor de las tensiones, lo cual también ocurre con el cloroformo, pero menos pronunciada en comparación a los otros tiempos.

En resumen, el material sometido a los vapores de los solventes estudiado puede deformarse más fácilmente, teniendo una mayor capacidad de deformación plástica, además de indicar que el material exhibe un comportamiento viscoelástico más marcado, es decir, se tiene una mayor fluidez del material.

### 3.4.2. Ensayo de fluencia

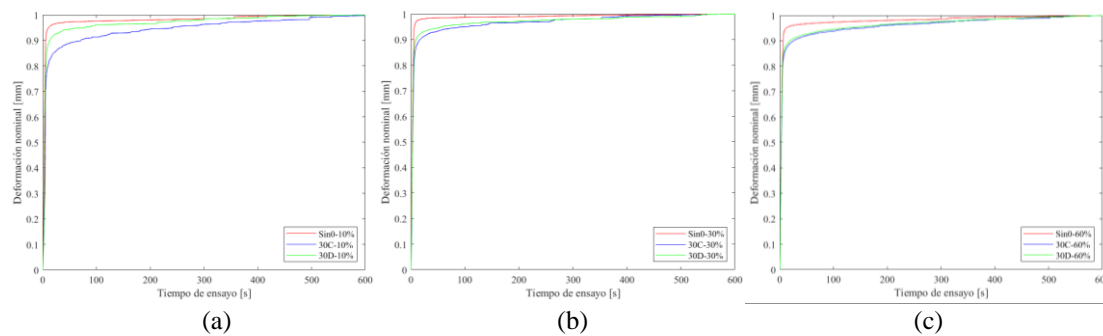
Los resultados obtenidos en los ensayos de fluencia normalizados para cada tiempo de post-tratamiento realizado con los diferentes solventes se encuentran agrupados para cada uno de los valores de fuerza aplicados, se presentan graficas en las figuras 3.11 a la 3.13 de los tiempos críticos determinados en la investigación que corresponden a 15, 30 y 120 minutos, respectivamente. En las gráficas se compara la exposición a ambos solventes y el material sin tratamiento, para el 10%, 30% y 60% del límite elástico, respectivamente.

Todas las curvas presentan dos etapas: una etapa inicial de fluencia, donde el aumento de la deformación por unidad de tiempo aumenta rápidamente, aproximadamente dentro de los diez primeros segundos después de haberse aplicado la carga; y una etapa de fluencia estable (fase 2), donde la deformación se mantiene prácticamente constante, esta etapa fue alcanzada antes en las muestras con mayor fuerza aplicada.

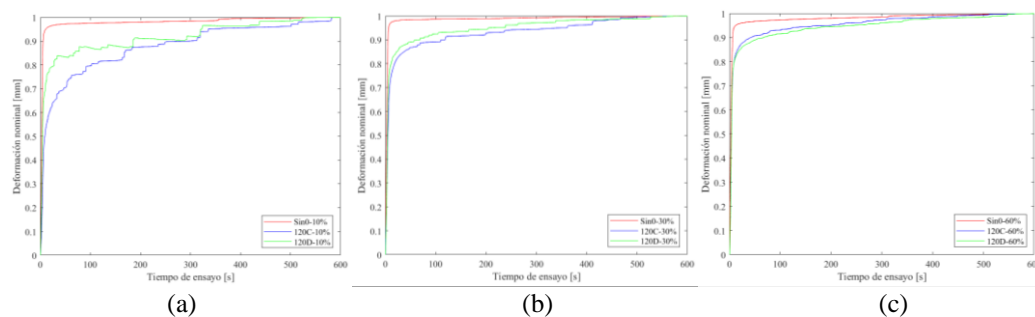


**Figura 3.11.** Comportamiento a la fluencia normalizada con tiempo de post-tratamiento químico de 15 minutos, (a) 10%, (b) 30% y (c) 60% del valor de la fuerza aplicada





**Figura 3.12.** Comportamiento a la fluencia normalizada con tiempo de post-tratamiento químico de 30 minutos, (a) 10%, (b) 30% y (c) 60% del valor de la fuerza aplicada



**Figura 3.13.** Comportamiento a la fluencia normalizada con tiempo de post-tratamiento químico de 120 minutos, (a) 10%, (b) 30% y (c) 60% del valor de la fuerza aplicada

En la fase 2 las curvas con tratamiento tienen una mayor pendiente de aumento de la deformación, esto es debido a que el material experimentó cambios en su microestructura lo que facilita la deformación plástica, además al tener una mayor velocidad se tiene un menor tiempo para que el material disipe la energía generada por la carga aplicada, esto puede llevar al agotamiento más rápido de la capacidad del material para soportar la carga, ya que aumenta la acumulación de tensiones internas y favorece la propagación de grietas.

### 3.5. Discusión de resultados

Es recomendable usar los solventes para suavizar la superficie de impresiones 3D en un tiempo máximo de 15 minutos al realizarse el post-tratamiento a temperatura ambiente, donde se tiene una disminución de la rugosidad de un 73% al usar cloroformo durante 15 minutos y una disminución de un 57% al usar diclorometano transcurridos 10 minutos de tratamiento.

Es notoria la presencia del solvente al interior de las piezas lo que se pudo comprobar mediante la espectroscopia raman lo que afectó las propiedades mecánicas habiendo una disminución de estas, ya que la existencia de enlaces de hidrógeno y dobles enlaces

puede originar cambios no deseados en las propiedades mecánicas y eléctricas de los polímeros, generando su degradación [16]. Sin embargo, la disminución del módulo elástico, la resistencia a la tracción y el límite elástico en los tiempos de 5, 10 y 15 minutos no es mayor al 30% en comparación con las probetas sin tratar.

Si bien hay un cambio de las propiedades mecánicas, se tiene el riesgo de una mayor probabilidad de falla del material antes de su vida útil durante los tiempos mencionados (5, 10 y 15 minutos) al exponer las muestras a cargas o deformaciones constantes durante un determinado tiempo, lo que está reflejado en los ensayos de relajación y fluencia.

### 4. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue estudiar el efecto del uso de solventes para suavizar impresiones 3D en sus propiedades mecánicas.

Se observó una disminución de la rugosidad de las piezas de hasta un 79% para el caso del cloroformo una vez transcurridos 30 minutos y un 57% al usar diclorometano con un tiempo de exposición de 10 minutos.

En las propiedades mecánicas desde los 15 minutos el módulo elástico al igual que la resistencia a la tracción van disminuyendo considerablemente

llegando a un 80% y 70% menos respectivamente al usar diclorometano y una disminución de un 88% y 77% al exponer las muestras al cloroformo en comparación a la probeta sin tratamiento, en cambio la deformación iba aumentando.

En los ensayos de relajación hubo una disminución del valor del esfuerzo al que llegaban las probetas una vez realizado el post-tratamiento químico en los tiempos de 5, 10, 60 y 120 minutos en comparación a las muestras que no tenían ningún tipo de modificación, junto con una caída más pronunciada del valor de las tensiones lo que lleva a una disminución de la vida útil del material. Además, se observó que las muestras alcanzaron rápidamente un estado estable en la mayoría de los casos, tanto en los ensayos de relajación como en los de fluencia.

Finalmente se obtuvo que el uso de solventes para suavizar superficies de impresiones 3D tipo FDM modifica las características de las piezas fabricadas por PLA, lo que afecta significativamente las propiedades mecánicas de las piezas.

## 5. Referencias

- [1] Casado, D. C. (2020). Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review. *Universitat Politècnica de València*.
- [2] Panda, S. S., Chabra, R., Kapil, S., & Patel, V. (2019). Chemical vapour treatment for enhancing the surface finish of PLA object produced by fused deposition method using the Taguchi optimization method. *SN Applied Sciences*.
- [3] Hashmi, A. W., Mali, H. S., & Meena, A. (2021). Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- [4] Jin, Y., Wan, Y., & Liu, Z. (2016). Surface polish of PLA parts in FDM using dichloromethane vapour. *EDP Sciences*.
- [5] Puerta, A. P., Fernandez-Vidal, S., & Batista, M. (2019). Fused deposition modelling interfacial and interlayer bonding in PLA post-processed parts. *Emerald Publishing Limited*.
- [6] Guduru, K., & Srinivasu, G. (2020). Effect of post treatment on tensile properties of carbon reinforced PLA composite by 3D printing. *Materials Today: Proceedings*.
- [7] Valerga, A. P., Batista, M., Fernandez-Vidal, S. R., & Gamez, A. J. (2019). Impact of Chemical Post-Processing in Fused Deposition Modelling (FDM) on Polylactic Acid (PLA) Surface Quality and Structure. *MDPI polymers*.
- [8] Pérez Pueyo, R. (21 de 01 de 2005). *Tesis Doctorals en Xarxa*. Obtenido de Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos: [tesisenred.net/handle/10803/6887#page=1](https://www.tesisenred.net/handle/10803/6887#page=1)
- [9] Serrano Martínez, J. L. (2018). *Espectroscopia infrarroja - Posgrado en ingeniería del agua y del terreno. Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico*. Obtenido de Studocu: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-ciencias-aplicadas-y-ambientales/analisis-quimico/espectroscopia-infrarroja/49358098>
- [10] Bertocco, A., Bruno, M., Armentani, E., Esposito, L., & Perrella, M. (2022). Stress relaxation behavior of additively manufactures polylactic acid (PLA). *Materials*.
- [11] Stankiewicz, A. (2018). Fractional Maxwell model of viscoelastic biological materials. *Contemporary Research Trends in Agricultural Engineering*.
- [12] ASTM D638. Standar Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [13] Águila, A. S. (2013). *Propuesta de nuevos modelos constitutivos para caracterización viscoelástica de materiales termoplásticos*. Barcelona: Universitat Ramon Llull.
- [14] ASTM. D2990-17: Standard Test Methods for tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics.
- [15] Acedo, J. P. (2019). Caracterización y simulación del comportamiento viscoelástico de materiales plásticos mediante el método de elementos finitos. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] González-Prolongo, M. (1997). Propiedades químicas y físicas de polímeros. *E.T.S.I.A. Universidad Politécnica de Madrid*. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/9641>