

# DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

## CARRERA DE MECATRÓNICA

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de Ingeniera en  
Mecatrónica

**Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales  
poliméricos estructurales con porosidad aleatoria**

**Autora:**

Jiménez Carrión Cinthya Paola

**Director:**

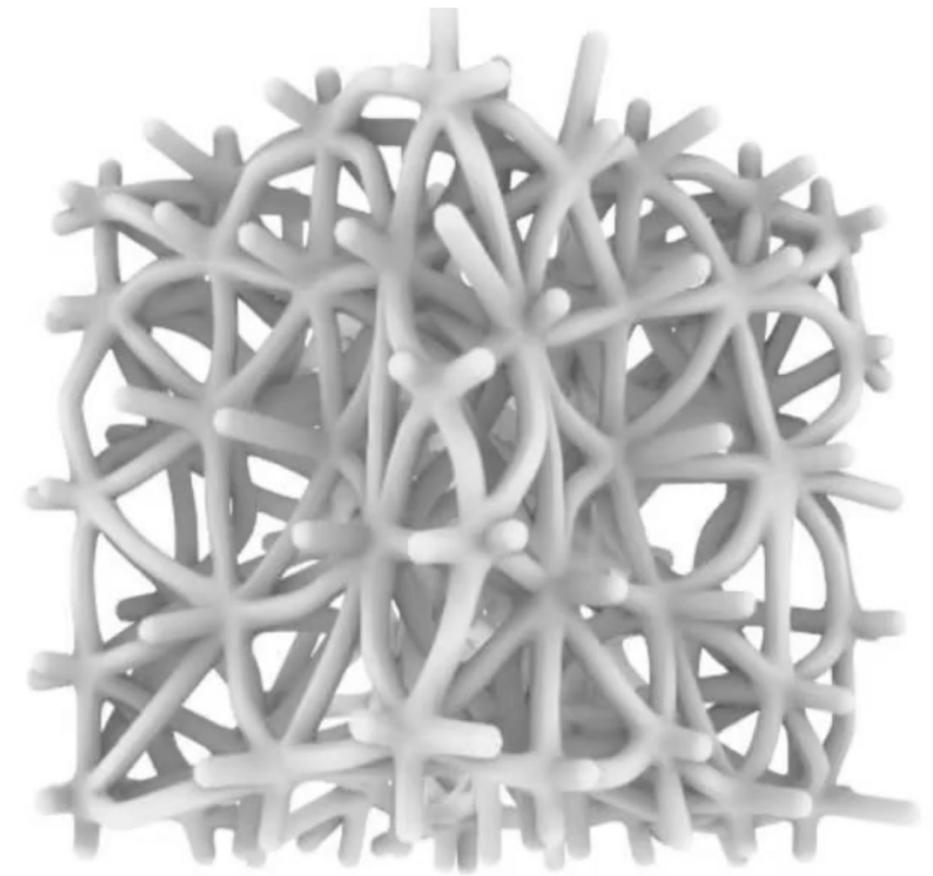
Ing. Lara Padilla Hernán Vinicio, PhD





# CONTENIDO

- 01** Antecedentes y Justificación
- 02** Objetivos
- 03** Revisión de la literatura
- 04** Metodología
- 05** Análisis de Resultados
- 06** Conclusiones
- 07** Recomendaciones
- 08** Trabajo futuro





**Antecedentes y Justificación**

**Alcance**

**Objetivos**

**Revisión de la literatura**

**Metodología**

**Análisis de resultados**

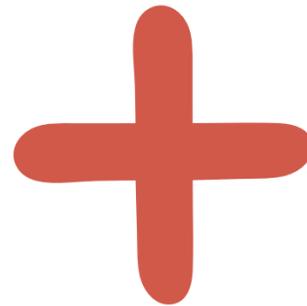
**Conclusiones**

**Recomendaciones**

**Trabajo Futuro**

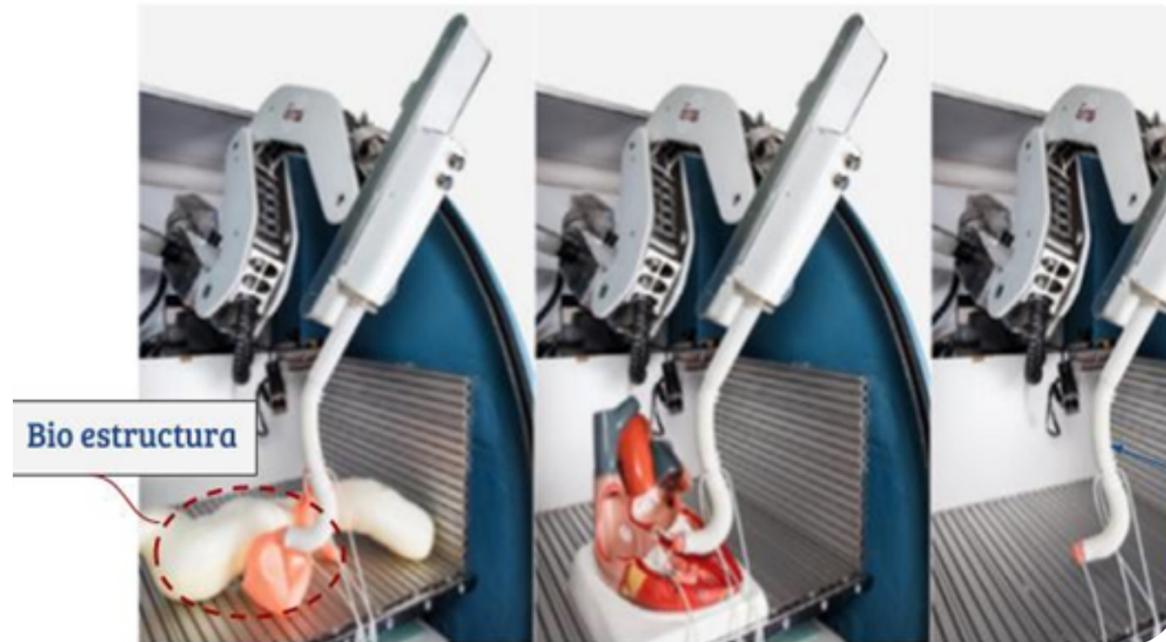
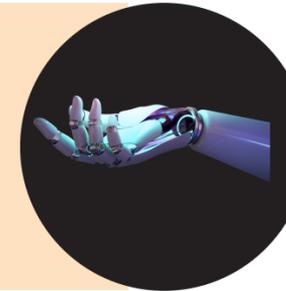


**Materiales avanzados**



# Antecedentes y Justificación

**Sistemas Mecatrónicos**



**Nawrat, 2020**





# Antecedentes y Justificación

## Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

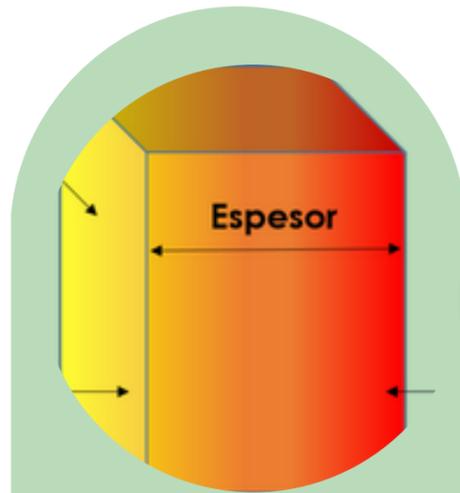
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

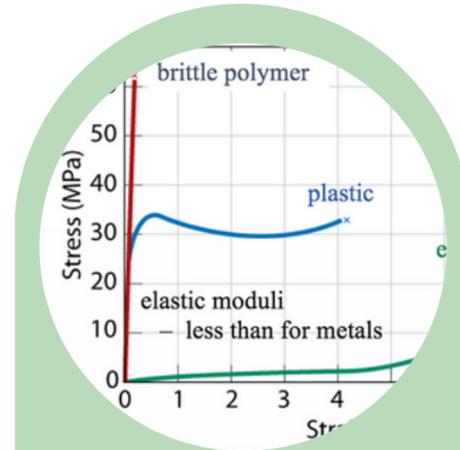
Recomendaciones

Trabajo Futuro



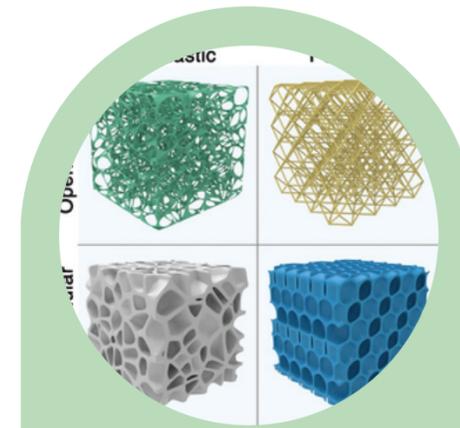
Medir y Correlacionar propiedades

**CONFIABILIDAD**



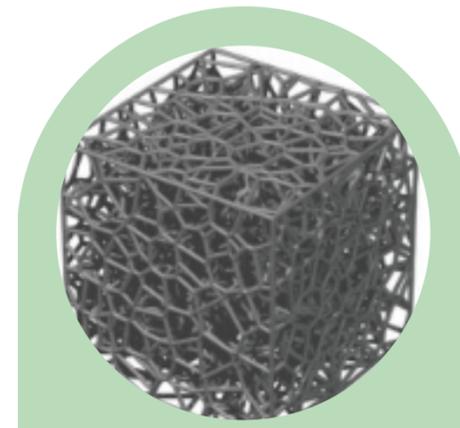
Comportamiento mecánico

**SEGURIDAD**



**REGULARES Y ALEATORIAS**

Estructuras celulares no convencionales



**FORMA POROSIDAD CONECTIVIDAD**

Topología

**FLEXIBILIDAD**



# Antecedentes y Justificación

## Alcance

## Objetivos

## Revisión de la literatura

## Metodología

## Análisis de resultados

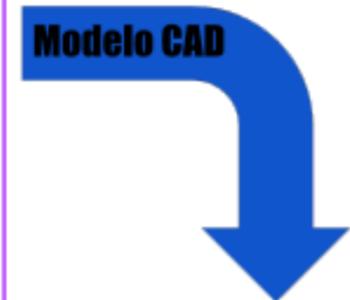
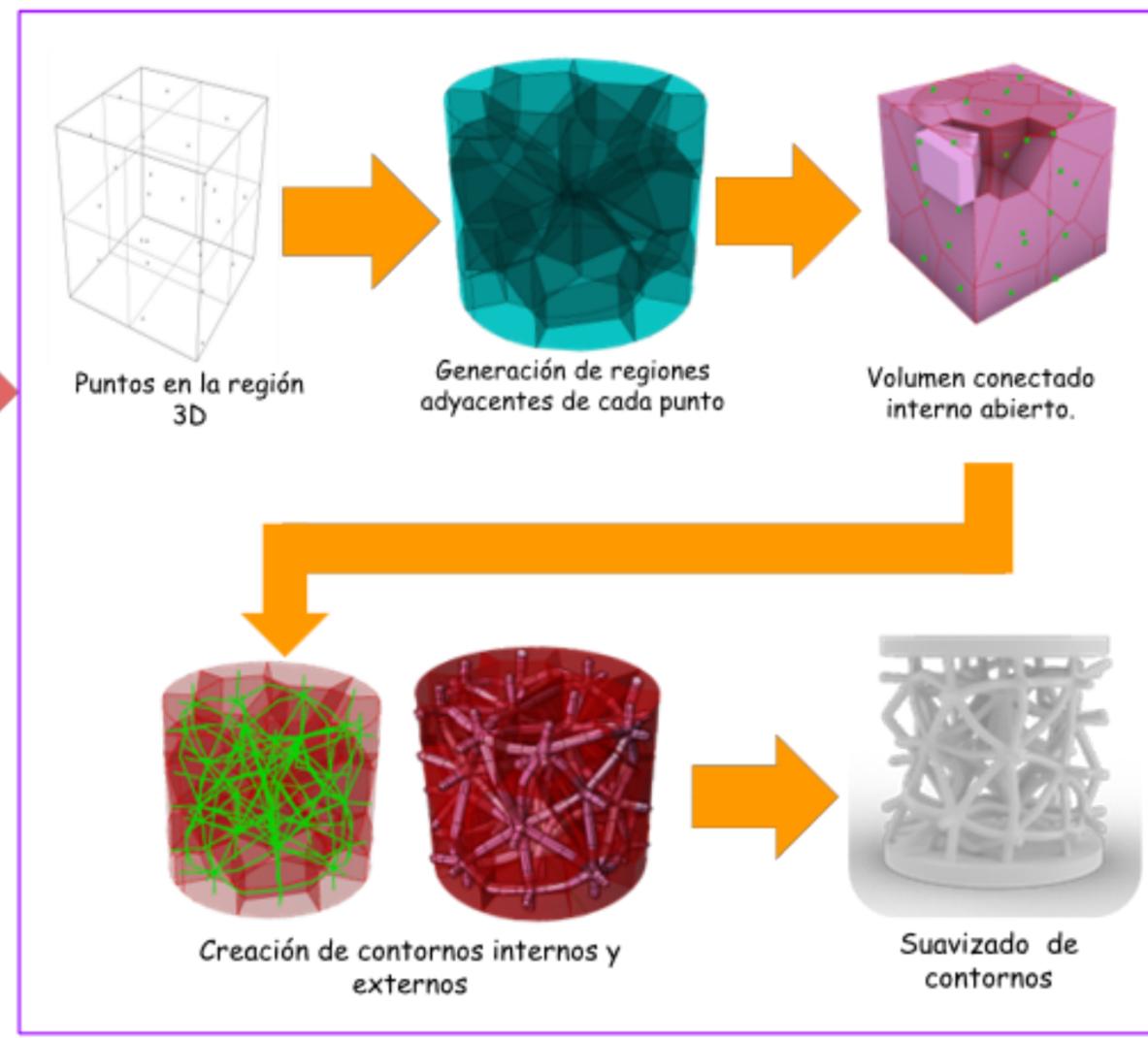
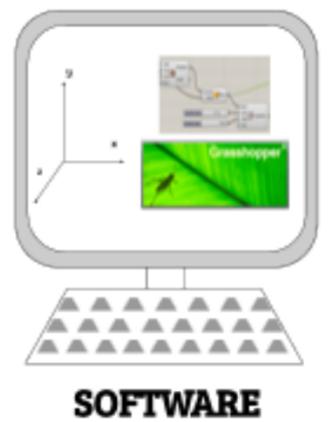
## Conclusiones

## Recomendaciones

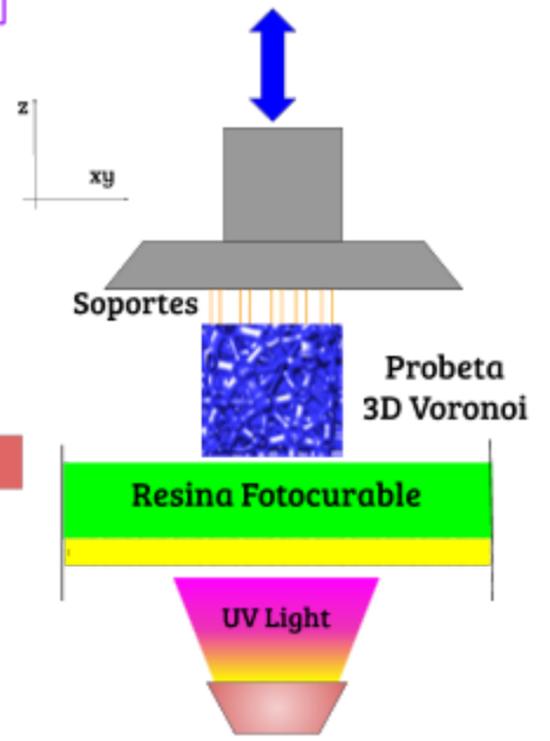
## Trabajo Futuro

# Alcance

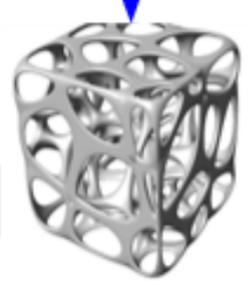
- Tipo de Región 3D
- Número de puntos
- Índice de patrón aleatorio
- Suavizado



**MANUFACTURA POR ESTEREOLITOGRAFÍA**



**Análisis de comportamiento mecánico**

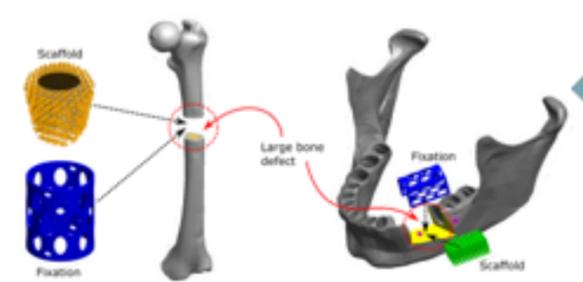


**ESTRUCTURA POROSA TIPO VORONOI**



Verificación de:  
Porosidad final  
Permeabilidad  
Validación dimensional

**DMA (Dynamic Mechanical Analysis)**



**Aplicación en Ingeniería de Tejido**



**Antecedentes y Justificación**

**Alcance**

**Objetivos**

**Revisión de la literatura**

**Metodología**

**Análisis de resultados**

**Conclusiones**

**Recomendaciones**

**Trabajo Futuro**

Desarrollar una plataforma de productos para aplicaciones de materiales estructurales con porosidad aleatoria

1

4

Analizar el comportamiento de la deformación de las probetas sometidas a cargas de compresión mediante visión artificial

ESTUDIAR LAS APLICACIONES DE MANUFACTURA ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS ESTRUCTURALES CON POROSIDAD ALEATORIA

Diseñar y fabricar probetas de materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria usando impresión 3D

2

3

Evaluar factores de comportamiento mecánico de las probetas usando diseño experimental



# Manufactura Aditiva

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

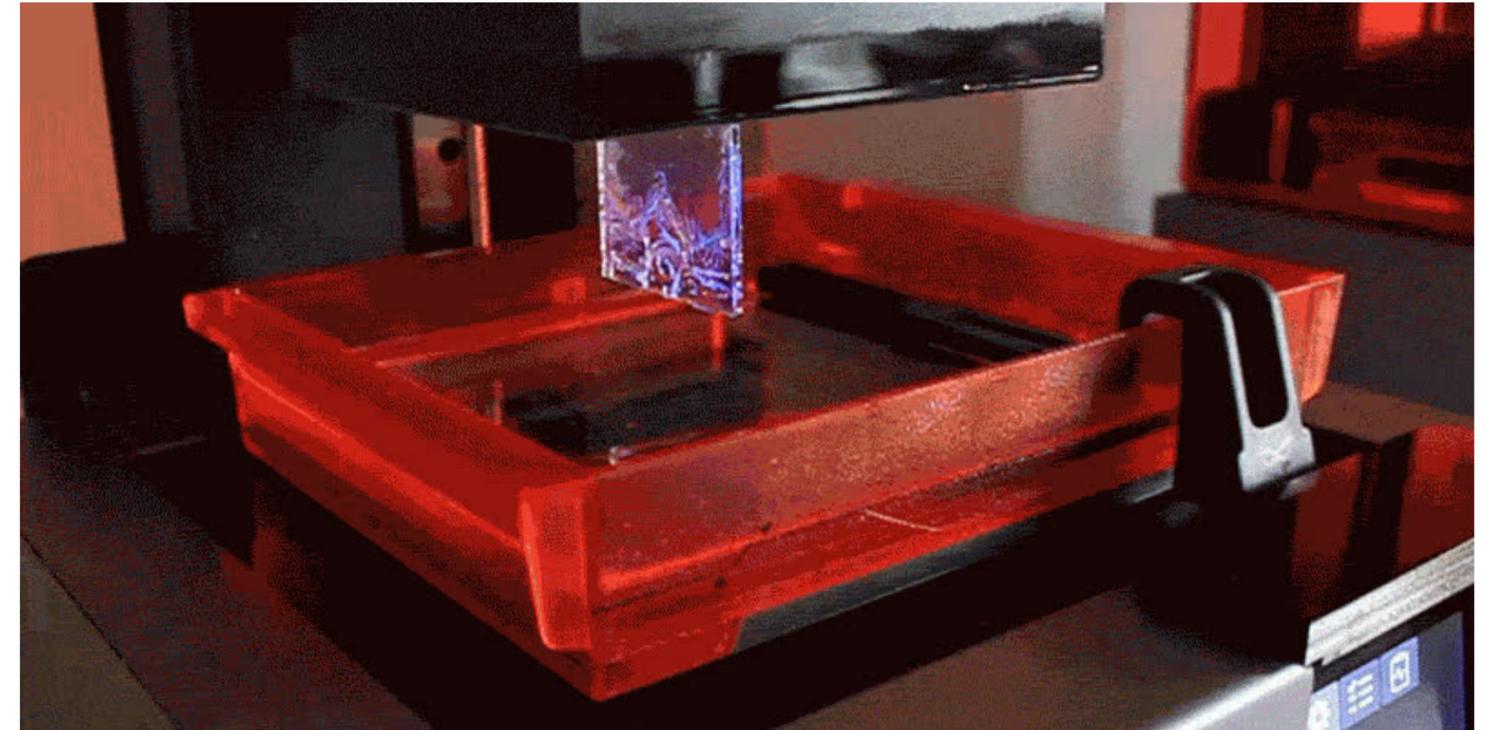
Análisis de resultados

Conclusiones

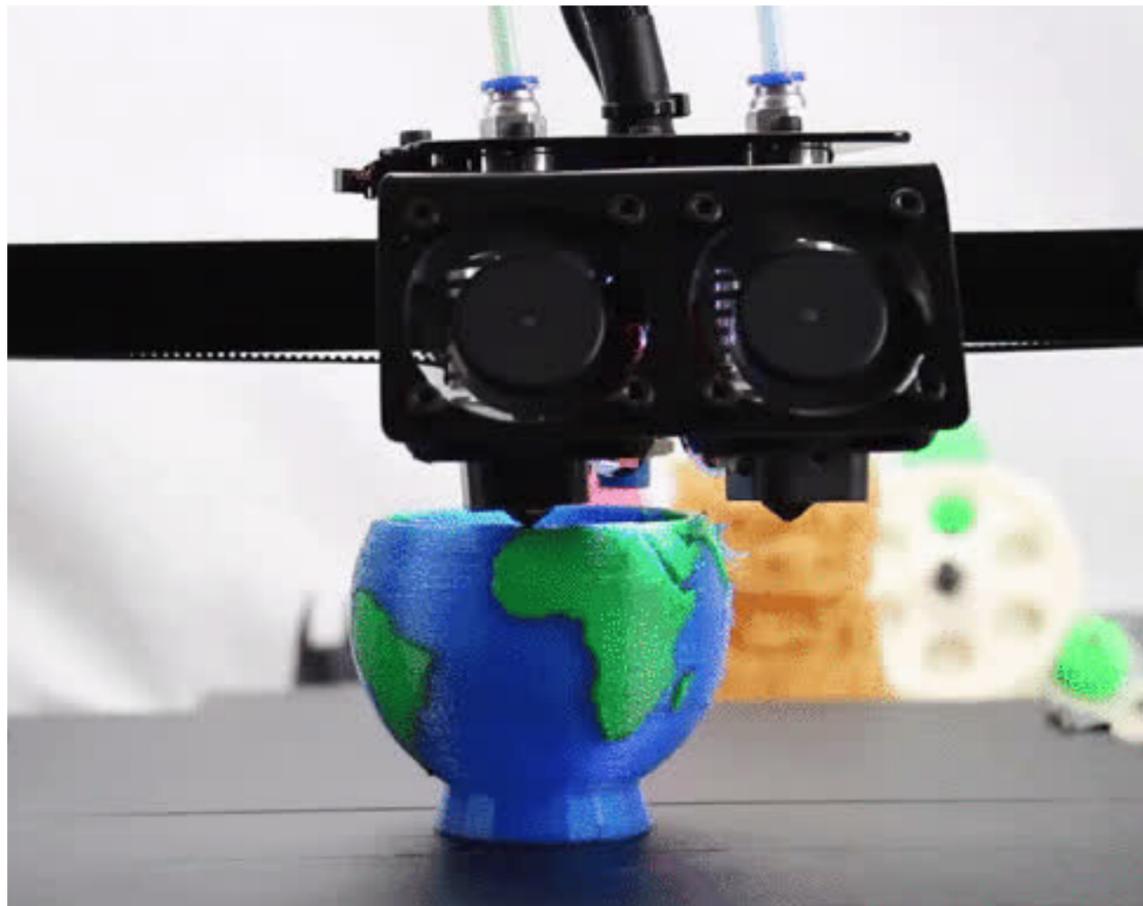
Recomendaciones

Trabajo Futuro

**ASTM 52900**



**Amplio rango de materiales**





# ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

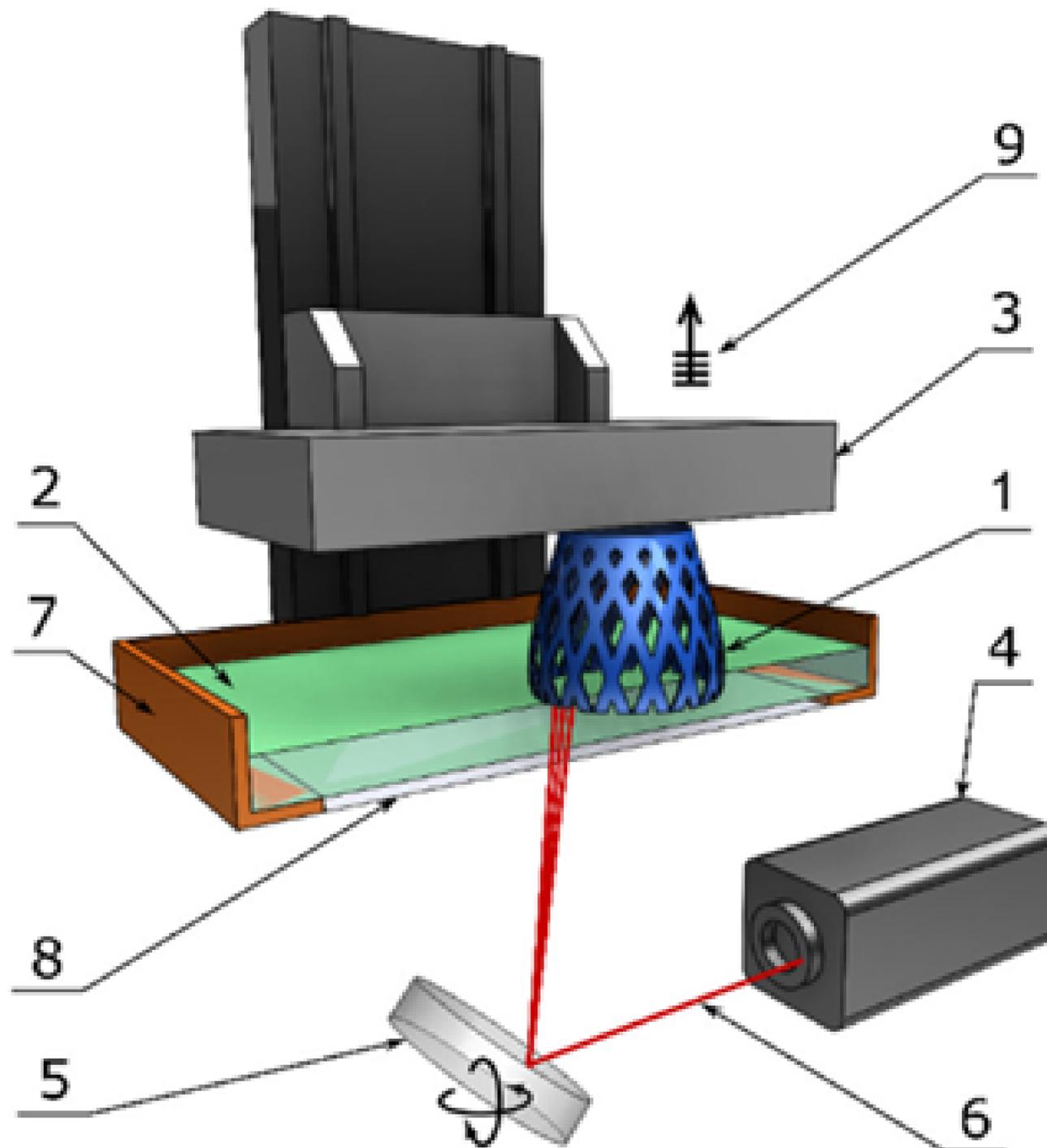
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



1. Parte impresa
2. Resina fotocurable
3. plataforma de fabricación
4. Fuente de laser UV
5. Espejo de escaneo
6. Rayo láser
7. Tanque de resina
8. Lámina
9. Dirección de fabricación



# DIAGRAMAS DE VORONOI

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

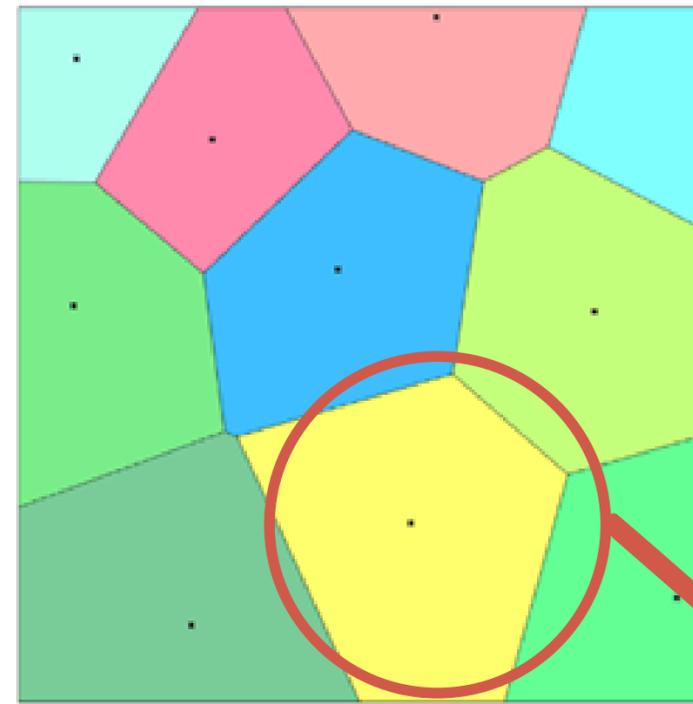
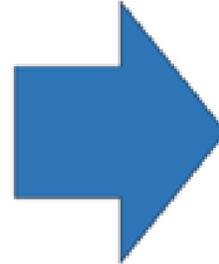
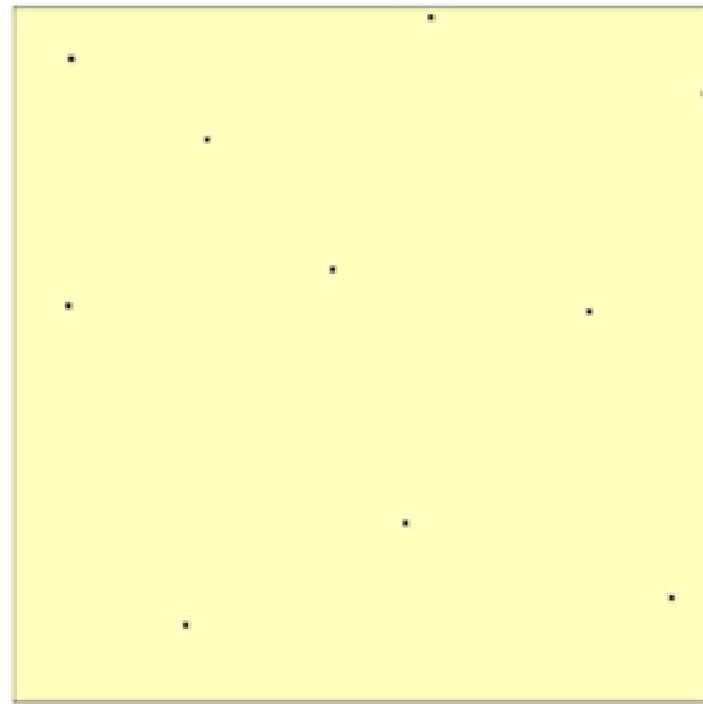
Metodología

Análisis de resultados

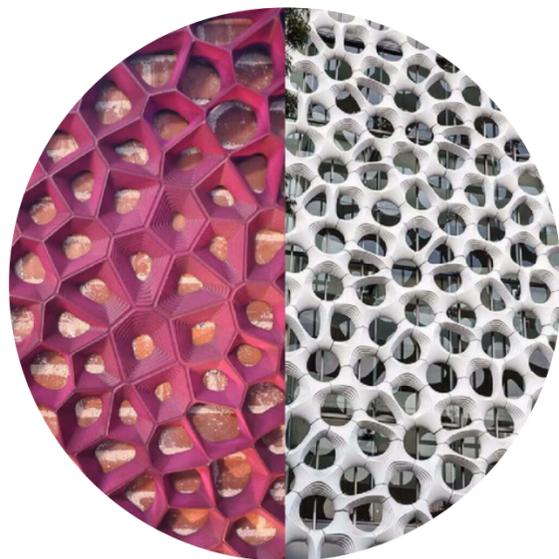
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Herath et al., 2021



**CELDA**



# PLATAFORMA DE PRODUCTOS



Rhino 7

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

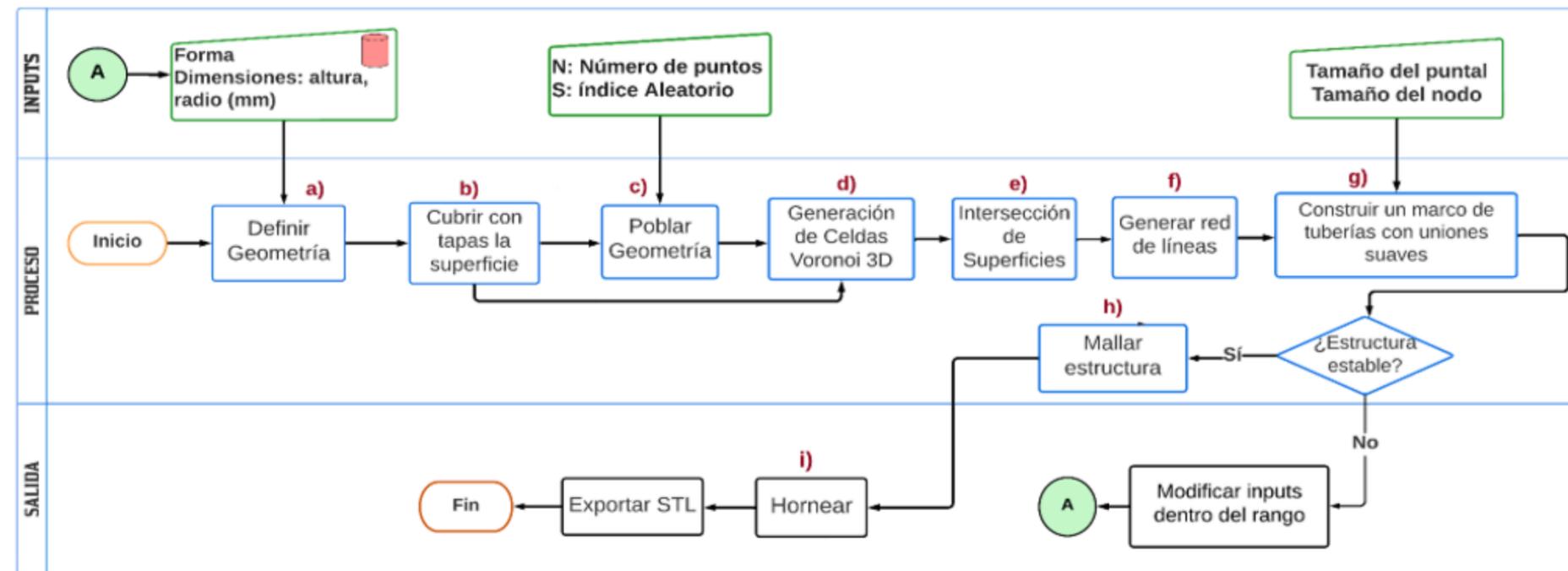
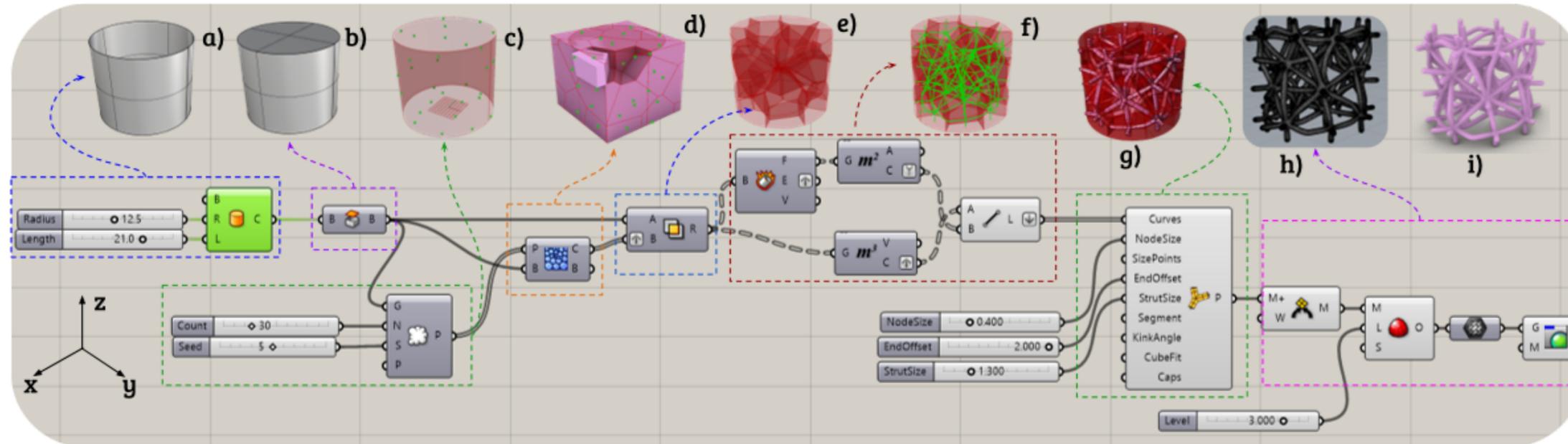
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro





# PLATAFORMA DE PRODUCTOS

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

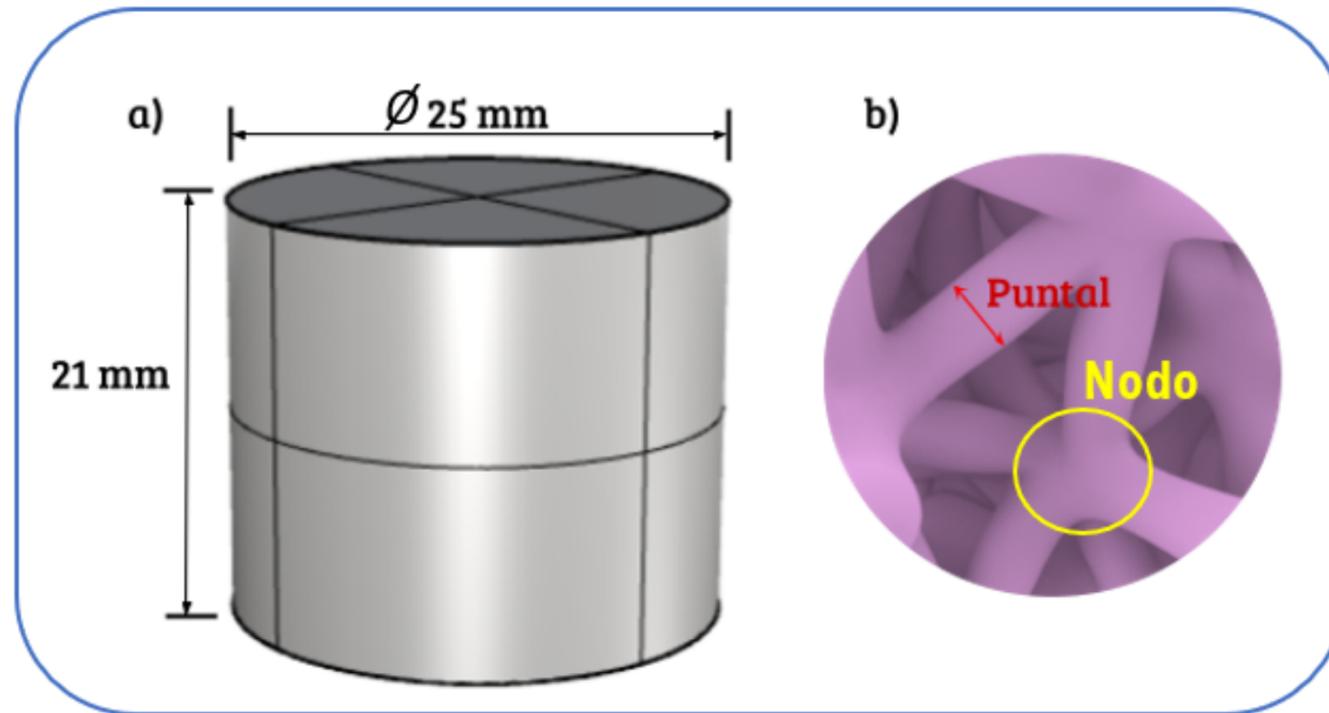
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



a) Geometría de la estructura  
b) Elementos de la estructura

Tamaño del nodo: 0.4 mm  
Diámetro del puntal: 1.30 mm

✓  
✓  
IMPRIMIBILIDAD

CORRELACIÓN ENTRE N<sup>o</sup> PUNTOS Y POROSIDAD



# PLATAFORMA DE PRODUCTOS

## ACONDICIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

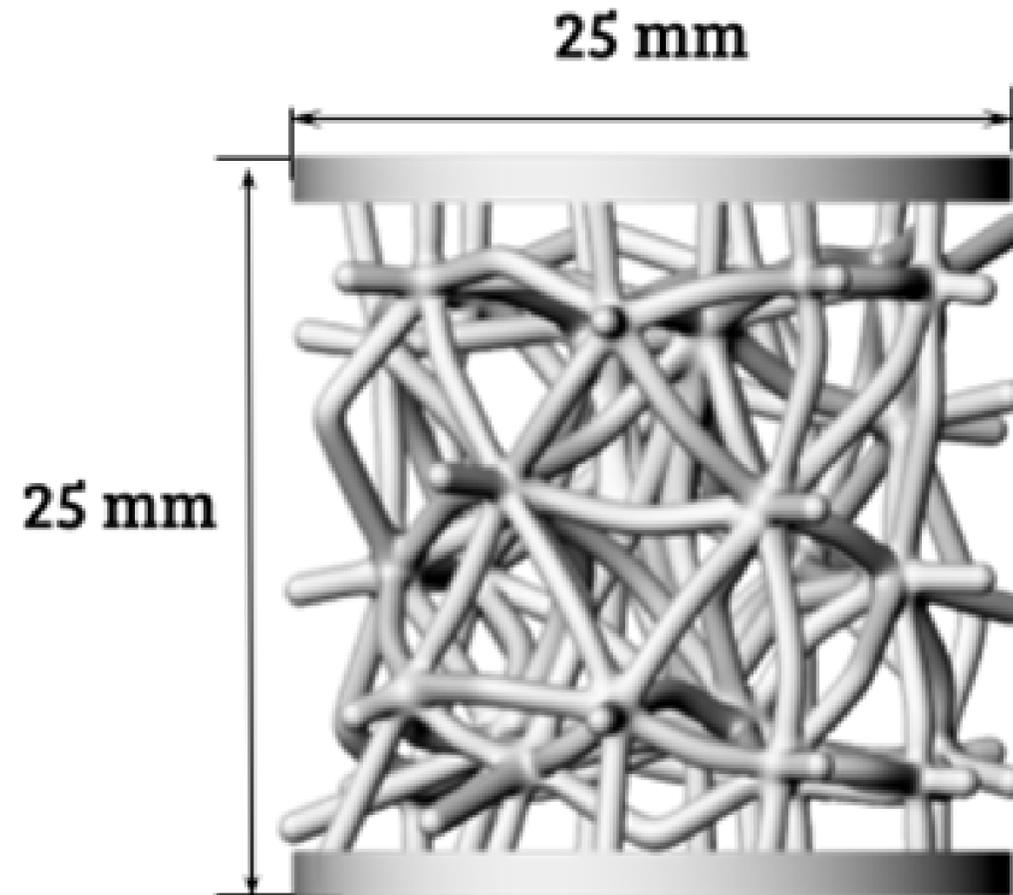
**Metodología**

Análisis de resultados

Conclusiones

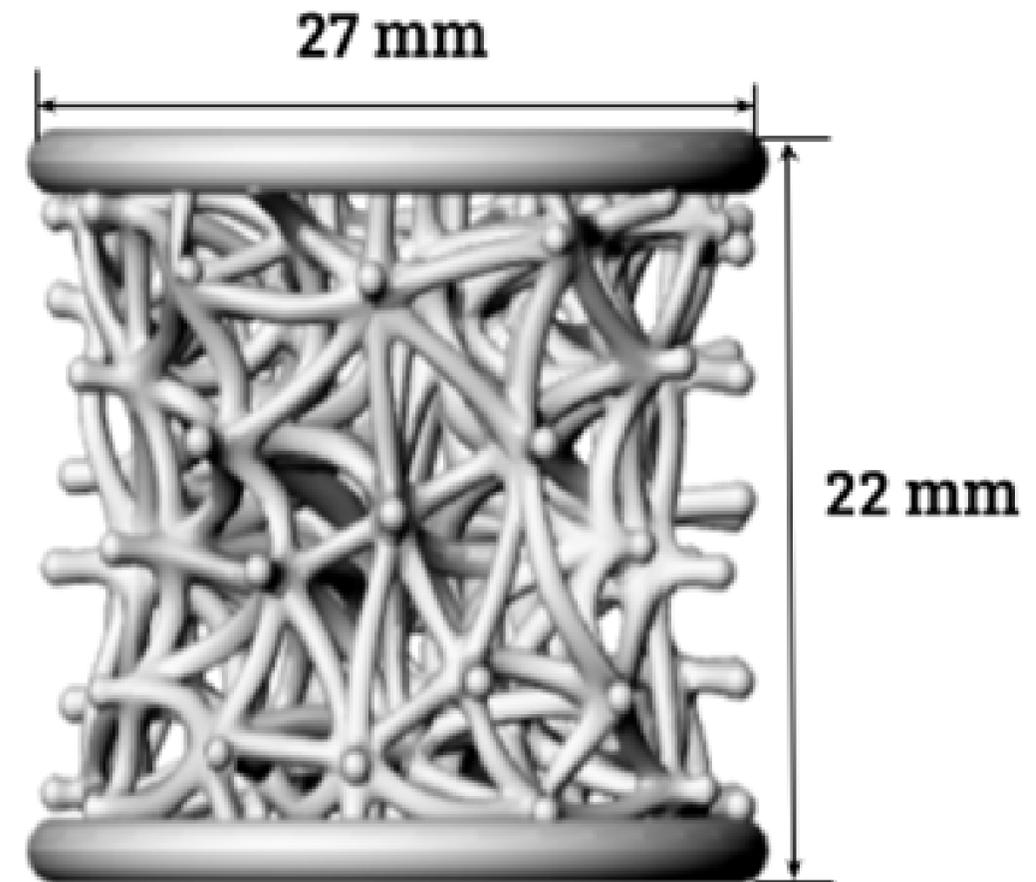
Recomendaciones

Trabajo Futuro



a)

Probetas con paredes



b)

Probetas con aros



# MANUFACTURA ADITIVA

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

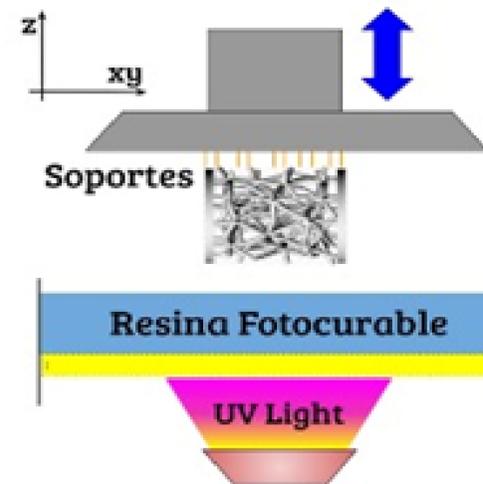
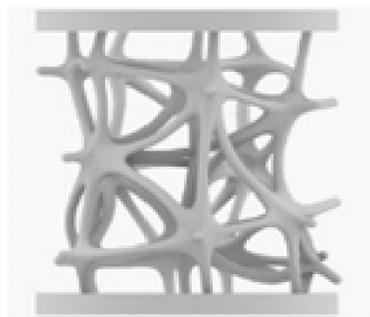
Recomendaciones

Trabajo Futuro

## PRE PROCESAMIENTO

Diseño CAD de la plataforma de productos.

1



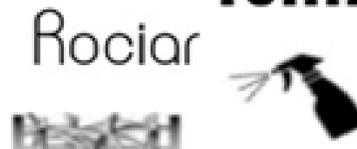
2

## IMPRESIÓN FORM 3

Estereolitografía  
Resina elastic 50A.

## POST - PROCESAMIENTO

10min



3

4

## LAVADO ULTRASÓNICO

10min



Retirar soportes

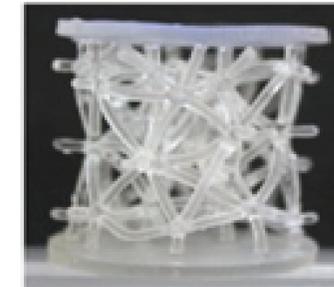
5

## POSCURADO

Temperatura= 60°C  
tiempo = 30min  
Cámara UV personalizado.

6

## RESULTADO





# MANUFACTURA ADITIVA

## ORIENTACIÓN Y UBICACIÓN DE SOPORTES

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Análisis de resultados

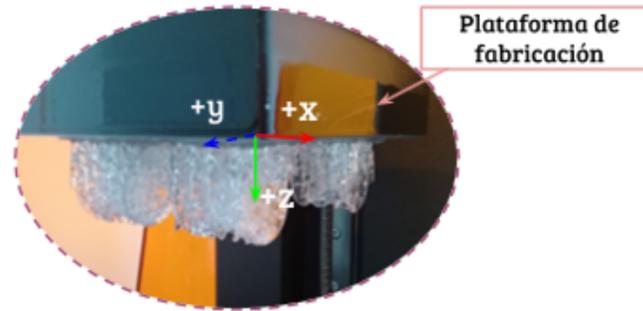
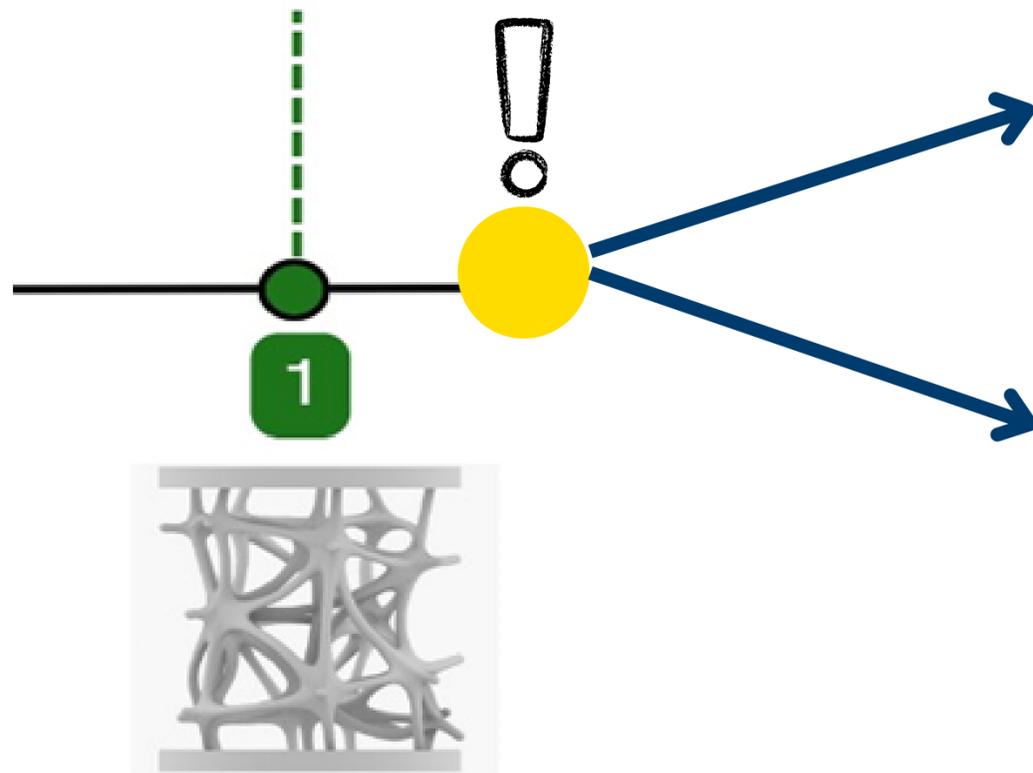
Conclusiones

Recomendaciones

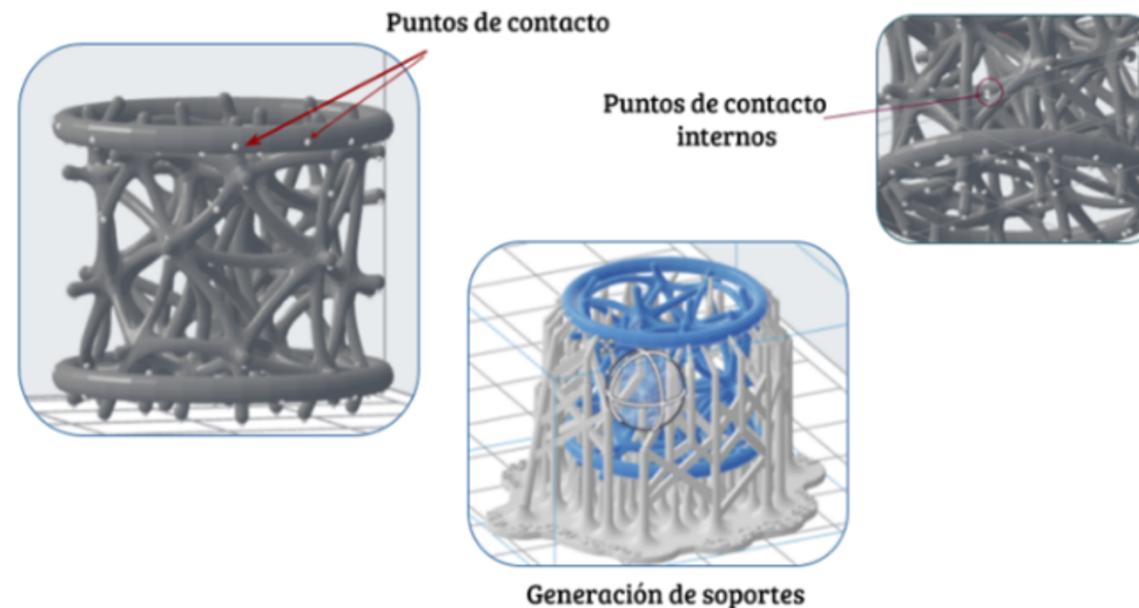
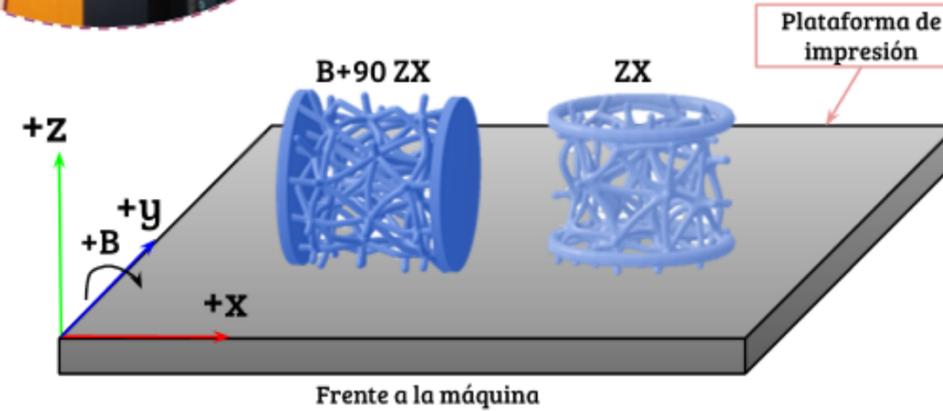
Trabajo Futuro

PRE PROCESAMIENTO

Diseño CAD de la plataforma de productos.



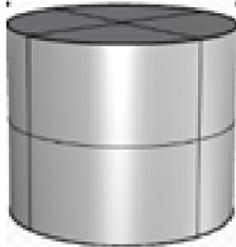
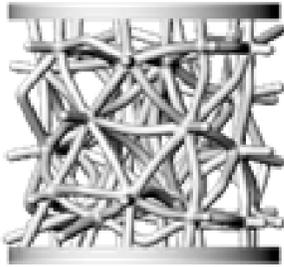
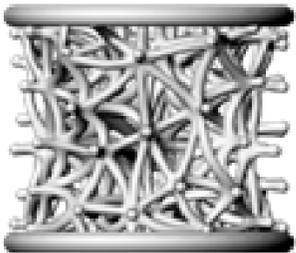
ASTM 52921





# CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS

## VALIDACIÓN DIMENSIONAL

Probeta	Imagen	Características
Sólido		Dimensiones: Ø 25 mm, altura 21 mm
Con paredes 30(S1), 65 (S2) y 100 (S3) puntos		Dimensiones: Ø 25 mm, altura 25 mm Empleadas para ensayos mecánicos
Con aros 30, 65 y 100 puntos		Dimensiones: Ø 27 mm, altura 22 mm Empleadas para ensayos de permeabilidad

**CALIBRADOR**

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



# CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS

## MÉTODO DE CÁLCULO DE POROSIDAD TEÓRICA



MESHLAB

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

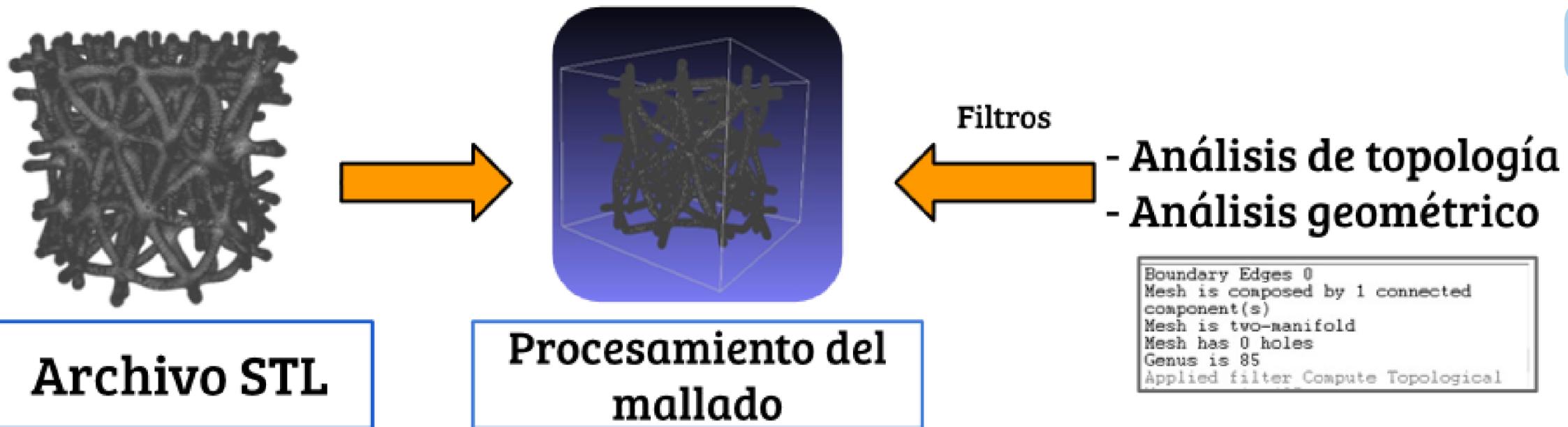
Metodología

Análisis de resultados

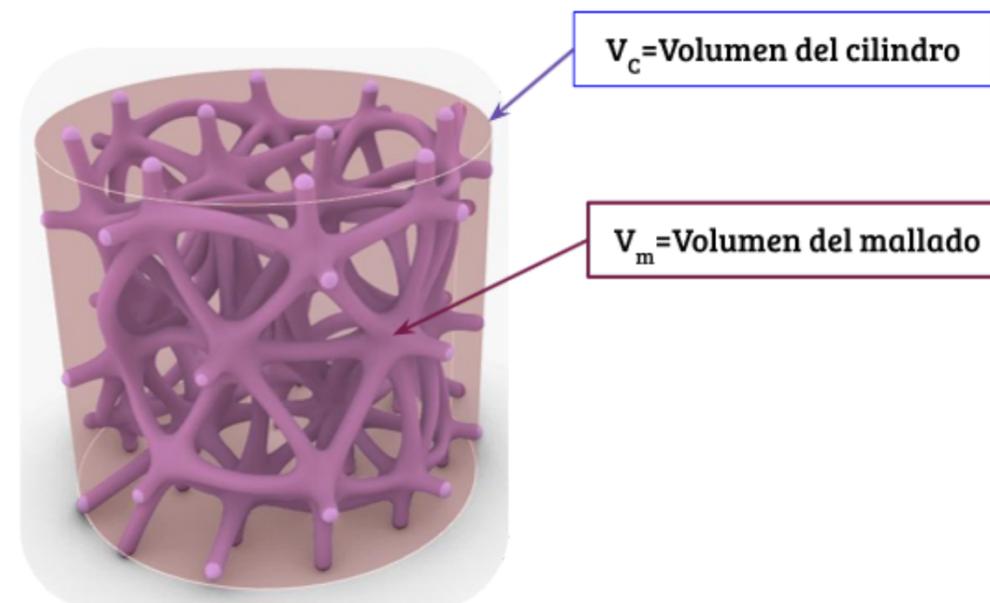
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



$$\%P = \left( 1 - \frac{V_m}{V_C} \right) * 100\%$$





# CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS

## ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

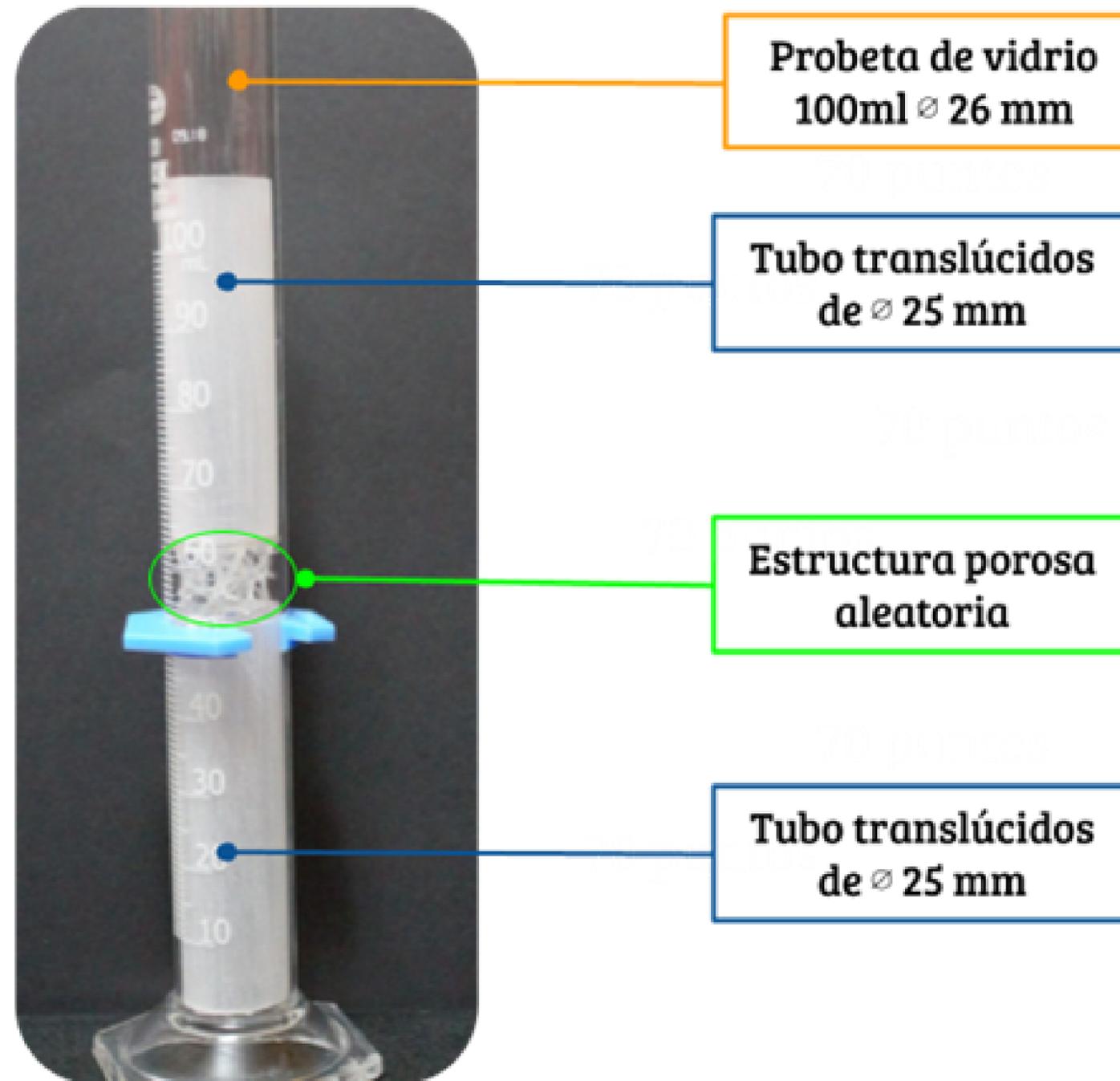
**Metodología**

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



**Fluido: Jabón líquido**

**Cronometrar**



# CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS

## ENSAYO DE COMPRESIÓN

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

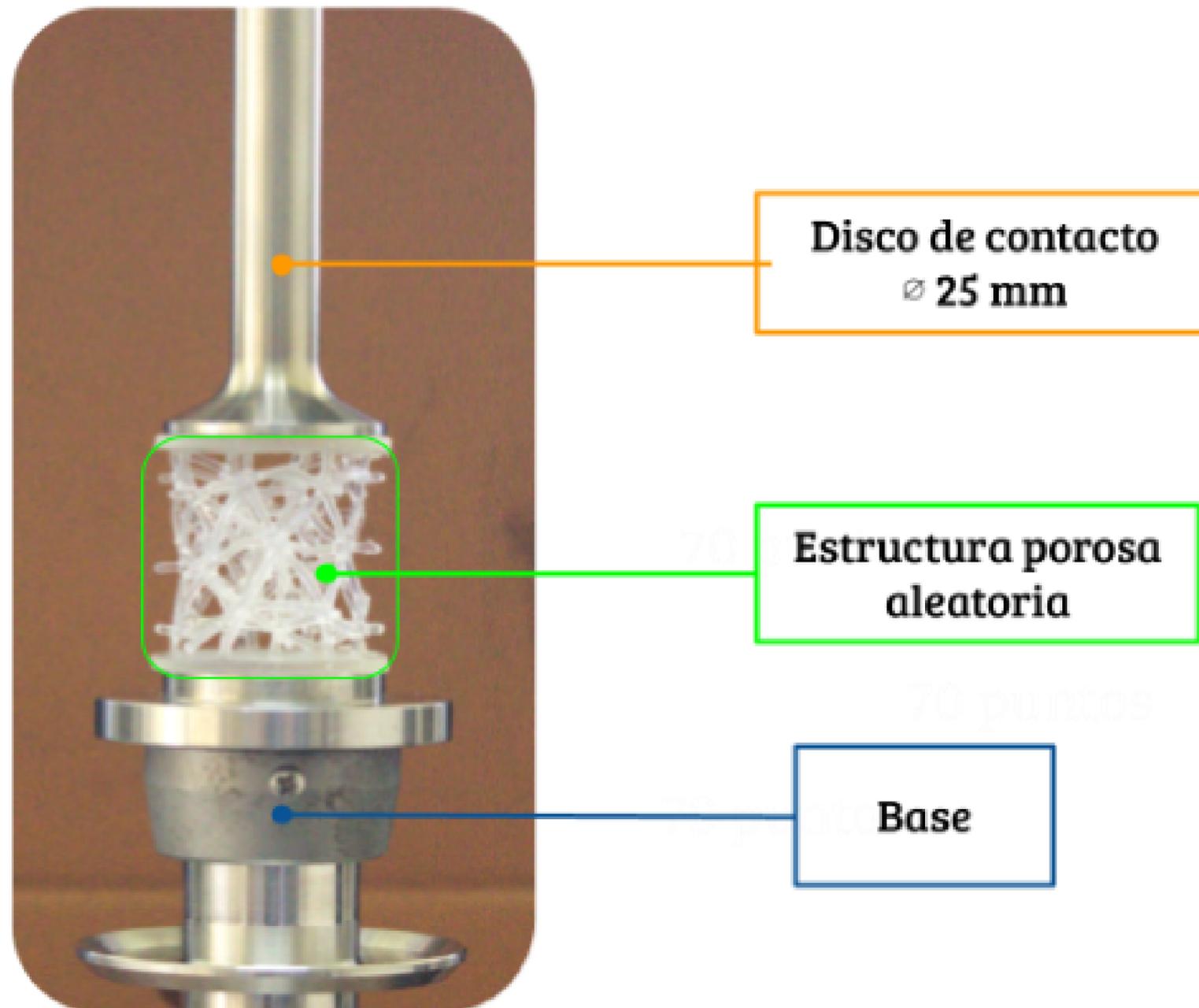
**Metodología**

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



- Celda de carga de 50 N,
- Velocidad de ensayo de  $550 \mu\text{m/s}$
- Disco de contacto de 25 mm.



# CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS

## DEFORMACIÓN POR MÉTODO DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

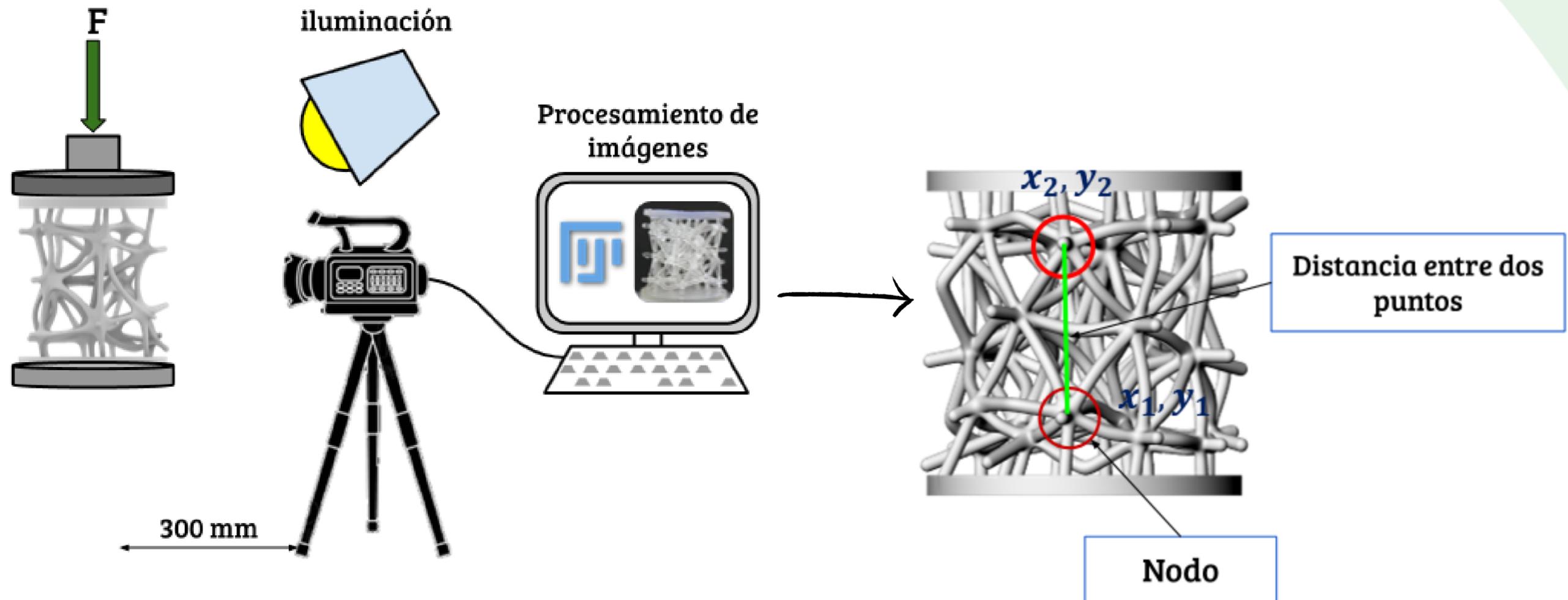
**Metodología**

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro





# VALIDACIÓN CONCEPTUAL

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

**Metodología**

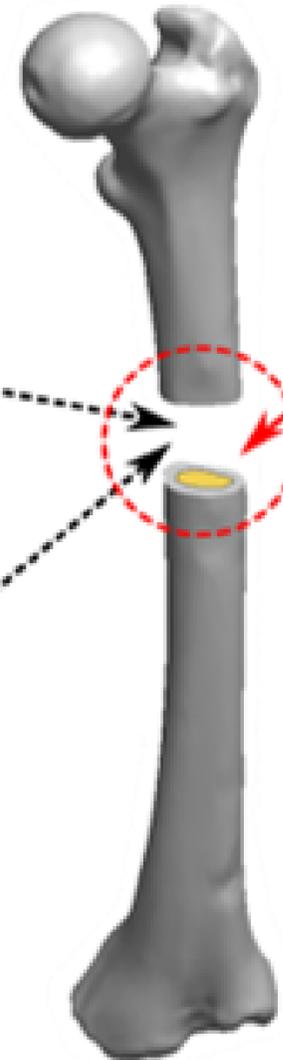
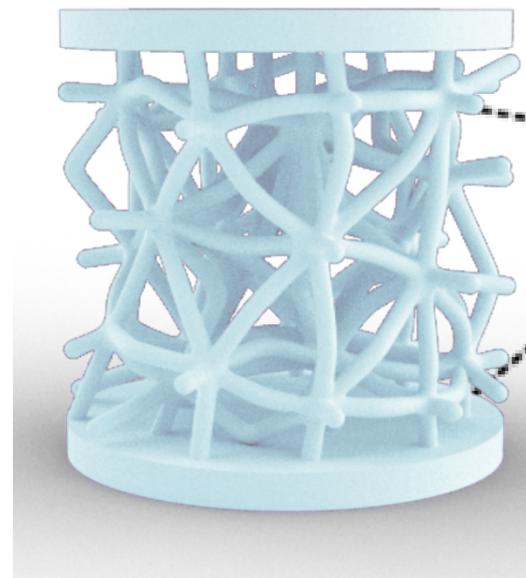
Análisis de resultados

Conclusiones

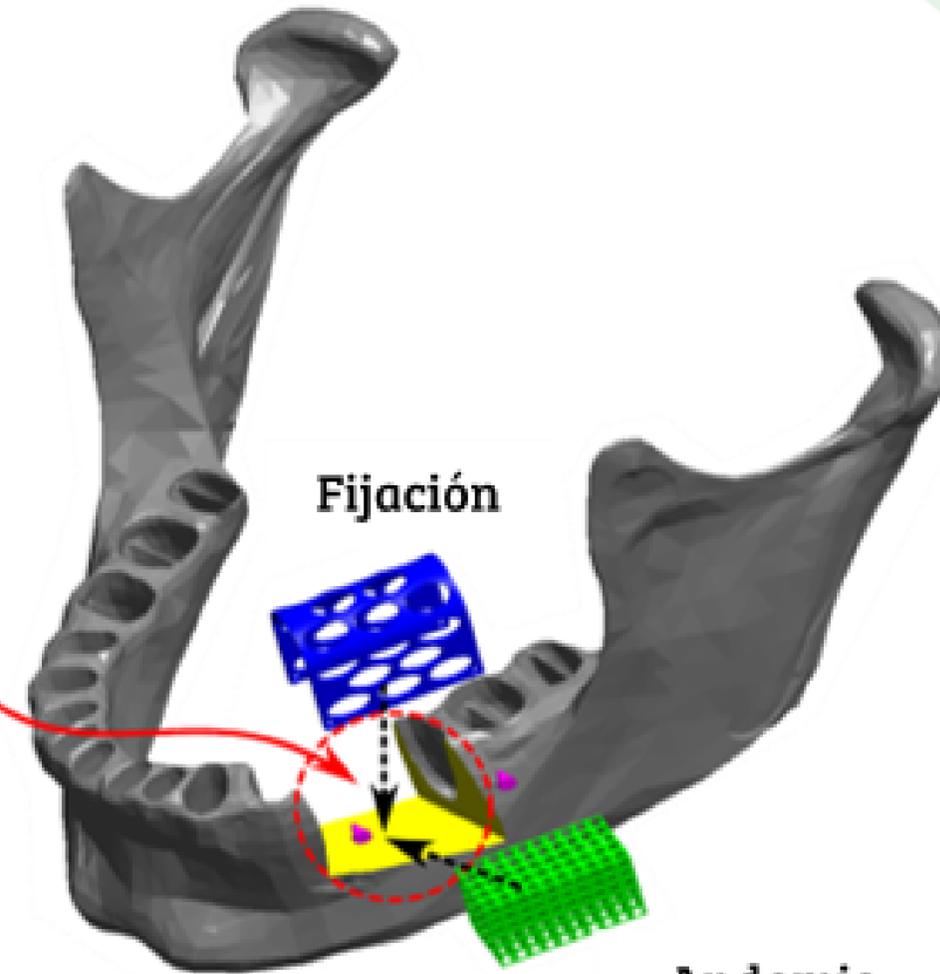
Recomendaciones

Trabajo Futuro

**ESTRUCTURA POROSA**



Defecto óseo



Andamio

- Barrido de frecuencia de 0.1 a 16 Hz
- Precarga de 5 N.

- Módulo de Almacenamiento  $E'$
- Módulo de Pérdida  $E''$



# VALIDACIÓN DIMENSIONAL

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

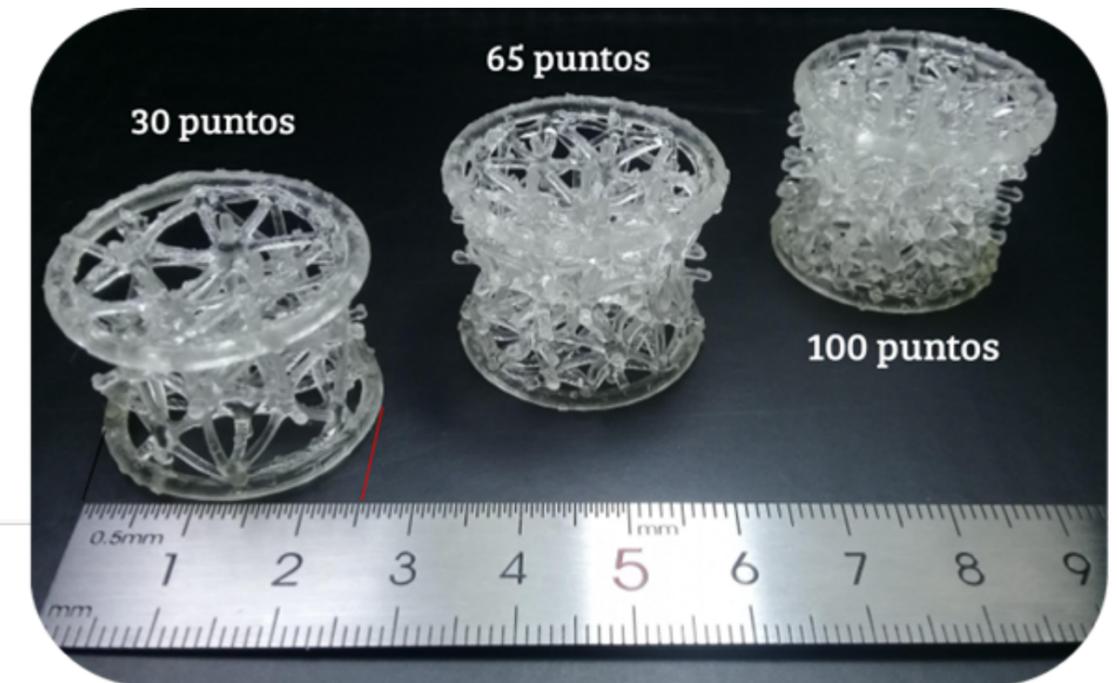
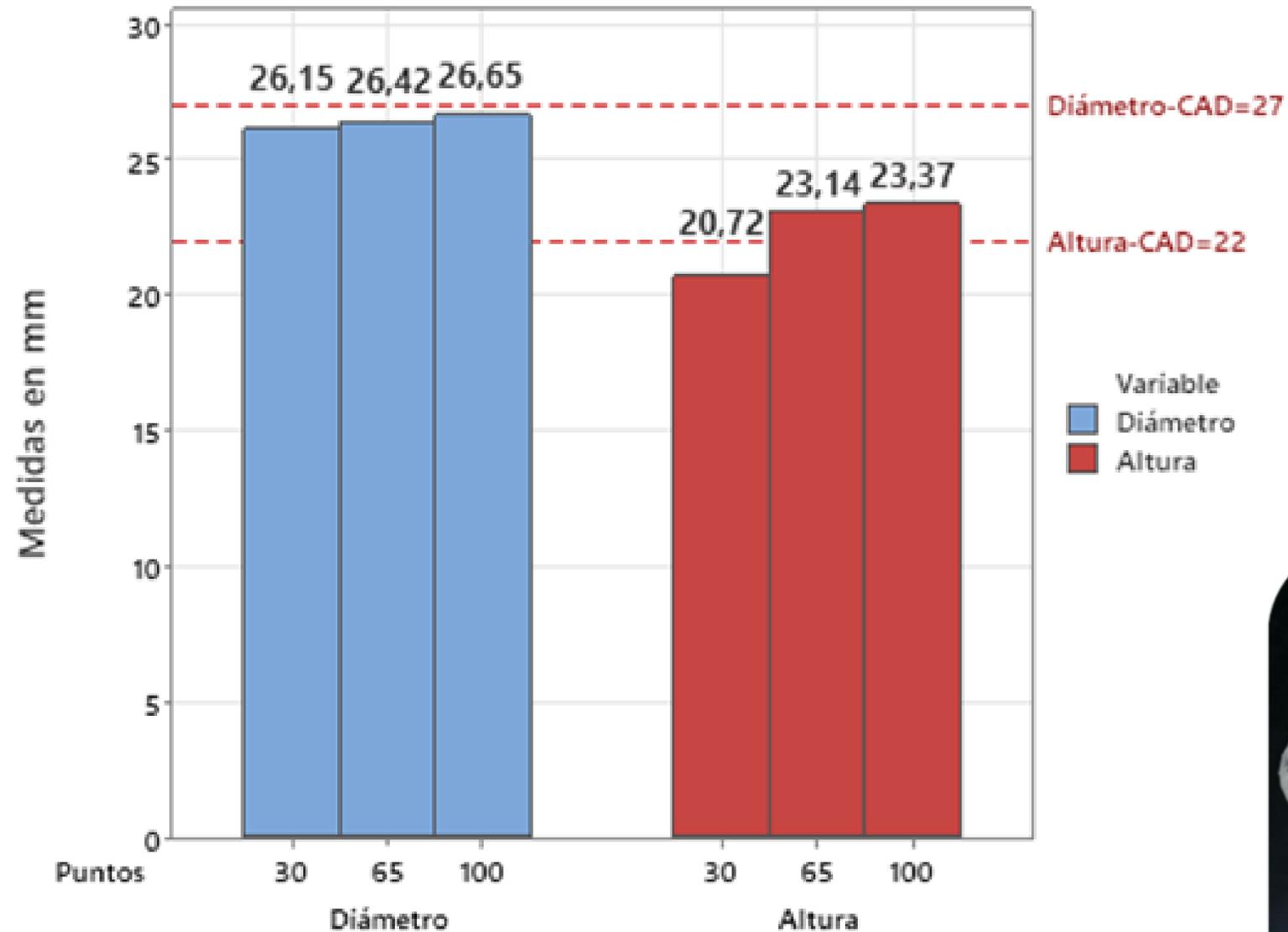
Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Gráfica de diámetro y altura con aros





# VALIDACIÓN DIMENSIONAL

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

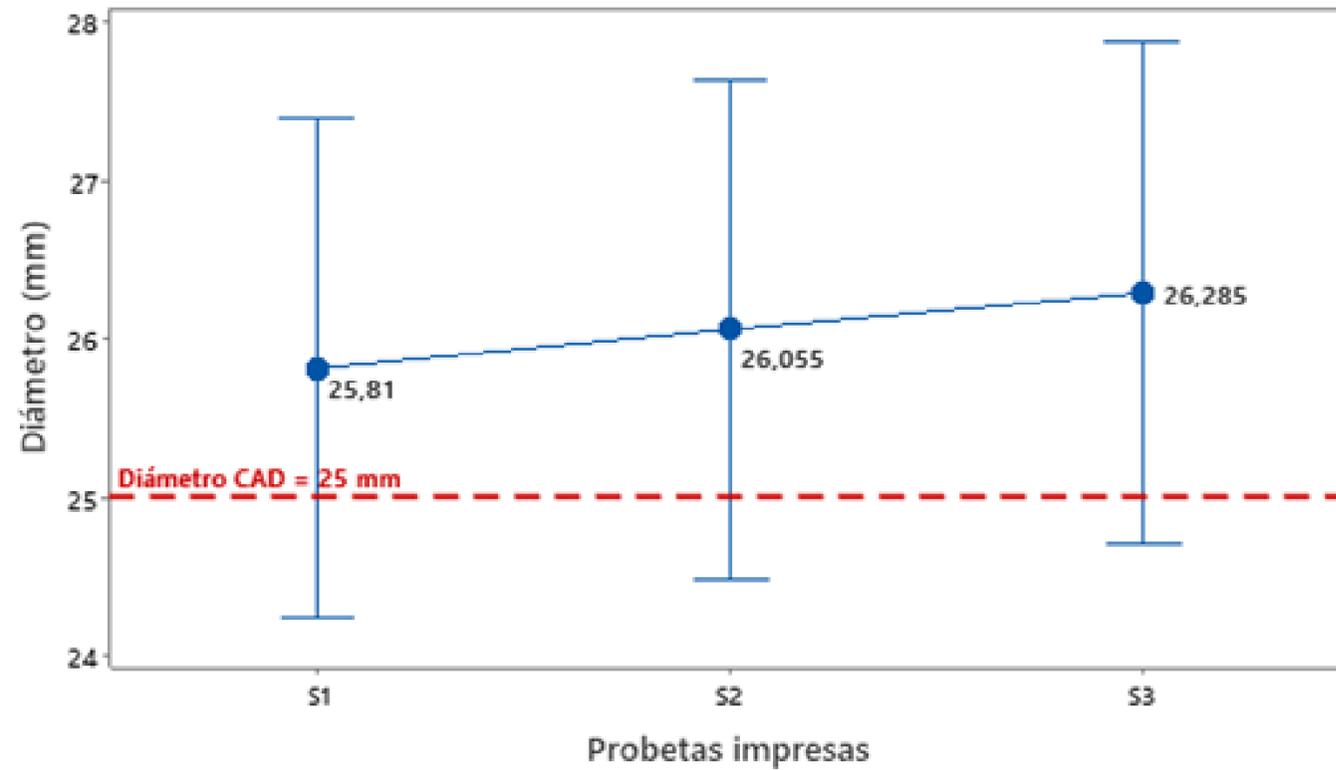
Análisis de resultados

Conclusiones

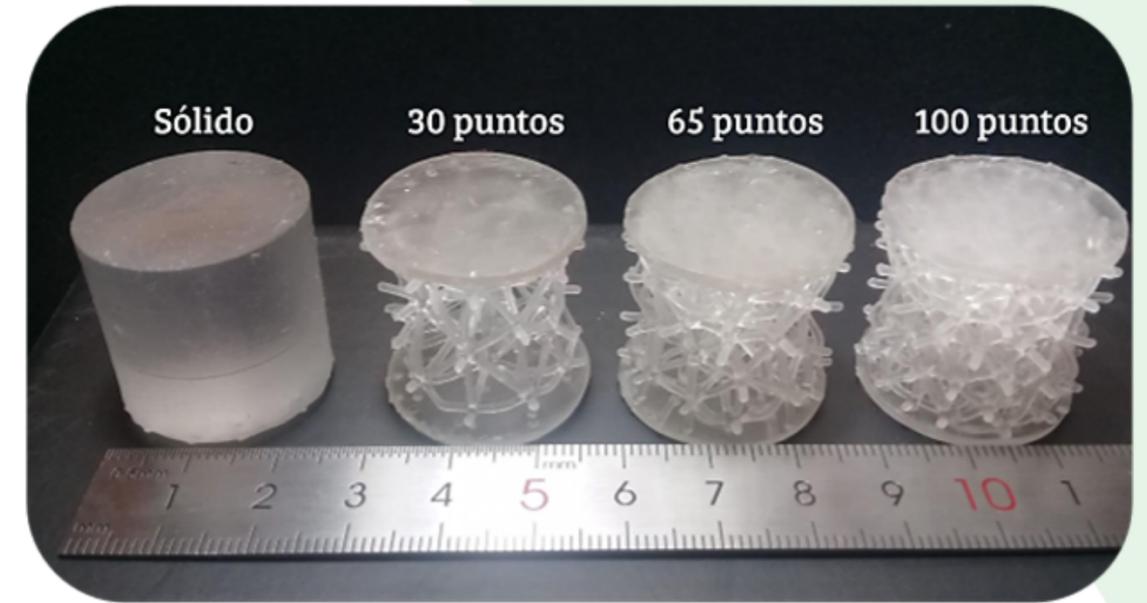
Recomendaciones

Trabajo Futuro

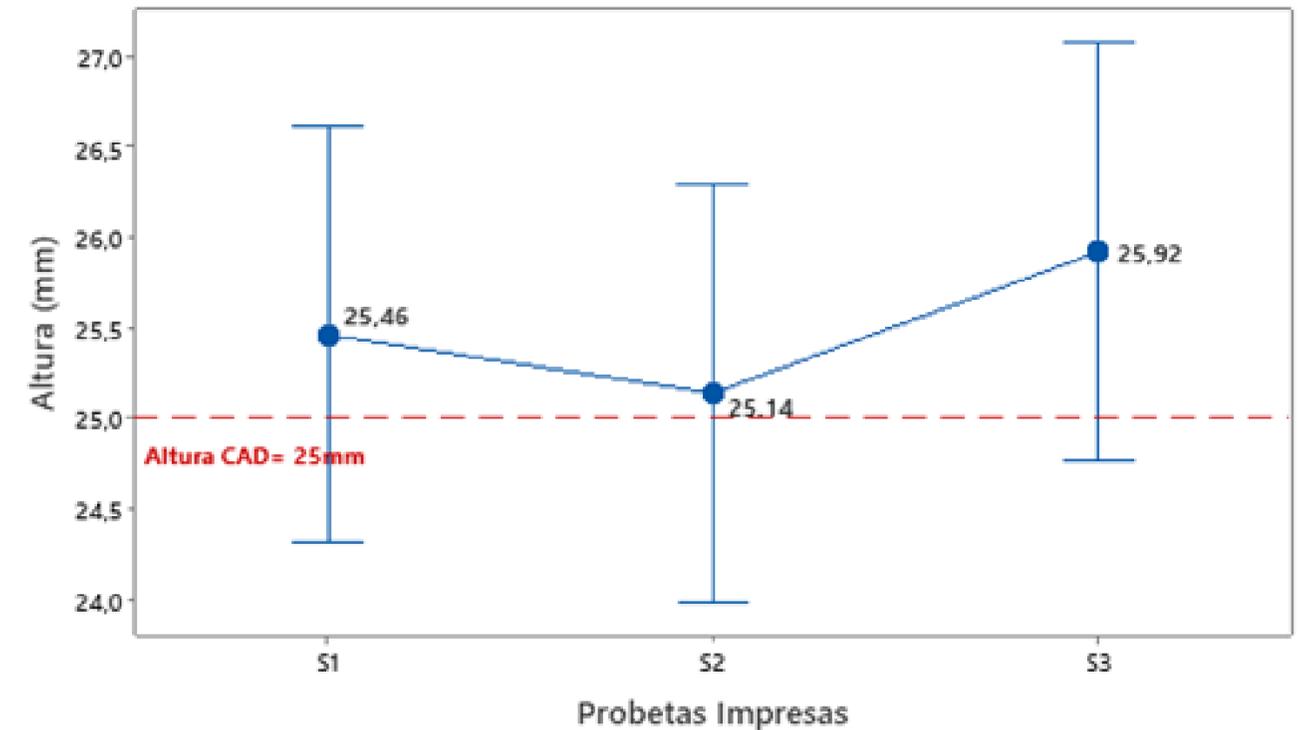
Gráfica de intervalos de DS1; DS2; ...  
95% IC para la media



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.



Gráfica de intervalos de AS1; AS2; ...  
95% IC para la media



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.



# POROSIDAD TEÓRICA

## Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

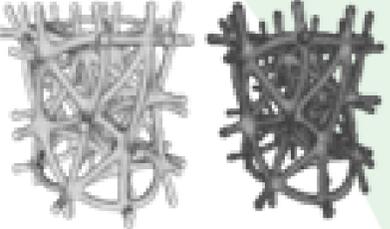
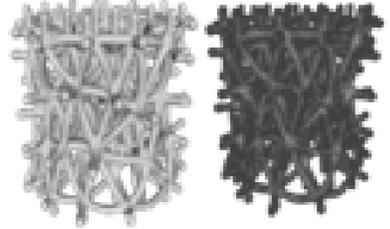
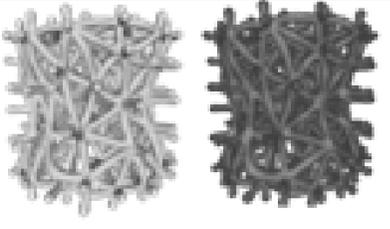
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Cod	Puntos (N)	Índice Aleatorio (S)	Volumen Mallado (mm <sup>3</sup> )	Volumen Cilindro (mm <sup>3</sup> )	Fracción Volumétrica	% Porosidad	Reporte de MeshLab	Estructura final (sólido-mallado)
S1	30	5	885.416	10308.351	0.086	91.4%	Caras: 363 584 Vértices: 181 624 Agujeros:0	
S2	65	5	1601.873	10308.351	0.155	84.5%	Caras:721 024 Vértices: 360 078 Agujeros:0	
S3	100	5	2160.175	10308.351	0.210	79.0%	Caras:1 050 496 Vértices:524 528 Agujeros:0	



# POROSIDAD TEÓRICA

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

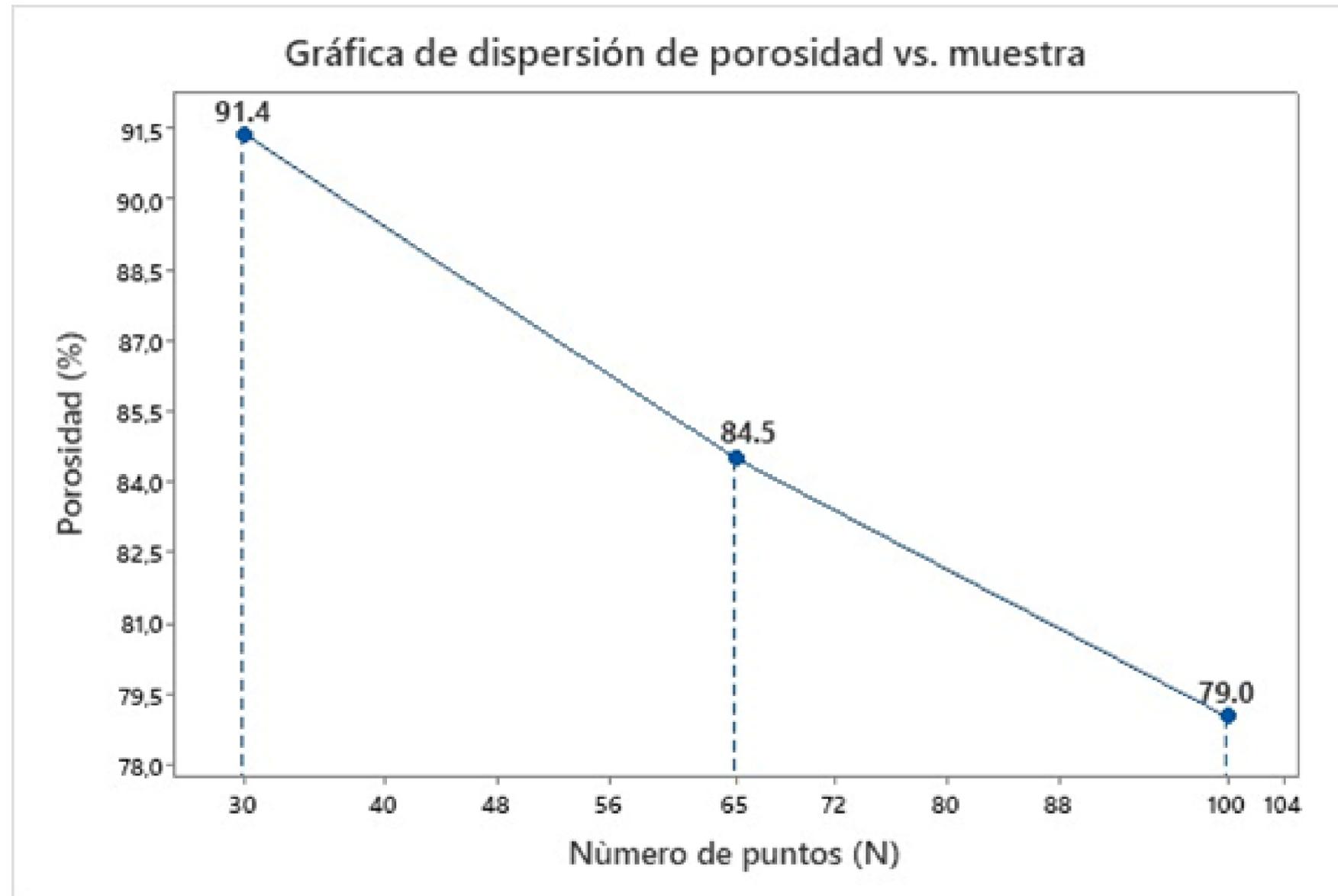
Metodología

Análisis de resultados

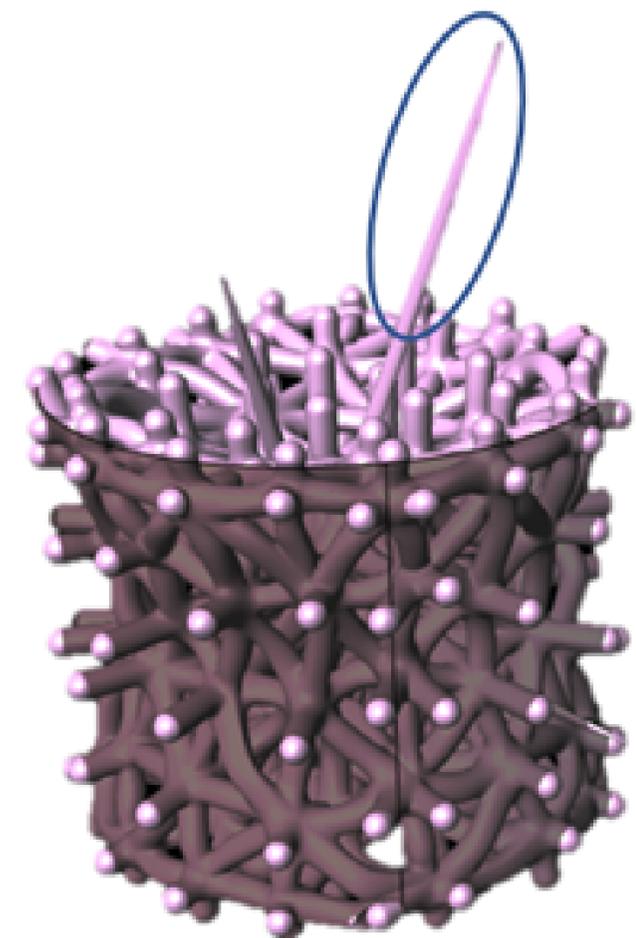
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



**INESTABILIDAD**





# ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

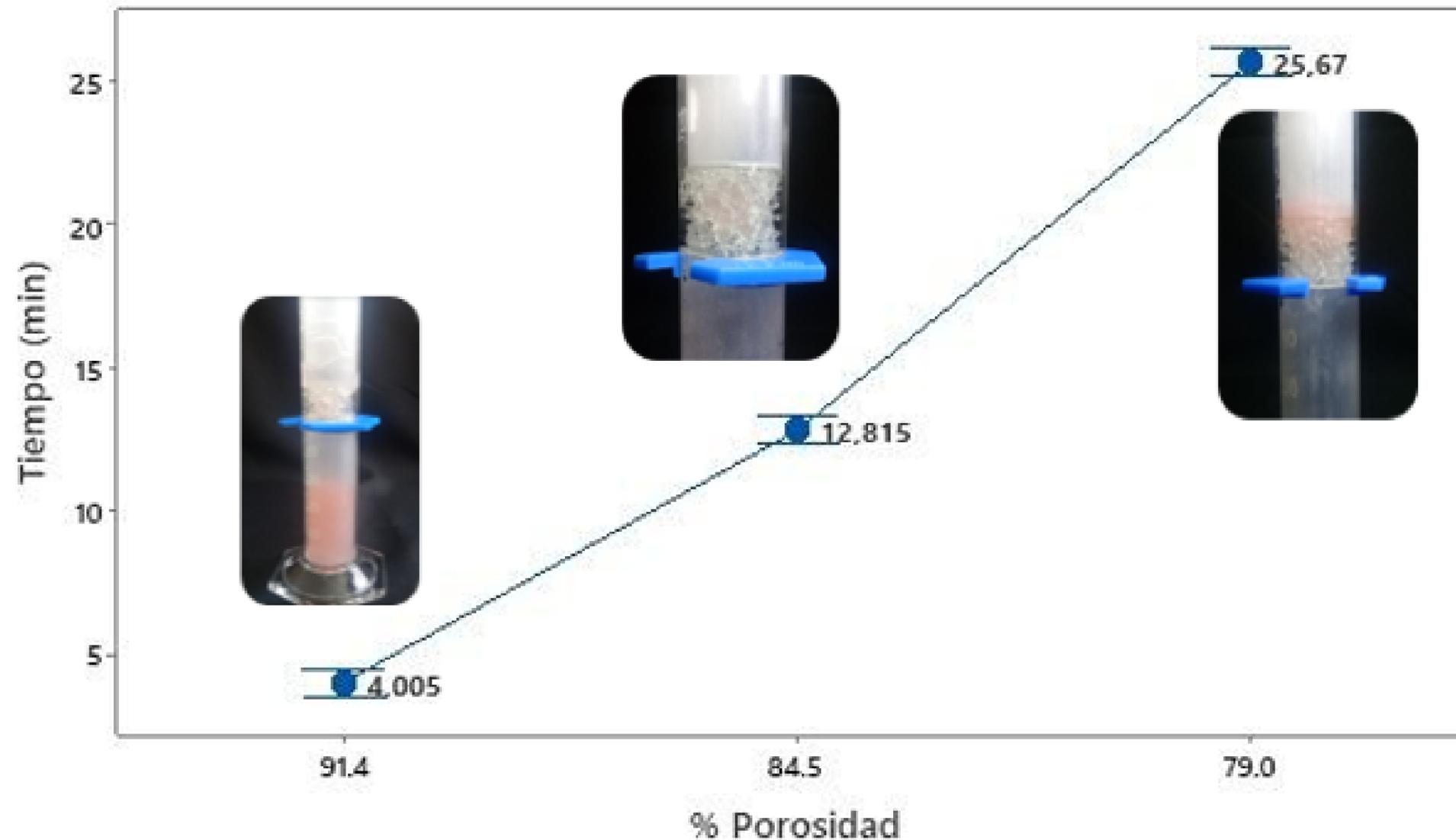
Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Gráfica de intervalos de S1; S2; ...  
95% IC para la media



*La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.*



# ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

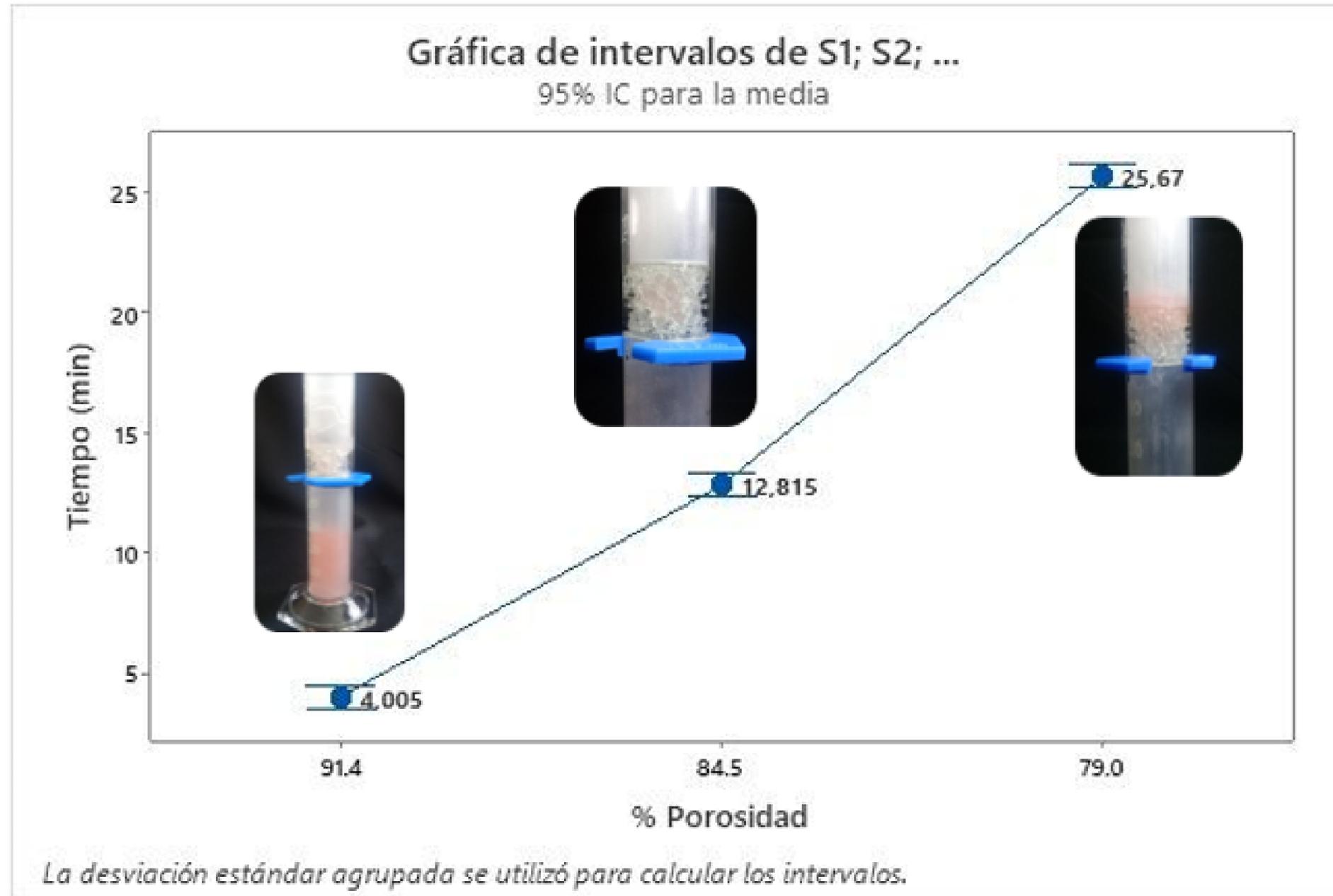
Metodología

Análisis de resultados

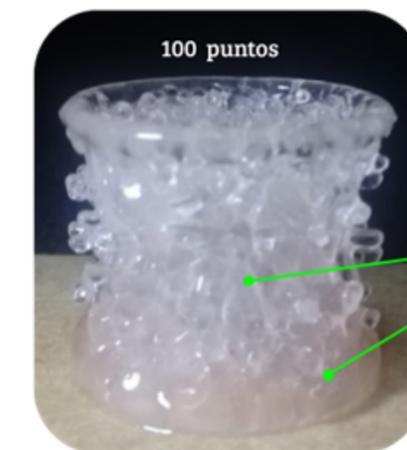
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



**MENOS PERMEABLE**



Líquido represado en el interior de la estructura



# ENSAYO DE COMPRESIÓN

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

**Análisis de resultados**

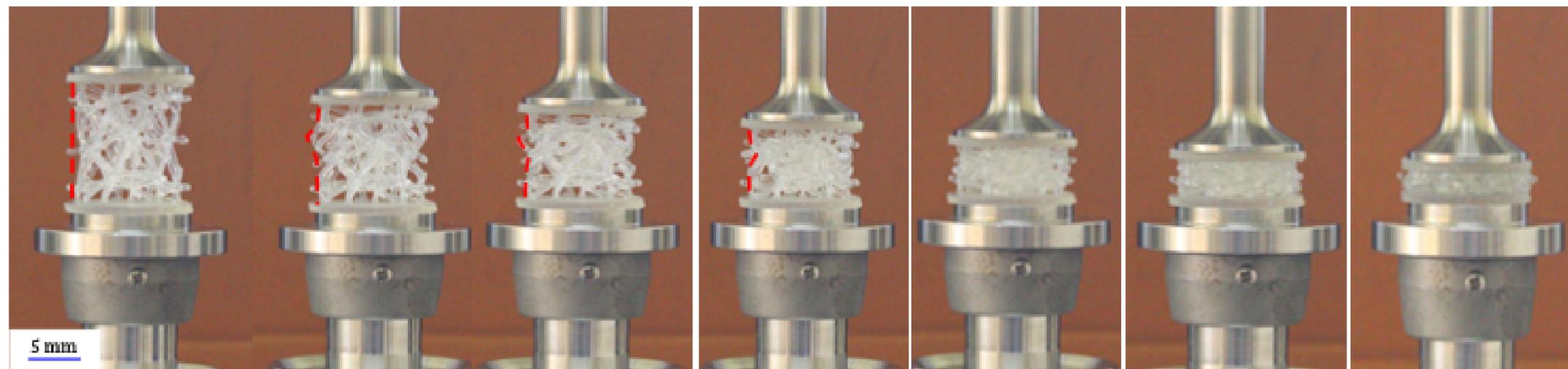
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Tipología de la estructura	Elongación %	Esfuerzo (MPa)	Módulo (MPa)	Distancia Final mm
Sólido	3.07	0.045	1.477	24.65
30 puntos	75.95	0.101	0.136	6.27
65 puntos	67.48	0.109	0.152	8.15
100 puntos	61.05	0.101	0.134	11.153

30 puntos  
%P=91.4





# ANÁLISIS 2D DE LA DEFORMACIÓN

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

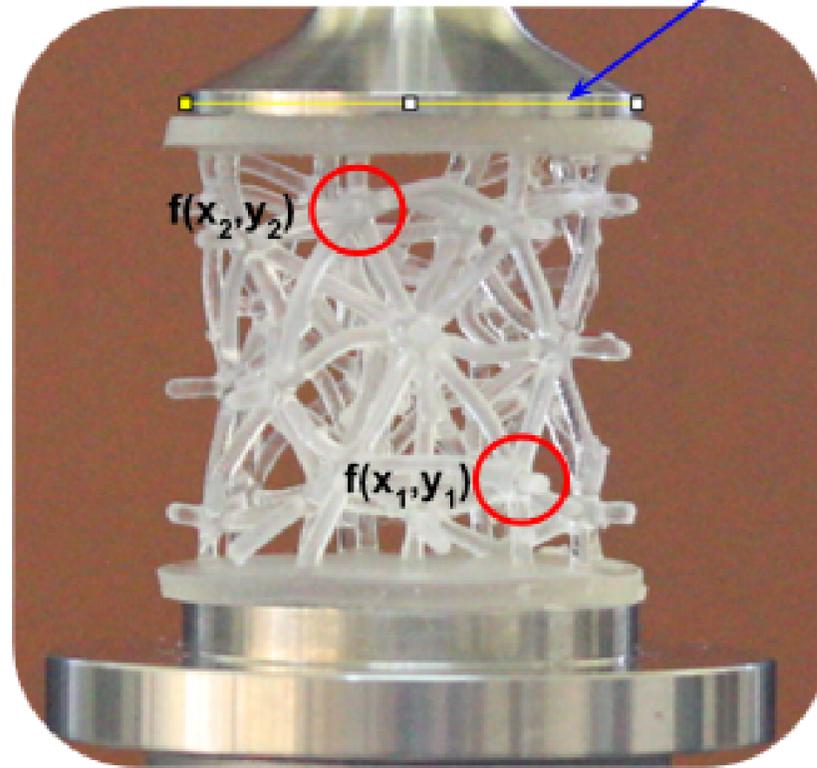
Metodología

**Análisis de resultados**

Conclusiones

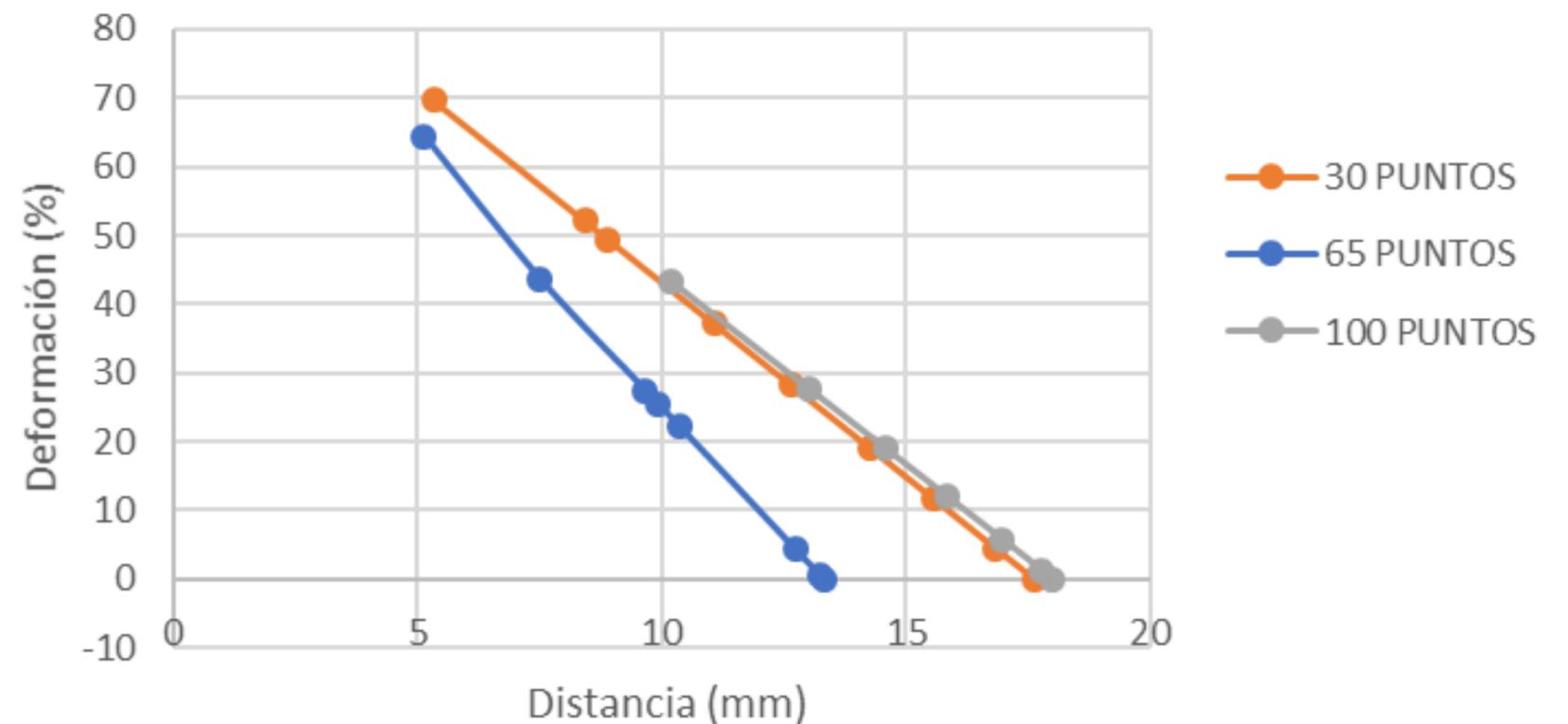
Recomendaciones

Trabajo Futuro



Distancia conocida:  
disco de contacto

Gráfica de Análisis de deformación mediante procesamiento de imágenes





# PRUEBA CONCEPTUAL

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

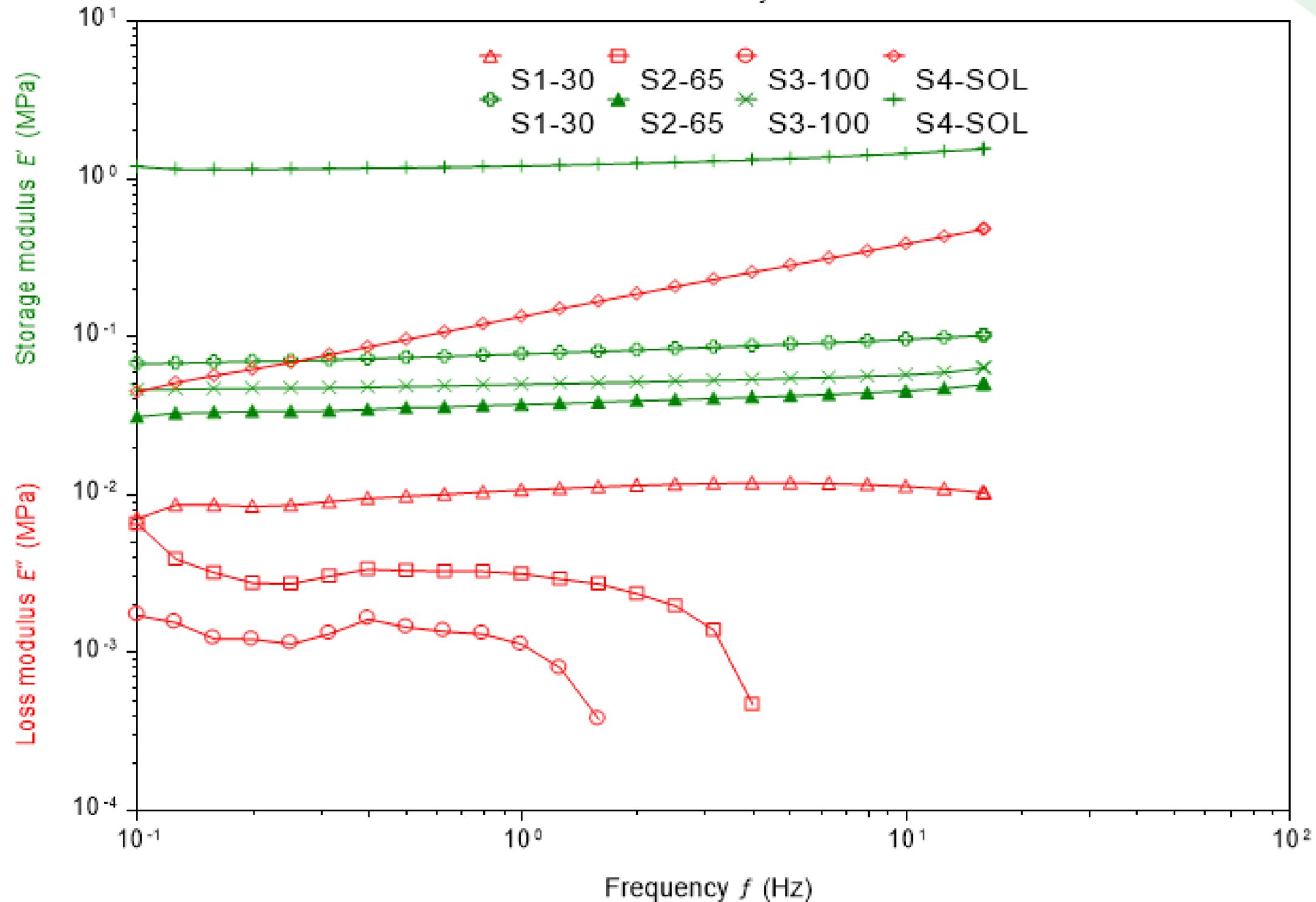
Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Módulo de Almacenamiento y Pérdida vs Frecuencia





**Antecedentes y  
Justificación**

**Alcance**

**Objetivos**

**Revisión de la  
literatura**

**Metodología**

**Análisis de  
resultados**

**Conclusiones**

**Recomendaciones**

**Trabajo Futuro**

# CONCLUSIONES

- Con relación a la fabricación de las estructuras porosas, se ha identificado claramente la metodología para obtener el prototipo final sin defectos. Se evaluaron cuidadosamente parámetros como orientación, que de acuerdo a la terminología de la ASTM 52921, es B90 ZX, la orientación adecuada para evitar acumular resina en el interior de las estructuras.
- La caracterización de este tipo de estructuras nuevas, resulta esencial porque facilita la creación de materiales avanzados y prototipos innovadores en campos como la biomedicina o robótica blanda. En esta investigación se evaluaron 3 valores de porosidad 91.4%, 84.5 % y 79%. En cuanto a la permeabilidad experimental, de igual forma se observa una relación directa, mientras más puntos se encuentren en la geometría, resulta menos permeable o impermeable.
- Con respecto al comportamiento mecánico, se observa que la estructura porosa con 91.4% de porosidad de 30 puntos sufre una deformación del 75 % con un esfuerzo de 0,101 MPa. Por otro lado, las estructuras de 65 y 100 puntos, se deformaron con el mismo esfuerzo un 67% y 61 %, respectivamente.
- Finalmente, la validación con prueba conceptual está enfocada en la ingeniería de tejidos, la herramienta de análisis es DMA, los resultados muestran que las estructuras diseñadas y fabricadas requieren de menor energía para deformarse sin perder su elasticidad, es decir su comportamiento predominante es elástico. De forma general, la estructura con 30 puntos es más elástica seguida por la de 100 puntos.



# RECOMENDACIONES

**Antecedentes y Justificación**

**Alcance**

**Objetivos**

**Revisión de la literatura**

**Metodología**

**Análisis de resultados**

**Conclusiones**

**Recomendaciones**

**Trabajo Futuro**

- Previo a la realización de cualquier impresión en resina, se recomienda realizar un estudio del comportamiento mecánico de material para bajo normas ASTM. De esta forma se tiene en contexto el comportamiento del material y que consideraciones adicionales tomar previo a imprimir aplicaciones puntuales.
- Durante la etapa de post-procesamiento, tomar en cuenta que las resinas son fotocurables, de modo que una exposición prolongada al medio ambiente o luz solar contribuye con una incorrecta etapa de curación.
- Para realizar ensayos mecánicos, establecer un protocolo de pruebas. De esta forma se pueden abordar todos los aspectos desde confiabilidad de la máquina de ensayos hasta el acondicionamiento de probetas para el ensayo planificado.
- Con respecto a la validación conceptual, se puede complementar el estudio de las estructuras porosas con un DMA en fluidos o solventes que simulen el plasma de la sangre y estudiar sus propiedades para futuras aplicaciones a nivel de tejido en seres humanos



# TRABAJO FUTURO

Es posible replicar el estudio y metodología desarrollada en este trabajo, en un material biocompatible como BioMed que permita realizar pruebas normalizadas in situ para reemplazo de tejido tisular dañado.

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

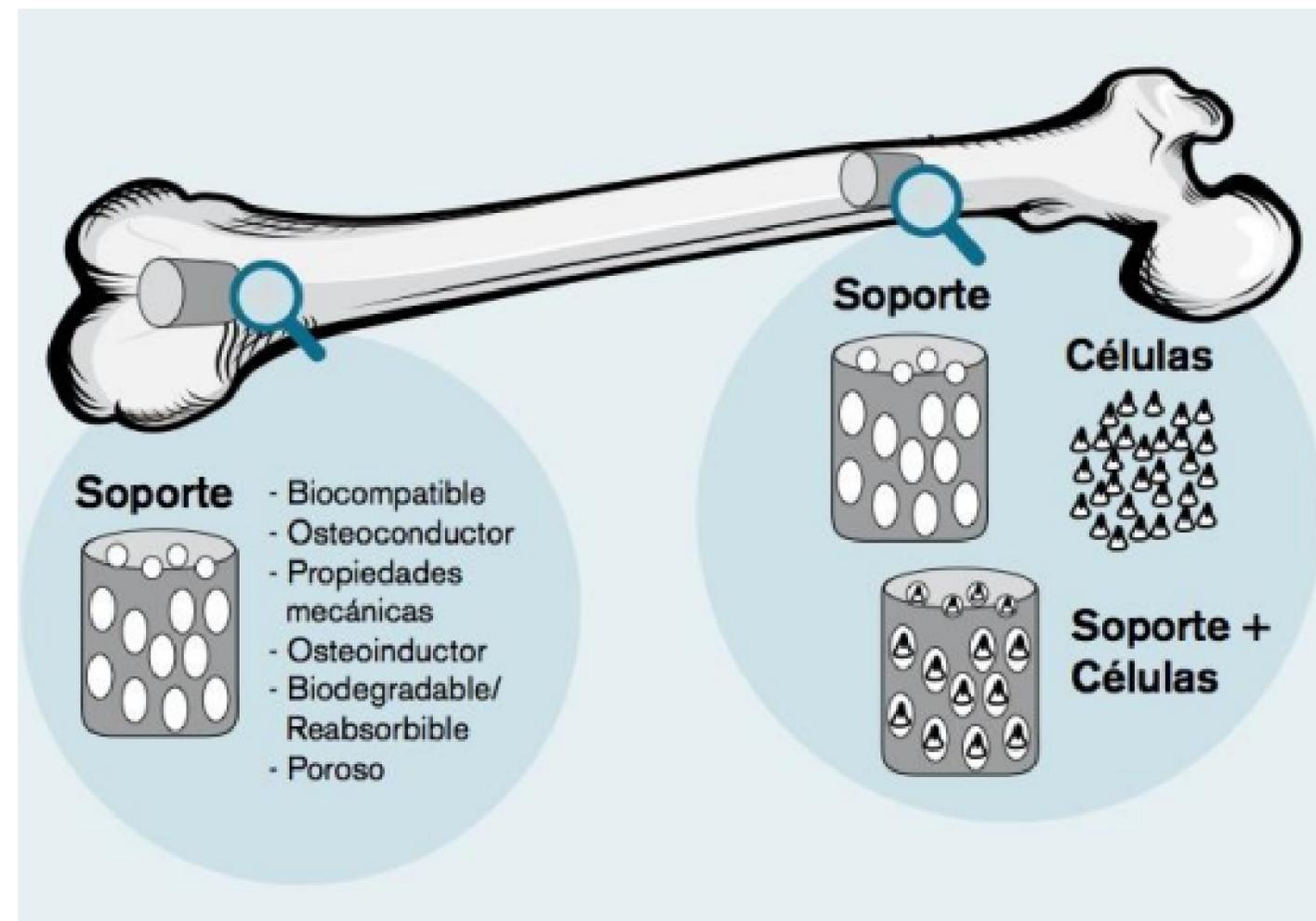
Metodología

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



María Vallet, 2012



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**