



Análisis de flujo de fluidos no newtonianos en cabezales de impresión 3D

Roberto Hernández Aguirresarobe

Ricardo Torres Camara

31 de Julio de 2020



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es



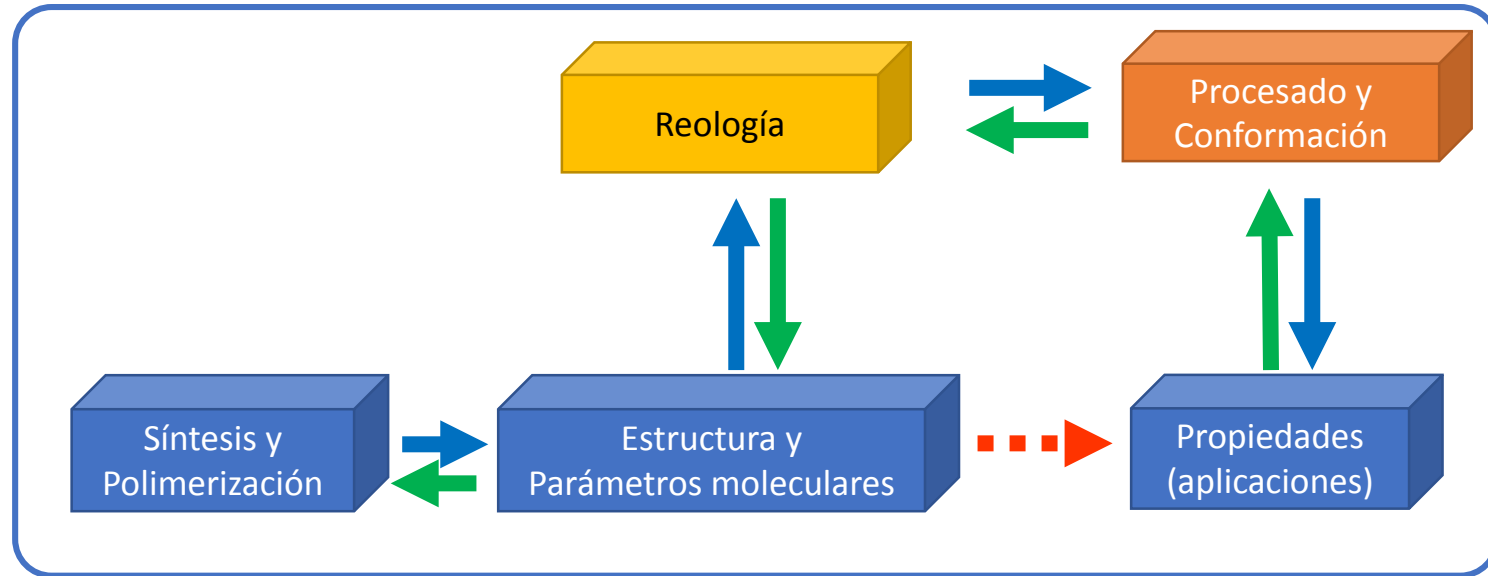
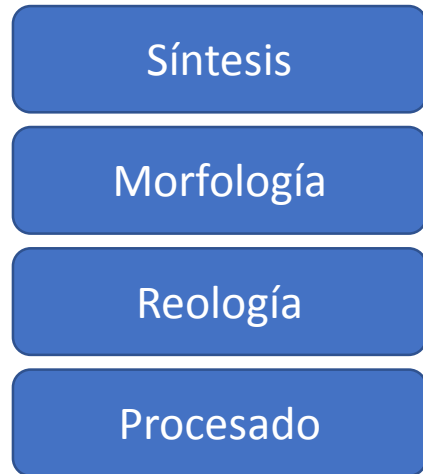
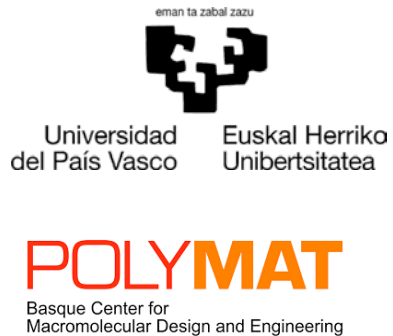
Contenido

- Introducción
- Interés del proyecto y Objetivo
- Estudio de materiales no newtonianos a través de un capilar
- Modelización de un cabezal de impresión 3D
- Posibilidades y limitaciones del modelo
- Conclusiones
- Trabajo futuro

Introducción

Antecedentes del trabajo

Dedicación: Desarrollo de materiales poliméricos



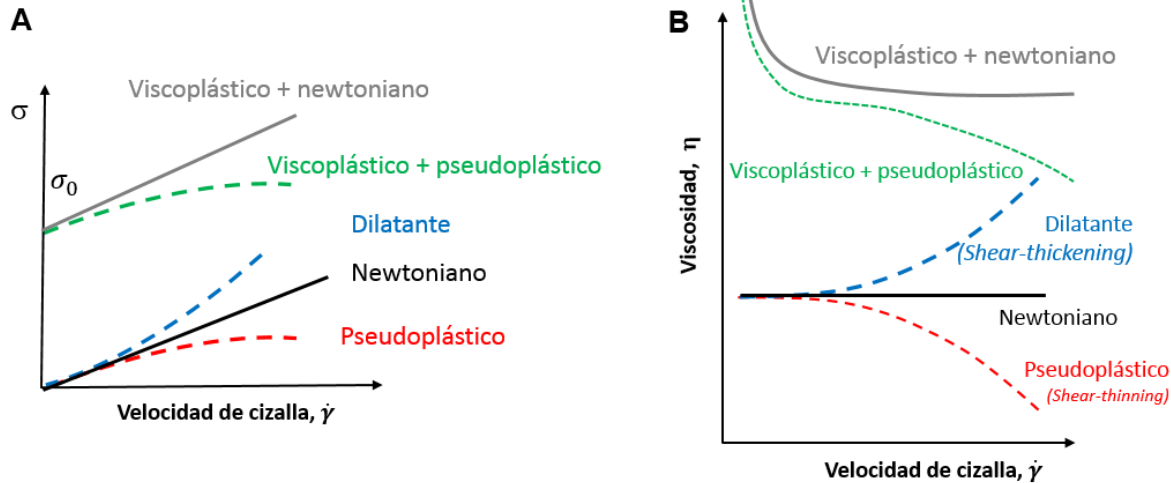
Interés en los programas de simulación

Comprender los procesos de fabricación para poder diseñar materiales específicos para aplicaciones concretas

Introducción

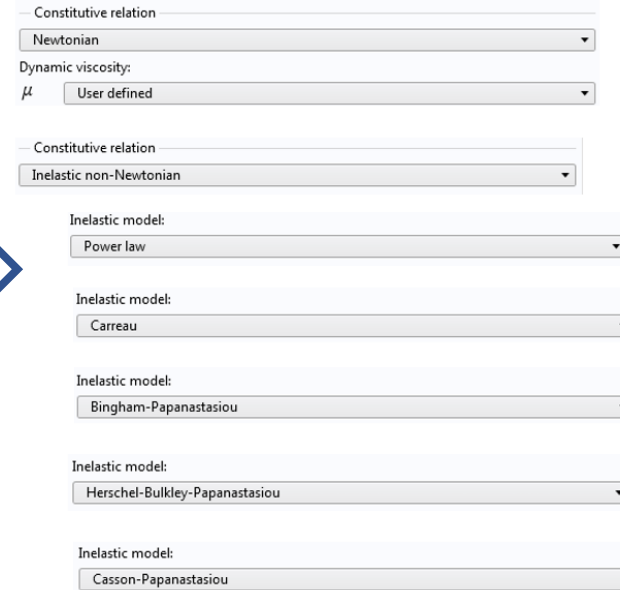
El flujo de los materiales poliméricos es un flujo intrínsecamente no newtoniano. Dependiendo de la formulación, los materiales pueden tener diferentes comportamientos no newtonianos.

Comportamientos no newtonianos



Se observa un aumento o disminución de la viscosidad con la velocidad de cizalla

Implementación en COMSOL



$$\mathbf{\kappa} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

$$\mathbf{\kappa} = m \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{n-1} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

$$\mathbf{\kappa} = \left(\mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \right) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

$$\mathbf{\kappa} = \left(\mu_p + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \left[1 - \exp(-m_p \dot{\gamma}) \right] \right) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

$$\mathbf{\kappa} = \left(\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \left[1 - \exp(-m_p \dot{\gamma}) \right] + m \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{n-1} \right) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

$$\mathbf{\kappa} = \left(\sqrt{\mu_p} + \sqrt{\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}} \left[1 - \exp(-\sqrt{m_p} \dot{\gamma}) \right] \right)^2 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

Introducción

Los flujos de polímeros son utilizados en la gran mayoría de procesos de fabricación de objetos plásticos.



Fabricación Aditiva (Impresión 3D)

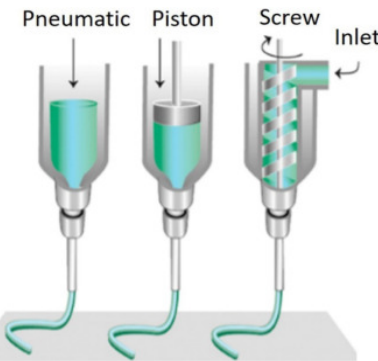


Interés en COMSOL

- Flujos no newtonianos
- Flujos no isotermos



Extrusión directa



Parámetros de interés

Perfiles de:

- Velocidad
- Velocidad de cizalla
- Viscosidad

Objetivo

El objetivo de este trabajo es:

Comprender el comportamiento de un fluido no newtoniano a través de un cabezal de impresión 3D mediante el módulo CFD de COMSOL

Analizar el comportamiento de diferentes materiales en un capilar

Desarrollar una simulación que describa el flujo en una configuración específica de impresión 3D

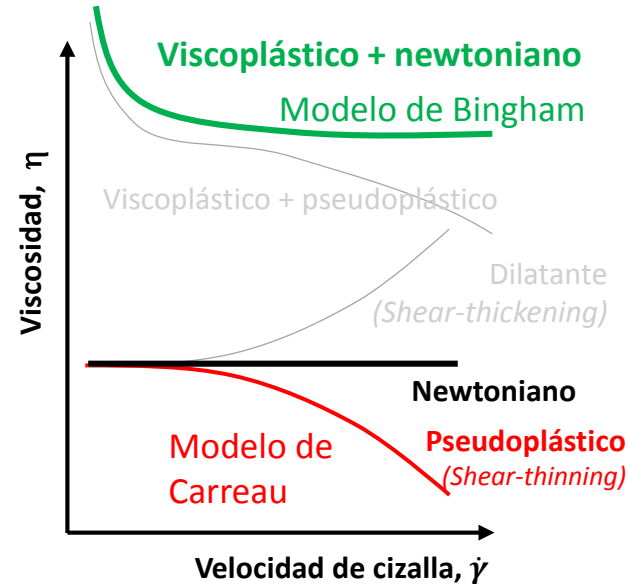
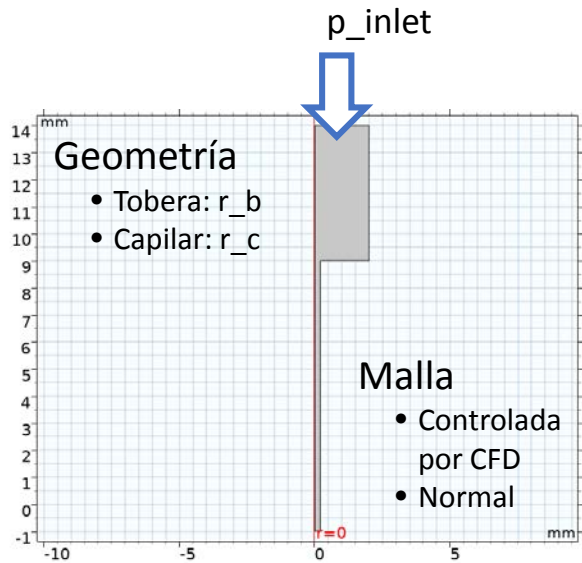
Condiciones

Condiciones isotermas
(Sin transferencia de calor)

Flujo laminar
Número de Reynolds bajo: $Re \downarrow$

Estudio a través de un capilar

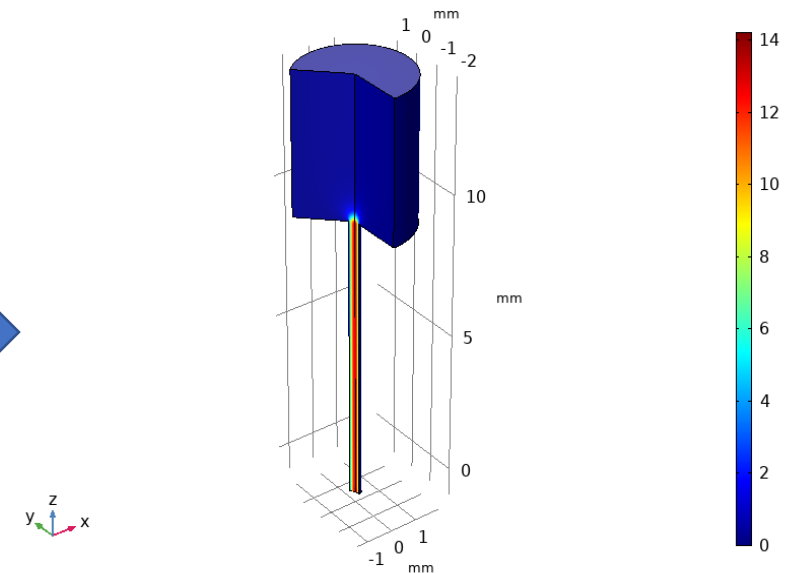
Modelo 2D axisimétrico



| Modelo | Parámetro | |
|------------------|-----------------------------|---------------------|
| <i>Newtonian</i> | Viscosidad | μ_0 : 50 Pa·s |
| <i>Carreau</i> | Viscosidad newtoniana | μ_0 : 1100 Pa·s |
| | Viscosidad terminal | μ_{inf} : 0 |
| | Tiempo de relajación | λ : 90 s |
| | Índice de pseudoplasticidad | n : 0.7 |
| <i>Bingham</i> | Viscosidad plástica | μ_p : 100 Pa·s |
| | Esfuerzo umbral | τ : 500 Pa |
| | Parámetro de modelo 1s | m_p : 1s |

$p_{inlet}(10)=10 \text{ bar}$

Surface: Velocity magnitude (mm/s)



Representación del perfil de velocidad

Barrido paramétrico de la presión de entrada

Estudio de materiales no newtonianos a través de un capilar

Caso newtoniano

Velocidad de cizalla

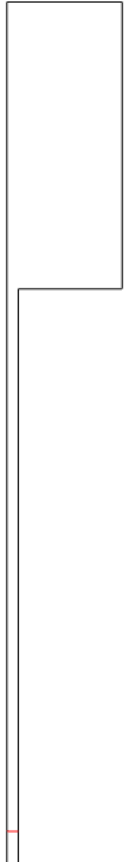
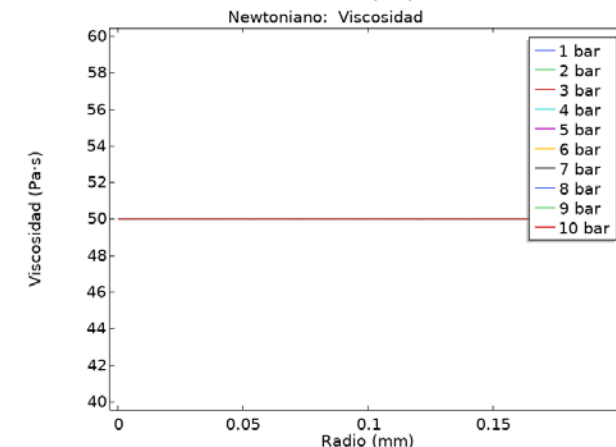
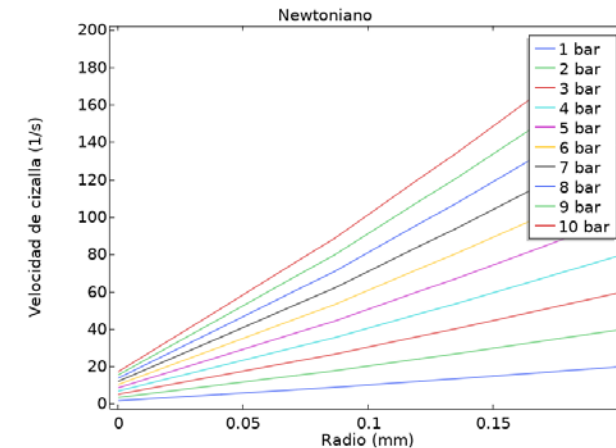
El material muestra una velocidad de cizalla máxima en la pared (Radio = 0.2 mm) y mínima en el centro del capilar

Viscosidad

El material muestra una viscosidad constante, independiente de la posición o la presión de entrada



Material newtoniano



Estudio de materiales no newtonianos a través de un capilar

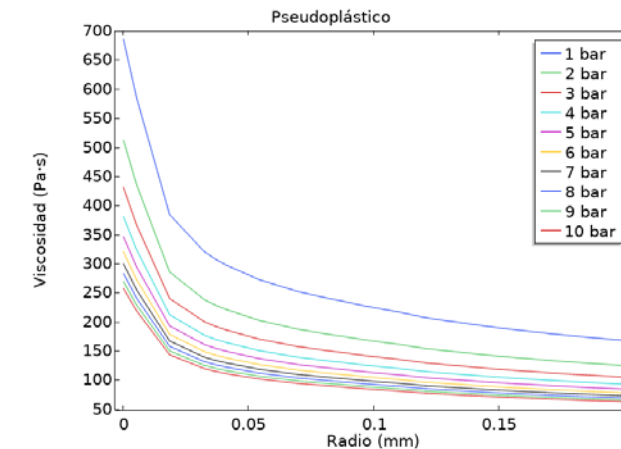
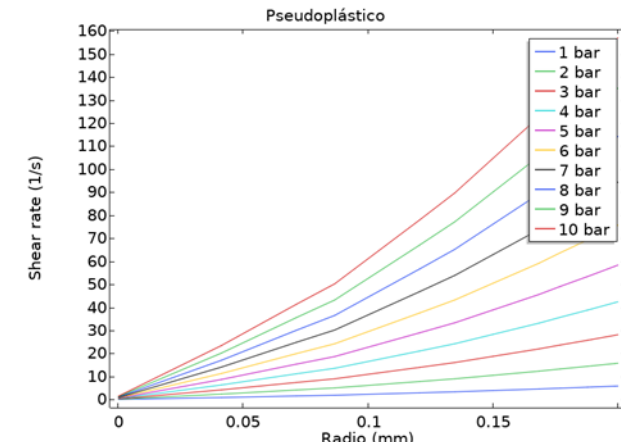
Caso pseudoplástico

Velocidad de cizalla

El material muestra una velocidad de cizalla máxima en la pared (Radio = 0.2 mm) y mínima en el centro del capilar con valores en el centro menores que en el caso newtoniano

Viscosidad

El material muestra un perfil de viscosidad, con un valor de viscosidad mínima en la pared (mayor velocidad de cizalla) y mayor en el centro



Estudio de materiales no newtonianos a través de un capilar

Caso viscoplástico

Velocidad de cizalla

El material muestra una velocidad de cizalla máxima en la pared (Radio = 0.2 mm) y mínima en el centro del capilar con valores en el centro menores que en el caso newtoniano

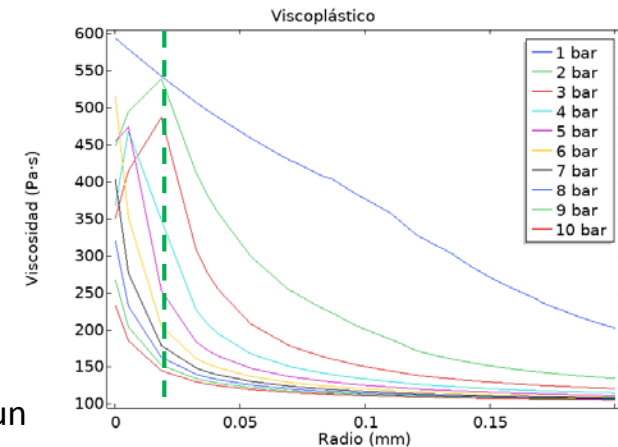
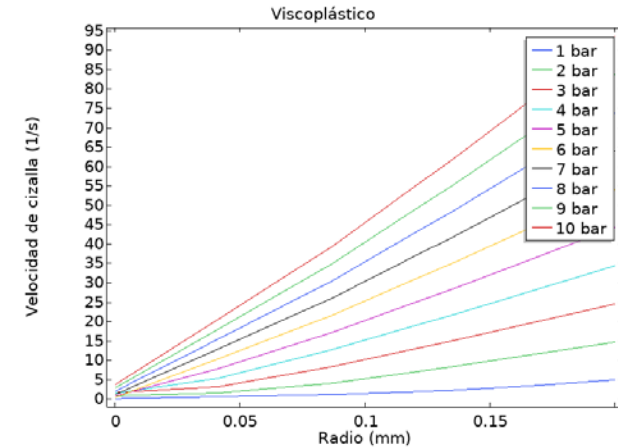
Viscosidad

El material muestra un perfil de viscosidad que tiende a infinito en un punto del radio del material

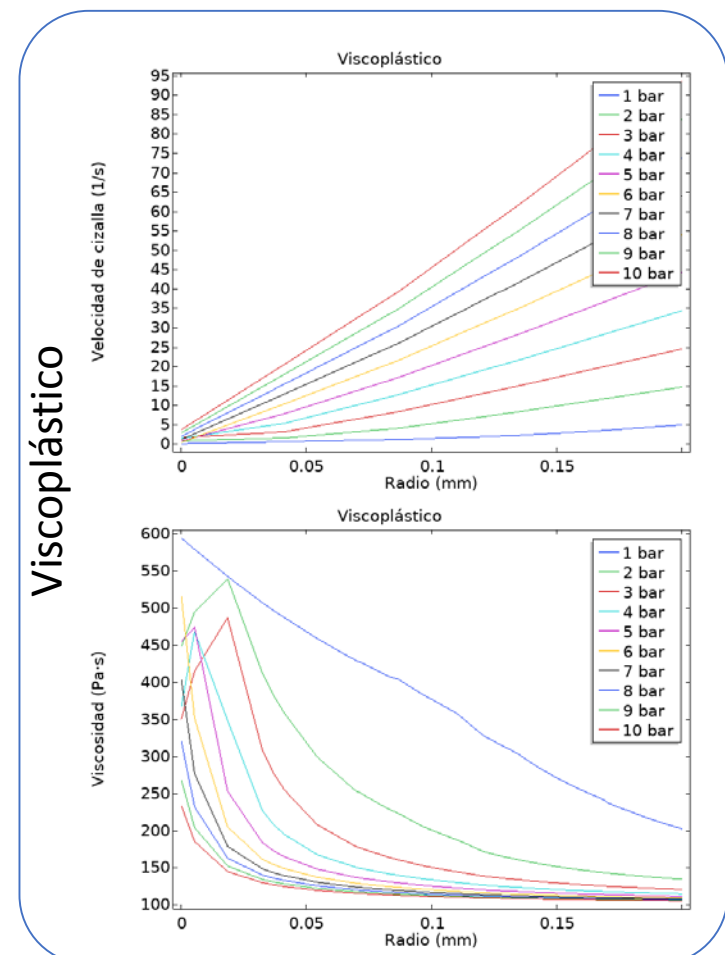
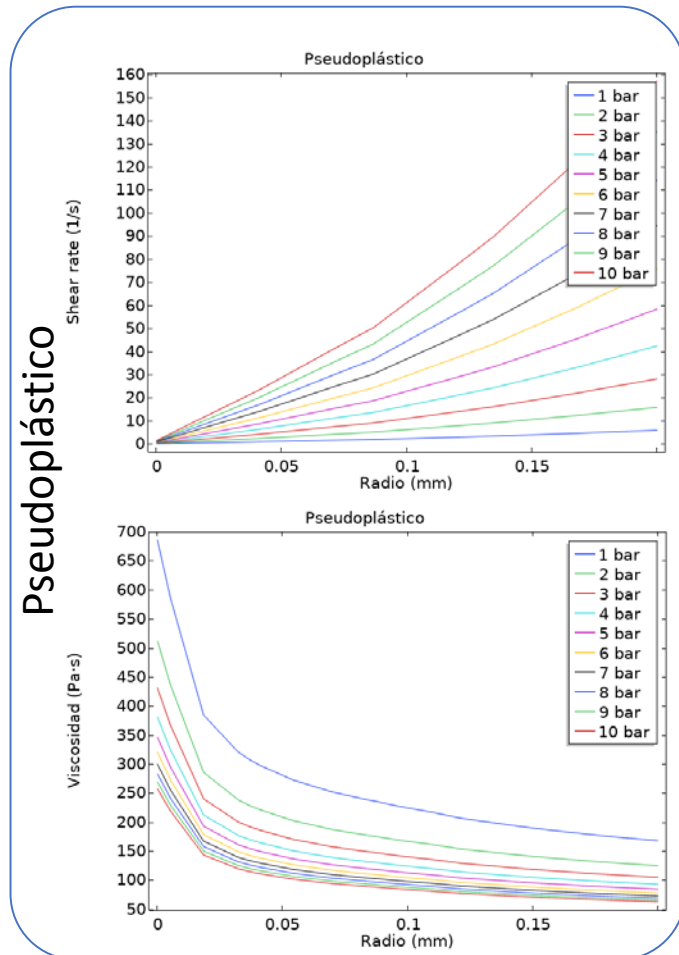
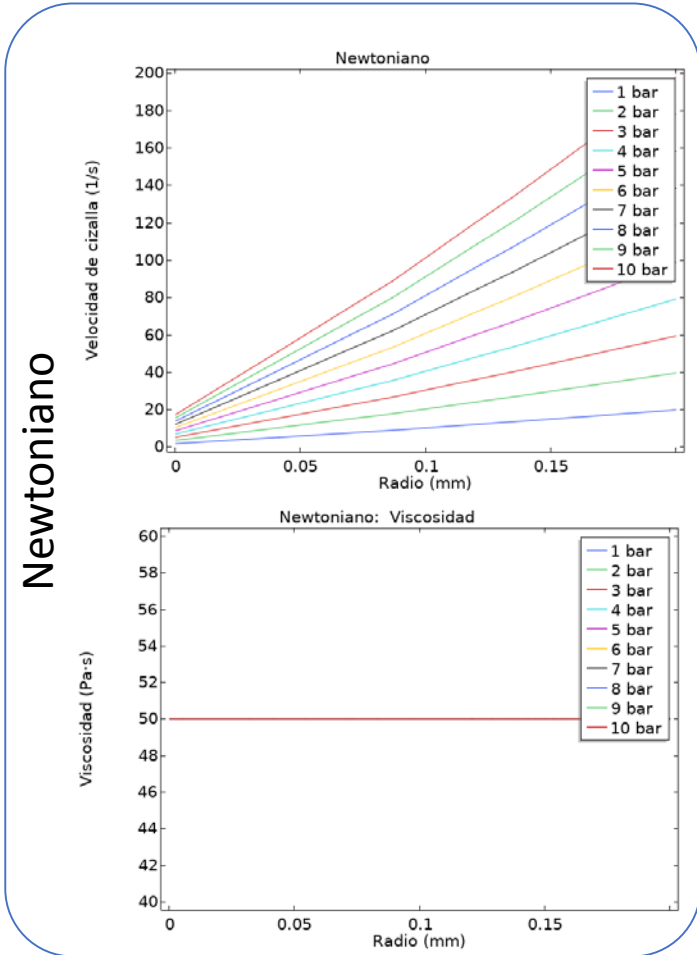


Flujo tapón

* Este caso requiere un estudio más exhaustivo



Estudio a través de un capilar

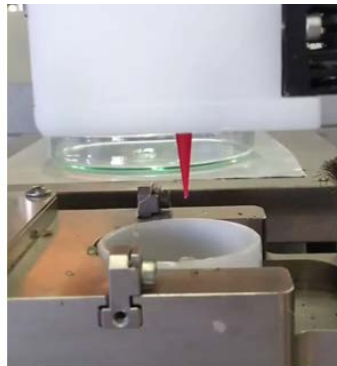


Modelización de un cabezal de impresión 3D

Se va a simular una configuración específica de impresión 3D neumática con unos materiales reales.

Comparación comportamiento real vs. Simulación

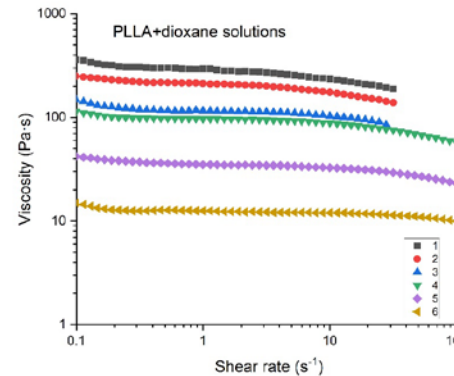
Configuración



- *Impresora 3D Bioplotter (Envisiontech)*
- *Cabezal de impresión de disolución*
- *Rango de presiones: 0.1-10 bar*

Materiales

Disoluciones de poli-L-(ácido láctico) en dioxano

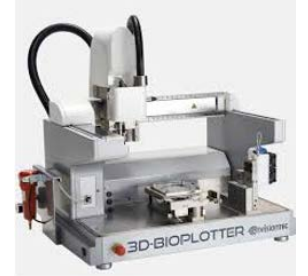


Modelo de Carreau

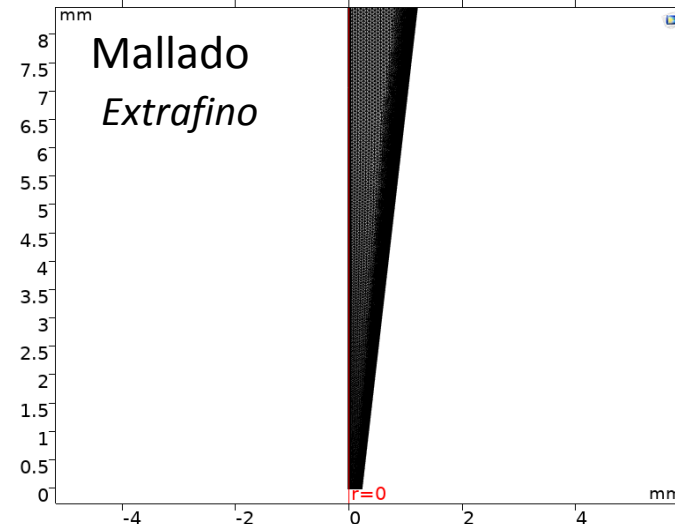
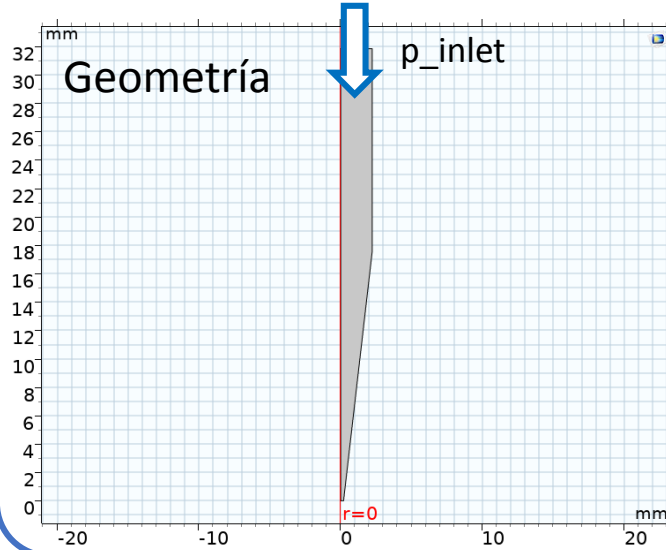
| Material | μ_0 (Pa·s) | λ (s) | n |
|----------|----------------|----------------------|------|
| 1 | 375 | $1.56 \cdot 10^{-2}$ | 0.62 |
| 2 | 249 | $1.29 \cdot 10^{-2}$ | 0.62 |
| 3 | 145 | $1.01 \cdot 10^{-2}$ | 0.62 |
| 4 | 103 | $5.5 \cdot 10^{-3}$ | 0.62 |
| 5 | 40 | $1.35 \cdot 10^{-3}$ | 0.62 |
| 6 | 15 | $1.57 \cdot 10^{-4}$ | 0.62 |

Modelización de un cabezal de impresión 3D

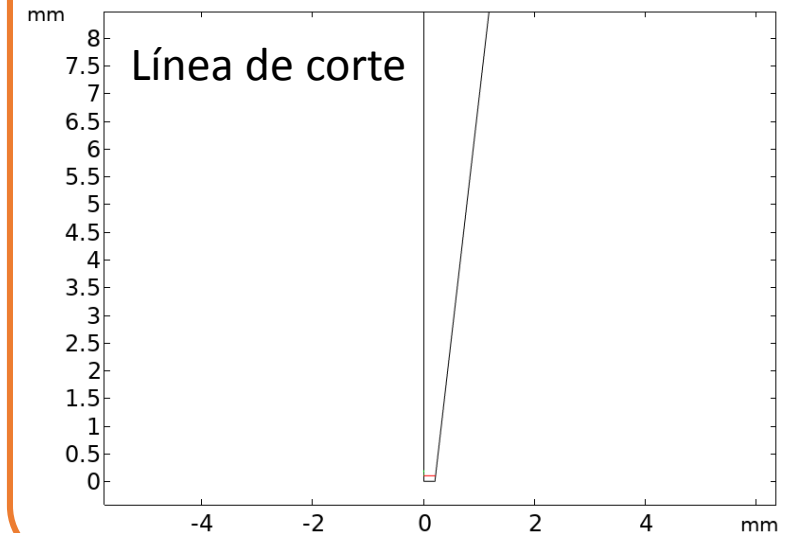
Se va a simular una configuración específica con unos materiales reales.



Modelo 2D Axisimétrico



Análisis de resultados



Estudio

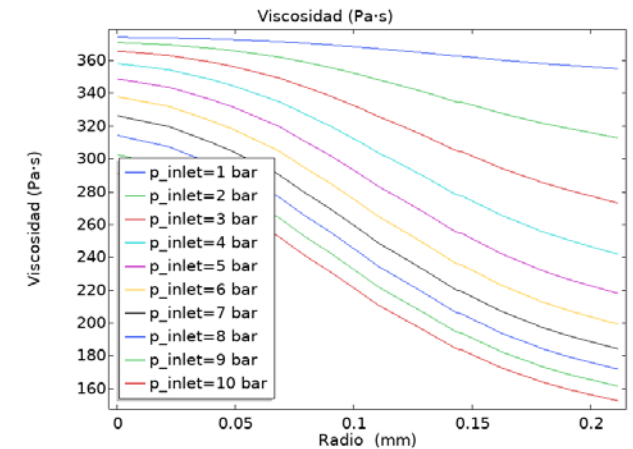
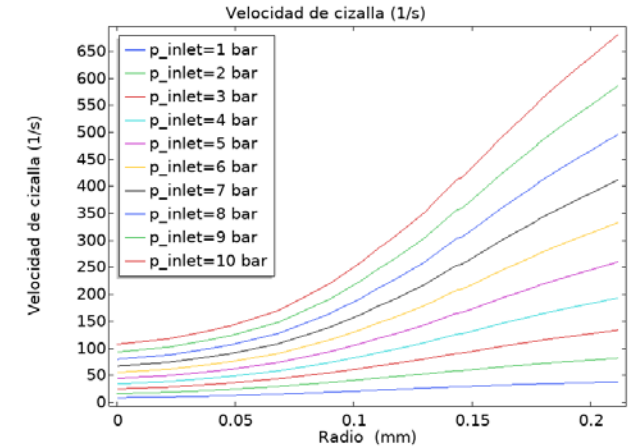
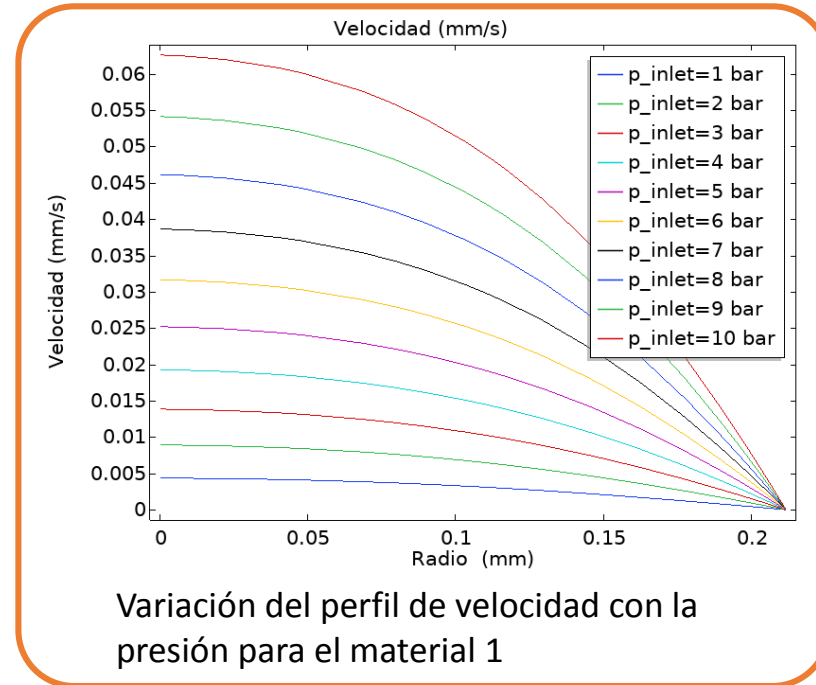
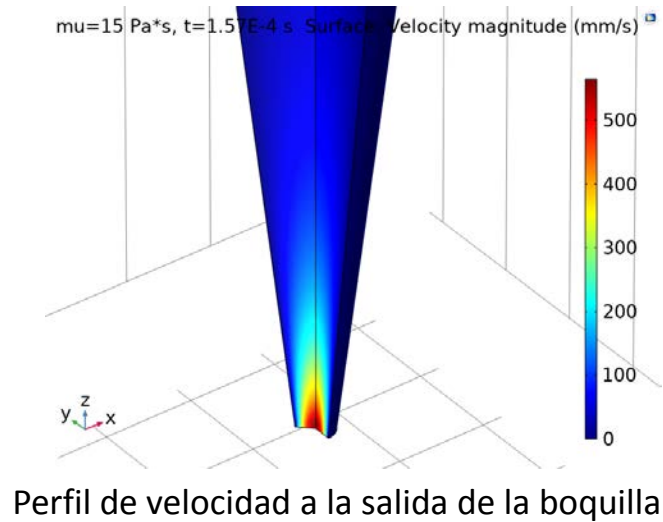
Barrido paramétrico

- Materiales
- Presiones de entrada: 1-10 bar

Modelización de un cabezal de impresión 3D

Resultados

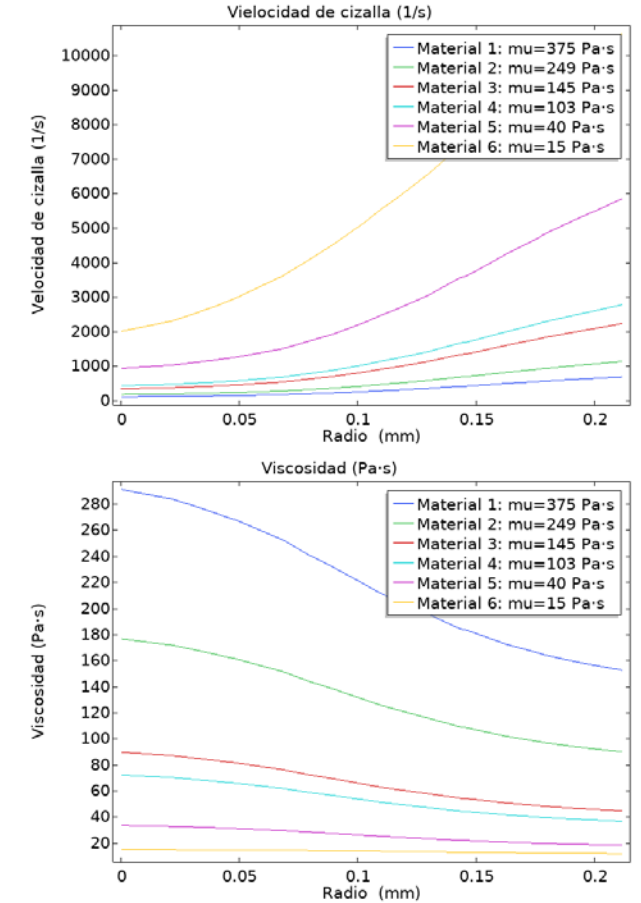
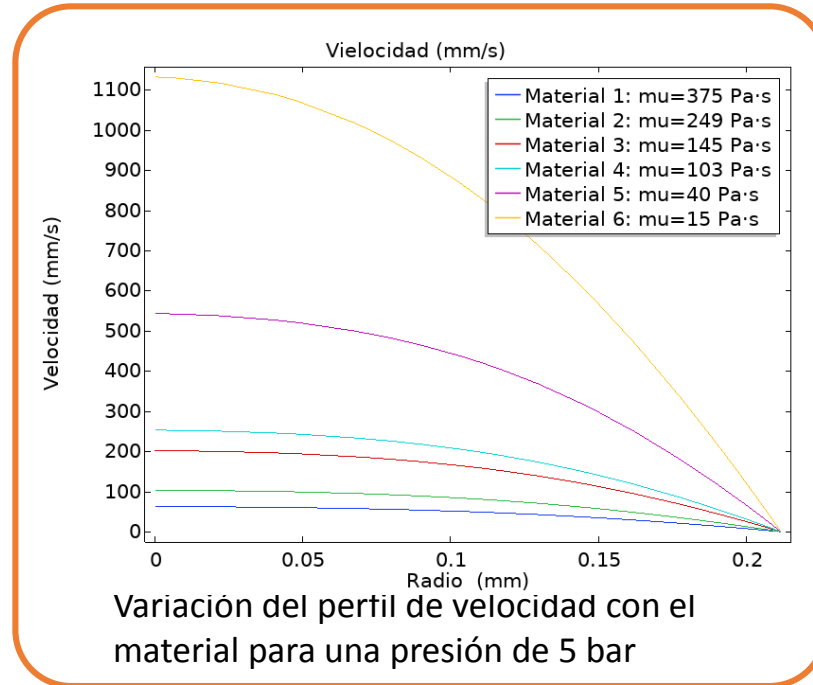
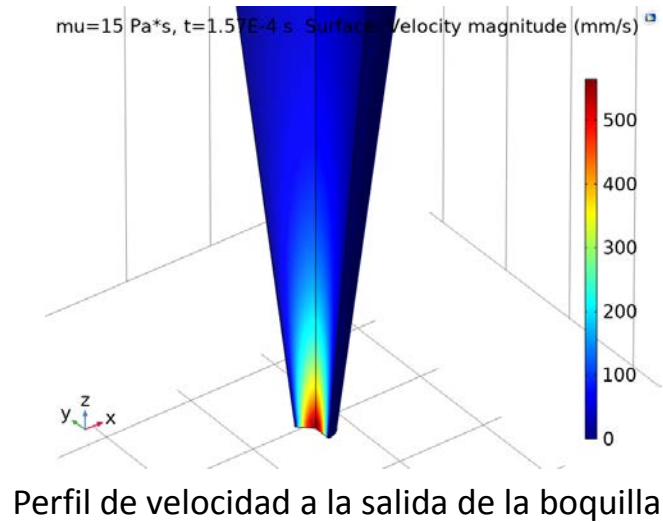
Influencia de la presión



Modelización de un cabezal de impresión 3D

Resultados

Influencia del material



Modelización de un cabezal de impresión 3D

Resultados

Haciendo un promedio se puede calcular la velocidad de salida del cabezal

| Presión (Bar) | Velocidad de salida (mm/s) | | | | | |
|---------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Material 1 | Material 2 | Material 3 | Material 4 | Material 5 | Material 6 |
| 1 | 2.1015 | 3.1951 | 5.5919 | 7.7367 | 19.579 | 51.611 |
| 2 | 4.4024 | 6.8155 | 12.291 | 16.55 | 40.47 | 103.61 |
| 3 | 6.9954 | 11.01 | 20.325 | 26.798 | 63.43 | 156.36 |
| 4 | 9.9022 | 15.788 | 29.641 | 38.499 | 88.733 | 210.17 |
| 5 | 13.119 | 21.127 | 40.165 | 51.588 | 116.42 | 265.3 |
| 6 | 16.634 | 27.004 | 51.82 | 66.006 | 146.47 | 321.95 |
| 7 | 20.439 | 33.389 | 64.554 | 81.681 | 178.79 | 380.27 |
| 8 | 24.519 | 40.262 | 78.302 | 98.56 | 213.33 | 440.41 |
| 9 | 28.867 | 47.609 | 93.026 | 116.61 | 250.03 | 502.4 |
| 10 | 33.472 | 55.403 | 108.69 | 135.76 | 288.8 | 566.3 |

Los valores reales se encuentran a velocidades de impresión más bajas

Puede permitir estimar las capacidades de impresión de cada material

Posibilidades y limitaciones del modelo

Posibilidades

Modelo que permite establecer las condiciones de impresión para un determinado material

Coste de computación bajo  Creación de una APP

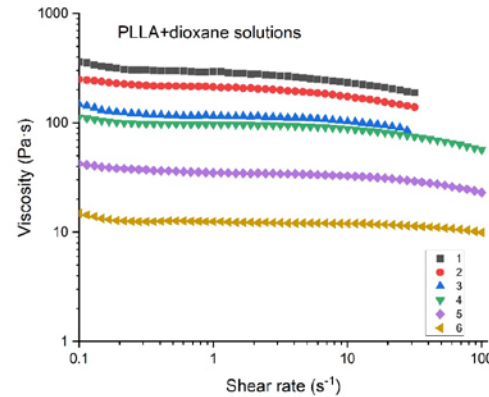
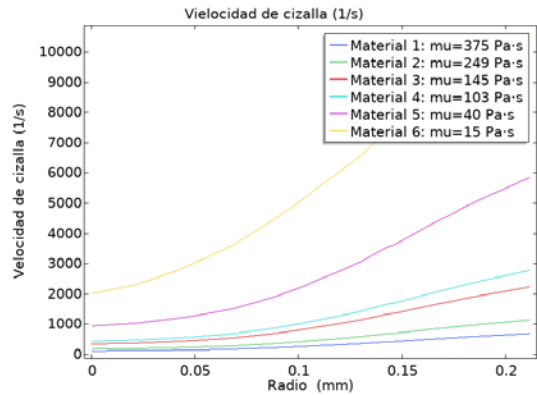
Es necesario **validar el modelo**

- **Medida** adecuada de la velocidad real de salida
- Revisar la **configuración** del modelo
- Entender las **limitaciones intrínsecas** del modelo

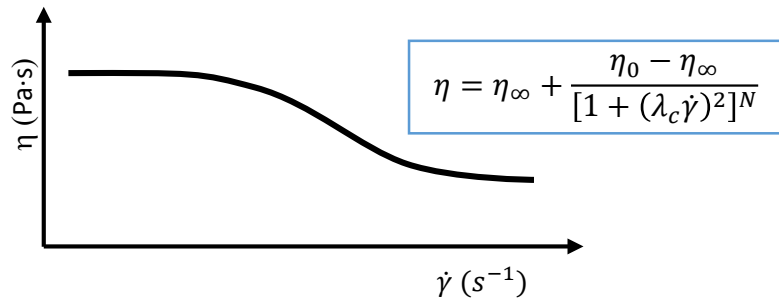
Posibilidades y limitaciones del modelo

Limitaciones

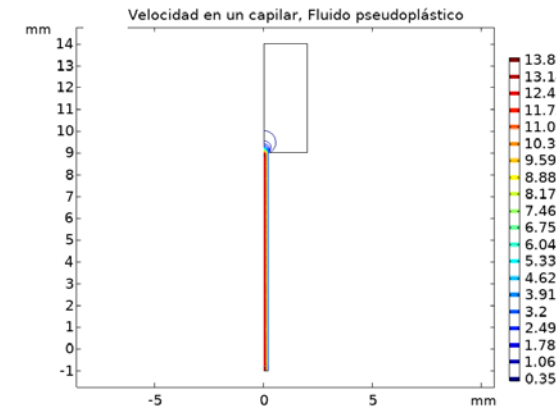
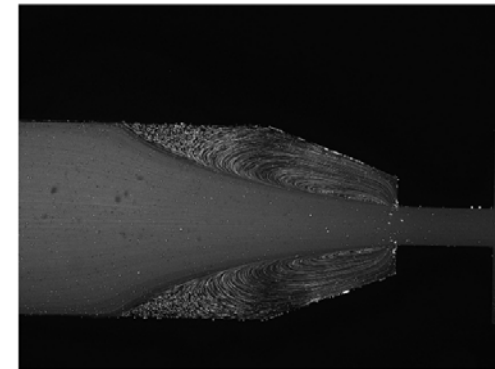
A Valores de viscosidad extrapolados



¡¡ Hasta dos órdenes de magnitud de diferencia !!



B Flujos Viscoelásticos



Tensor esfuerzo

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

El material no está sujeto únicamente a esfuerzos de cizalla, sino también elongacionales

Adaptado de Galindo-Rosales et al. *Materials*, **2019**,12, 2839.

Conclusiones

1. COMSOL se presenta como una herramienta muy útil para describir el flujo de materiales no newtonianos en aplicaciones de fabricación aditiva.
2. Es necesario comprender el resolutor específico y las simplificaciones que aplica a este tipo de materiales
3. Se ha mostrado la importancia de los datos experimentales en el rango de trabajo
4. Los modelos más precisos deben incluir la descripción de los flujos viscoelásticos, que no son triviales

Trabajo futuro

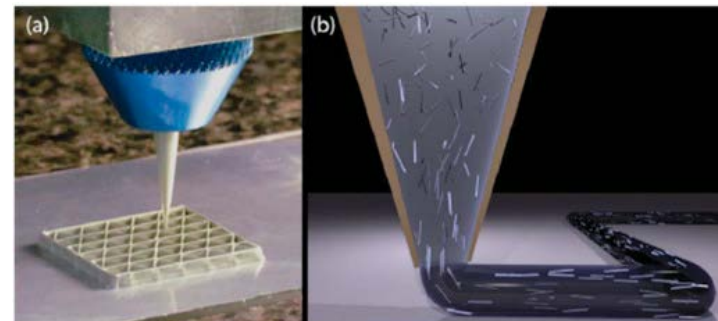
Objetivo: conseguir materiales basados en polímero + nanotubos de carbono (CNT) capaces de conducir la electricidad

En bibliografía se muestran resultados en los que se consiguen materiales conductores.

Experimentalmente nosotros hemos constatado que la conductividad se pierde en durante la impresión 3D.

- **Explicación:** La orientación de los nanotubos durante el cizallado hace que se pierda la percolación, la red tridimensional de nanotubos necesaria para generar un camino conductor.

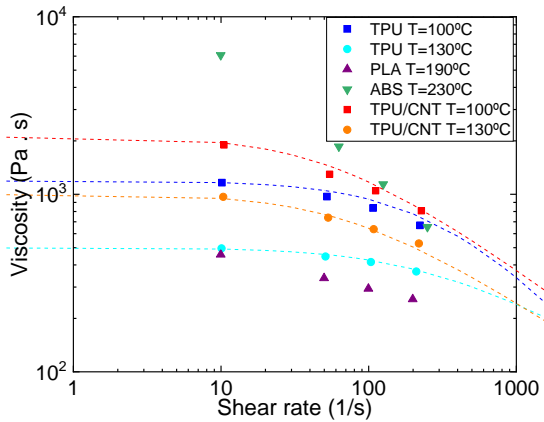
| MUESTRA | CONDUCTIVIDAD (S/cm) |
|----------------------|----------------------|
| TPU-2 CNT compresión | $5.8 \cdot 10^{-8}$ |
| TPU-4 CNT compresión | $3.8 \cdot 10^{-7}$ |
| TPU-6 CNT compresión | $7.5 \cdot 10^{-7}$ |
| TPU-2 CNT inyectada | $3.7 \cdot 10^{-14}$ |
| TPU-4 CNT inyectada | $3.7 \cdot 10^{-14}$ |
| TPU-6 CNT inyectada | $7.0 \cdot 10^{-14}$ |
| TPU-2 CNT 3D | $2.9 \cdot 10^{-14}$ |
| TPU-4 CNT 3D | $1.9 \cdot 10^{-14}$ |
| TPU-6 CNT 3D | $1.4 \cdot 10^{-14}$ |



Debe existir un **velocidad de cizalla crítica** que destruya la percolación de los nanotubos

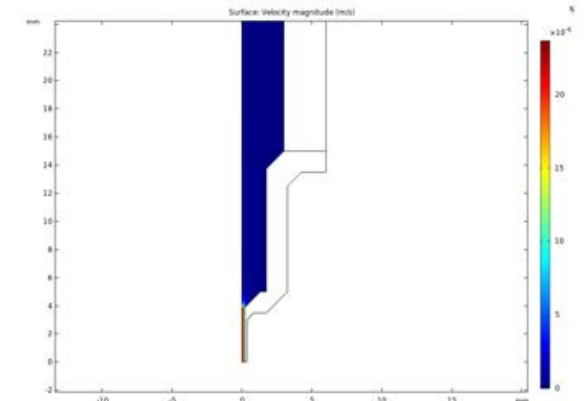
Trabajo futuro

Curvas de viscosidad

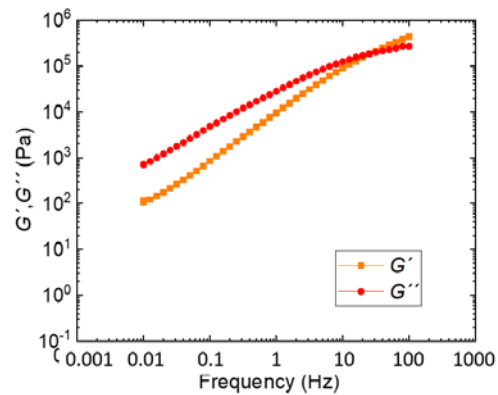


Estudio COMSOL

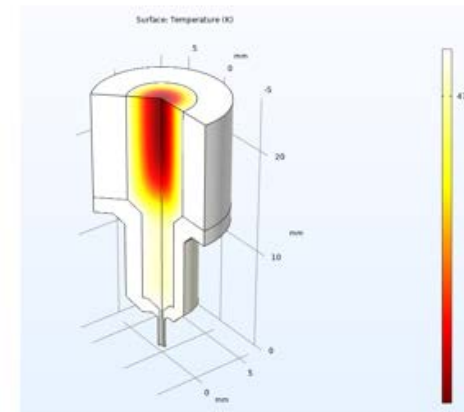
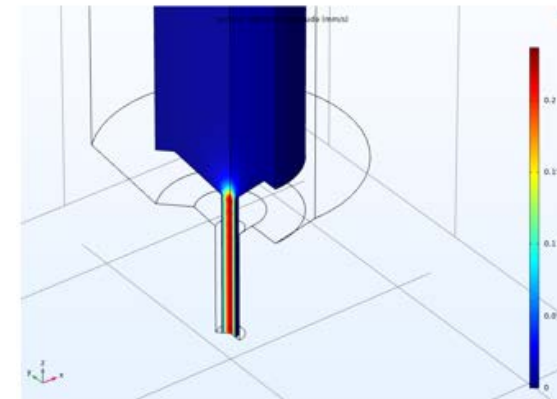
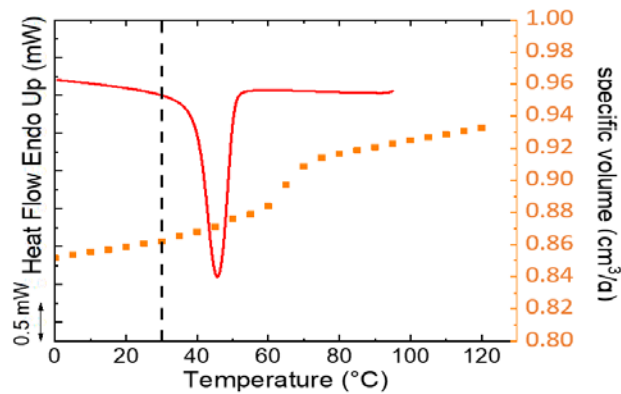
- Multifísico: Flujo+transferencia de calor
- Estudio de la viscoelasticidad
- Estudio del flujo tapón
- Estudio geométrico de la boquilla



Viscoelasticidad



Caracterización térmica





Agradecimientos

Universidad de Málaga

- Emilio Ruiz Reina

Universitat Politècnica de Catalunya

- Ricardo Torres Camara
- Joan Grau Barceló
- Lluís Jofre Cruanyes



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es

