

**DISEÑO Y PUESTA A PUNTO  
DE SIMULACIONES DE  
INYECCIÓN DE METALES  
(MIM) MEDIANTE EL USO  
DEL SOFTWARE  
MOLDFLOW**

**Daniel Díez  
Díaz-Calonge**

# ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS
- TERMOPLÁSTICOS Y METALES
- MODELOS MATEMÁTICOS
- SIMULACIONES
- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

# INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## ■ Master CAD CAM CIM

### ■ Procesos de fabricación

#### ■ Deformación:

- Laminación
- Forja
- Calandrado

#### ■ Arranque de material:

- Mecanizado
- Sinterización

#### ■ Moldeo:

- Compresión
- Inyección

### ■ Diseño y análisis

#### ■ Herramientas CAD

- Unigraphics NX
- Pro Engineer

#### ■ Herramientas CAE

- Ansys
- PAM RTM
- Moldflow

# INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

MOLDFLOW como simulador de inyecciones de metal líquido

- Estudio del modelo de Cross-WLF para la viscosidad
- Estudio del modelo de Tait modificado para el comportamiento pvT

ADAPTAR LOS MODELOS A LOS METALES

# ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS
- TERMOPLÁSTICOS Y METALES
- MODELOS MATEMÁTICOS
- SIMULACIONES
- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

# TERMOPLÁSTICOS Y METALES

## ■ TERMOPLÁSTICOS

- Materiales sintéticos de la familia de los plásticos
- En estado líquido: Fluido no newtoniano
  - Viscosidad variable según aumente la velocidad de cizalla
    - Comportamiento pseudoplástico: aumenta velocidad de cizalla, disminuye viscosidad

## ■ METALES

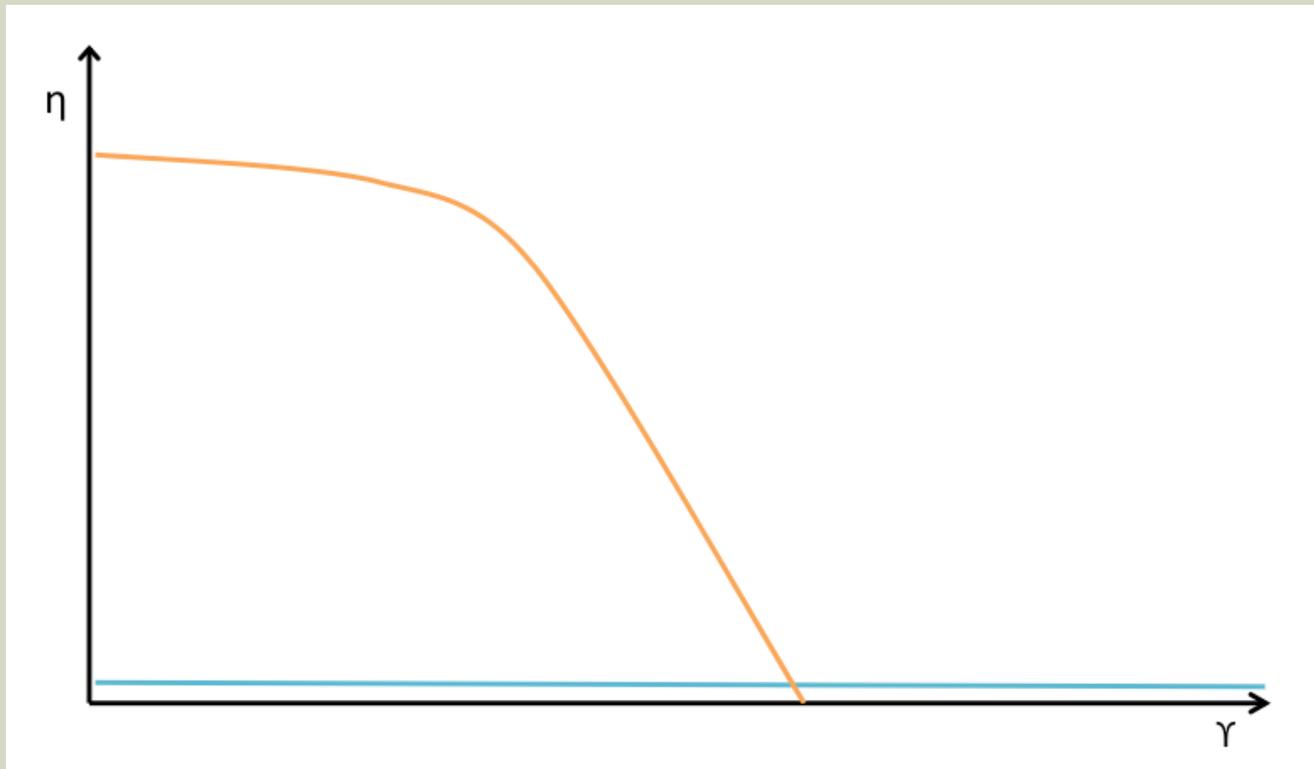
- Elementos capaz de formar cationes fácilmente y cuenta con enlaces metálicos
- En estado líquido: Fluido newtoniano
  - Comportamiento prácticamente newtoniano: Si aumenta la velocidad de cizalla la viscosidad sufre alteraciones mínimas

# TERMOPLÁSTICOS Y METALES

## DIFERENCIAS

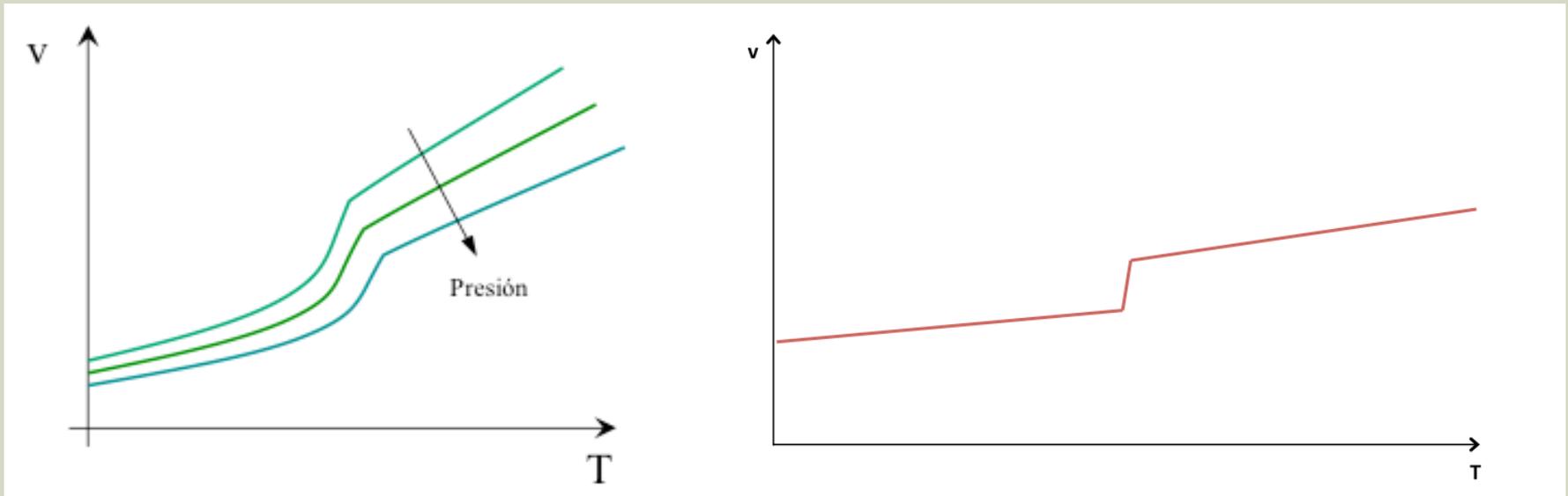
# TERMOPLÁSTICOS Y METALES

- Comportamiento viscosidad



# TERMOPLÁSTICOS Y METALES

## ■ Comportamiento pVT



# TERMOPLÁSTICOS Y METALES

| <b>Termoplásticos</b>                              | <b>Metales</b>                      |
|--|-------------------------------------|
| <b>Fluido no newtoniano</b>                        | <b>Fluido newtoniano</b>            |
| <b>Viscosidad alta</b>                             | <b>Viscosidad baja</b>              |
| <b>Conductividad térmica baja</b>                  | <b>Conductividad térmica alta</b>   |
| <b>Estructura macro molecular</b>                  | <b>Estructura atómica</b>           |
| <b>Resistencia mecánica media</b>                  | <b>Resistencia mecánica alta</b>    |
| <b>Resistencia a la conducción de electricidad</b> | <b>Material altamente conductor</b> |

# ÍNDICE

- TERMOPLÁSTICOS Y METALES
- MODELOS MATEMÁTICOS
- SIMULACIONES
- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

# MODELOS MATEMÁTICOS

- MODELO DE CROSS-WLF
- MODELO DE TAIT MODIFICADO

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ MODELO CROSS-WLF

- Describe la viscosidad de los materiales pseudoplásticos
- Expresión matemática:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

$\eta_0$ : Viscosidad del material en condiciones de cizalla nula

$\tau^*$ : Tensión de cizalla a la que se produce el comportamiento pseudoplástico

$\dot{\gamma}$ : Velocidad de cizalla

$1-n$ : pendiente del comportamiento pseudoplástico

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ MODELO DE CROSS-WLF

- Cálculo de viscosidad en condiciones de cizalla nula (Modelo de Williams-Landel-Ferry):

$$\eta_0 = D_1 \cdot e^{A_1 \cdot \left( \frac{(T-\tilde{T})}{A_2+(T-\tilde{T})} \right)}$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p$$

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p$$

**$D_1$** : Cte. que indica viscosidad, temperatura de transición y presión en cizalla nula

**$D_2$** : Cte. que indica la  $T^a$  de transición del material

**$D_3$** : Cte. Que relaciona variación de  $T^a$  con presión

**$\tilde{T}$** :  $T^a$  de transición del material

**$A_1$  y  $A_2$** : Ctes. del modelo

# MODELOS MATEMÁTICOS

- Caso particular de los metales

- $\eta = \eta_0$

- Hay que resolver

- La relación exponencial entre viscosidad y cambios de temperatura del material descrito en el modelo de Williams.

- Variaciones de viscosidad prácticamente inexistentes al tratarse de décimas de mPa·s

- La relación entre la presión y la viscosidad

- Influencia de la presión en la viscosidad suficientemente pequeña como para poder ser despreciada

# MODELOS MATEMÁTICOS

- Eliminar relación exponencial

- El valor de las constantes es:

- $A_1=0$
- $A_2$ =indiferente
- $D_1$ =viscosidad del metal líquido

$$\eta_0 = D_1 \cdot e^{A_1 \cdot \left( \frac{(T-\tilde{T})}{A_2+(T-\tilde{T})} \right)} \longrightarrow \eta_0 = D_1$$

- Simplificar la relación entre viscosidad y presión

- El valor de las constantes es:

- $D_2$ =temperatura de fusión del metal
- $D_3=0$

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p \longrightarrow \tilde{T} = D_2$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ Última problemática

- El modelo de Cross-WLF presenta una relación con la pendiente de la viscosidad del material que se quiere modelar

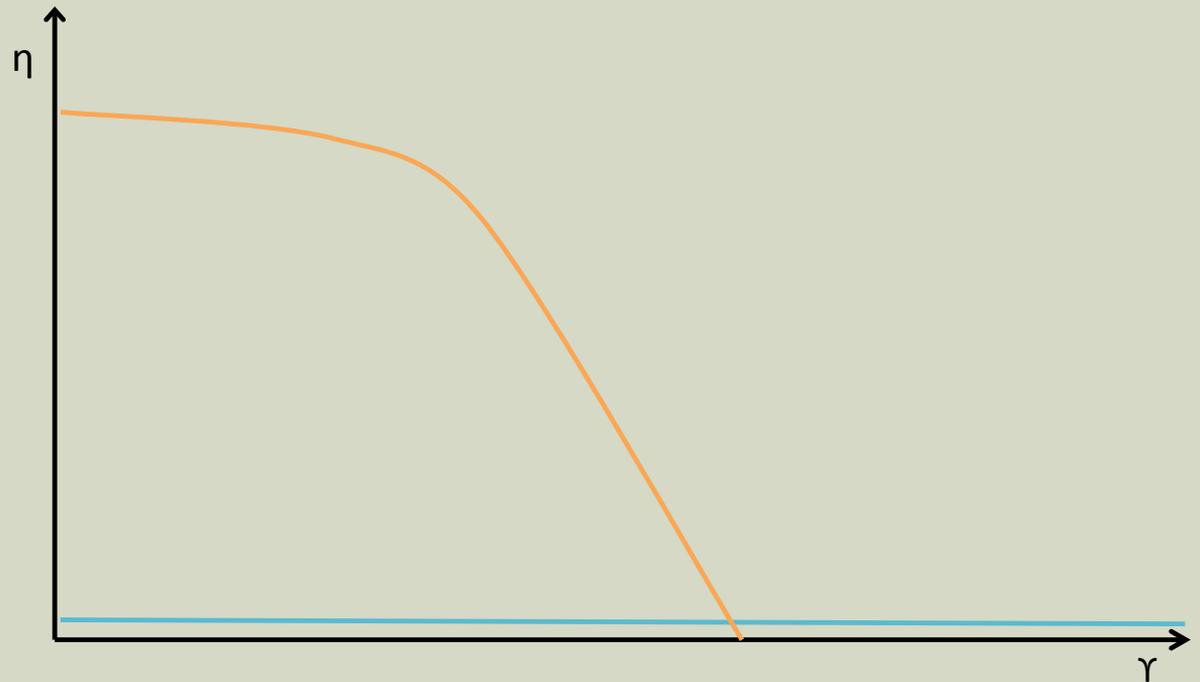
$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

## ■ Termoplásticos

- $n \approx 0,3 \div 0,4$

## ■ Metales

- $n \approx 0,7 \div 0,9$



# MODELOS MATEMÁTICOS

- Se quiere conseguir que el denominador del modelo tome la forma:

$$\left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n} \approx 0 \quad \eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} = \frac{\eta_0}{1+0} \longrightarrow \eta = \eta_0$$

- Existen dos formas de conseguir la relación
  - Caso a)
  - Caso b)

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ CASO A)

- $n \approx 0,8 \div 0,9$

- $\tau = \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$

- Son necesarios valores muy altos de  $\tau$  para poder contrarrestar el efecto de una pendiente prácticamente nula

## ■ CASO B)

- $n \approx 0,3 \div 0,4$

- $\tau = \uparrow\uparrow\uparrow$

- Se consigue el objetivo con valores de tensión de cizalla menos elevados que en el caso anterior

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ MODELO DE TAIT MODIFICADO

- Describe el comportamiento pvT tanto en estado sólido como líquido
- Expresión matemática:

$$v(p, T) = v_0(T) \cdot \left( 1 - 0,0894 \cdot \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right) + v_f(p, T)$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

- En el caso de los metales líquidos solamente interesa el modelo de Tait por encima de  $T_g$ :

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m} \cdot (T - b_5)$$

$$B(T) = b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot (T - b_5)}$$

$$v_f(p, T) = 0 \qquad T_g = b_5 + b_6 \cdot p$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

## ■ Adaptar Tait a los metales

- La dependencia de la presión se puede simplificar
  - $b_6=0$
  - $b_5=T^a$  de fusión del metal

$$T_g = b_5 + b_6 \cdot p \longrightarrow T_g = T_{\text{fusión}}$$

- Para eliminar la dependencia exponencial del modelo de Tait
  - $b_{4m}=0$

$$B(T) = b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot (T - b_5)} \longrightarrow B(T) = b_{3m}$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

- Como  $v_f=0$  al tratarse de un líquido y si  $b_3=\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$

$$v(p,T) = v_0(T) \cdot \left( 1 - 0,0894 \cdot \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right) + v_f(p,T)$$

$$B(T) = \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow \quad \ln(1 + \downarrow\downarrow\downarrow\downarrow) \approx \ln(1) \quad \longrightarrow \quad \ln(1) = 0$$

$$v(p,T) = v_0(T)$$

- Variación de volumen mínimo según aumenta la temperatura.

- Se puede simplificar la relación

- $b_2=0$

- $b_1=v_{metal}$

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m} \cdot (T - b_5)$$

$$v_0(T) = v_{metal}(T)$$

$$v(T) = v_{metal}(T)$$

# MODELOS MATEMÁTICOS

- Adaptando las variables de los dos modelos se obtienen resultados matemáticamente viables pero necesitan ser evaluados
  - Simulaciones MOLDFLOW

# ÍNDICE

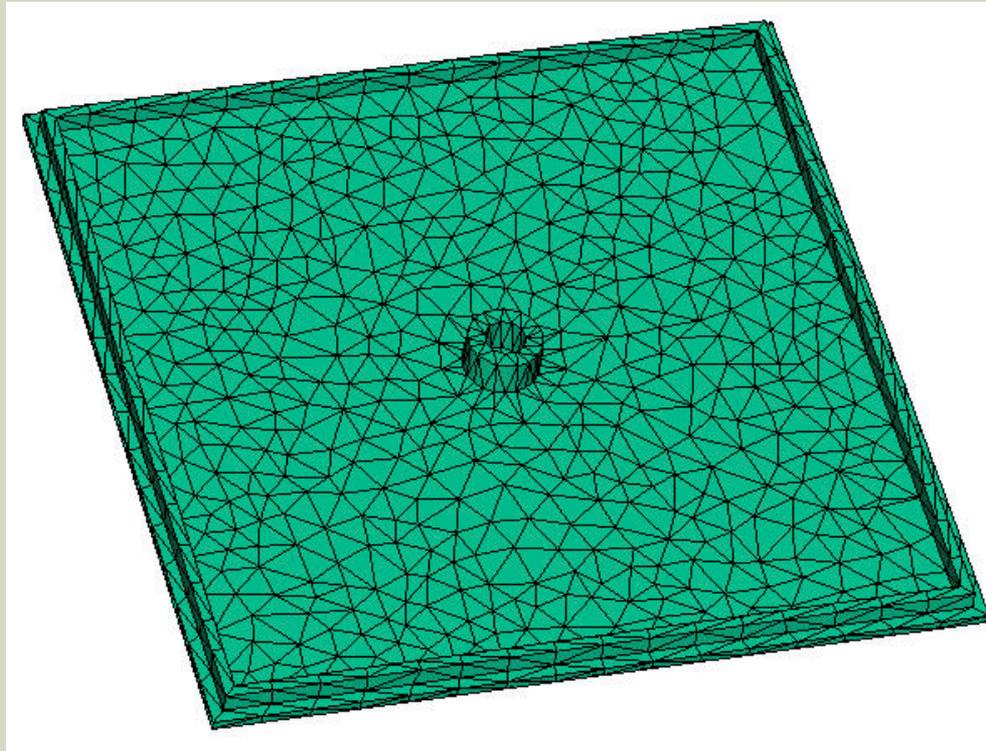
- **MODELOS MATEMÁTICOS**
- **SIMULACIONES**
- **CONCLUSIONES**
- **LINEAS DE TRABAJO FUTURAS**

# SIMULACIONES

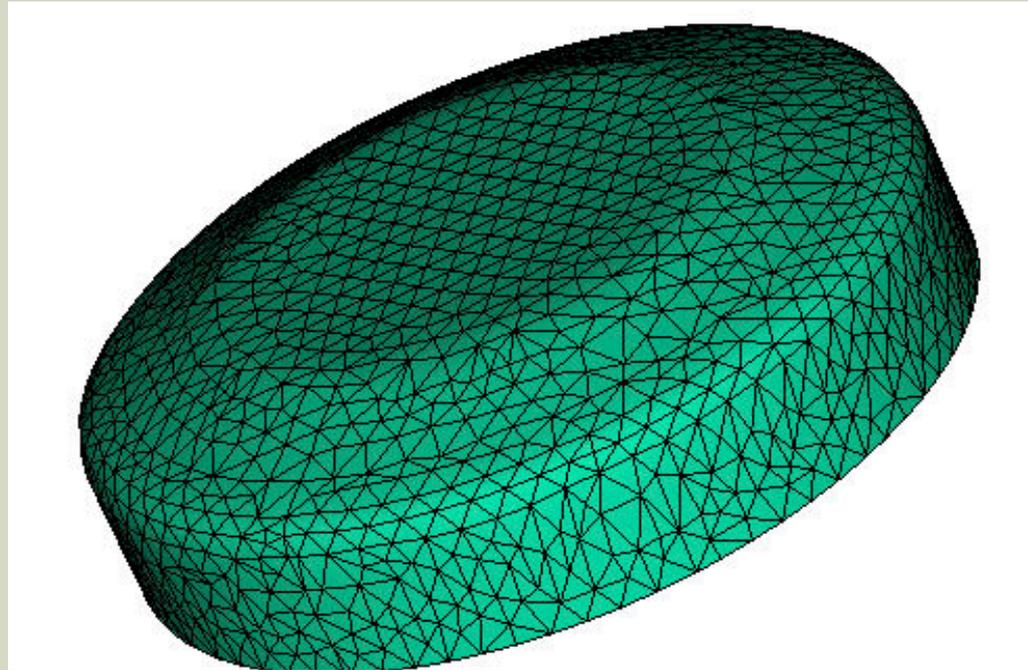
- **Objetivo:** comprobar comportamiento modelos Cross-WLF y Tait
- Se han diseñado tres piezas que han sido sometidas a una serie de simulaciones en Moldflow con distintas condiciones de llenado
- **Dos materiales:** Zamak y aluminio

# SIMULACIONES

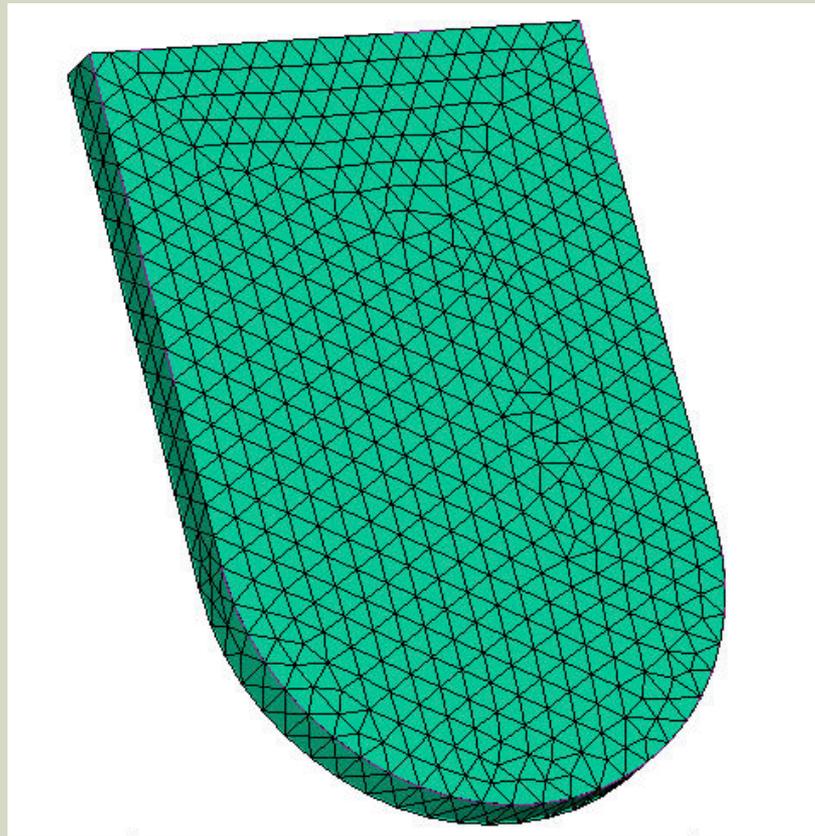
- Piezas:



# SIMULACIONES



# SIMULACIONES



# SIMULACIONES

- **Condiciones de las simulaciones**
  - Simulaciones con tiempo de llenado automático
  - Simulaciones con el tiempo de llenado más lento posible
  - Simulaciones con un tiempo intermedio entre el tiempo mostrado en modo automático y el más lento posible
- Las condiciones son para cada pieza, para cada tipo de material utilizando el caso a) o el caso b) del modelo de Cross-WLF
- **Condiciones propias de los materiales**
  - **Zamak**
    - Temperatura de trabajo: 420 °C
    - Temperatura molde: 120 °C
  - **Aluminio**
    - Temperatura de trabajo: 650 °C
    - Temperatura molde: 120 °C

# SIMULACIONES

- Resultados destacados
  - Tiempos de llenado automáticos prácticamente inviábiles
  - Tiempos de llenado manuales alcanzan valores factibles
  - Las simulaciones de Zamak presentan variaciones entre sí según se utilice un modelo de Cross-WLF u otro, mientras que eso no sucede en el caso del aluminio
  - Cuanta más pequeña sea la pieza más comportamientos extraños parecen suceder
    - presiones altas y fuerzas de cierre bajas
    - tiempos demasiado rápidos

# ÍNDICE

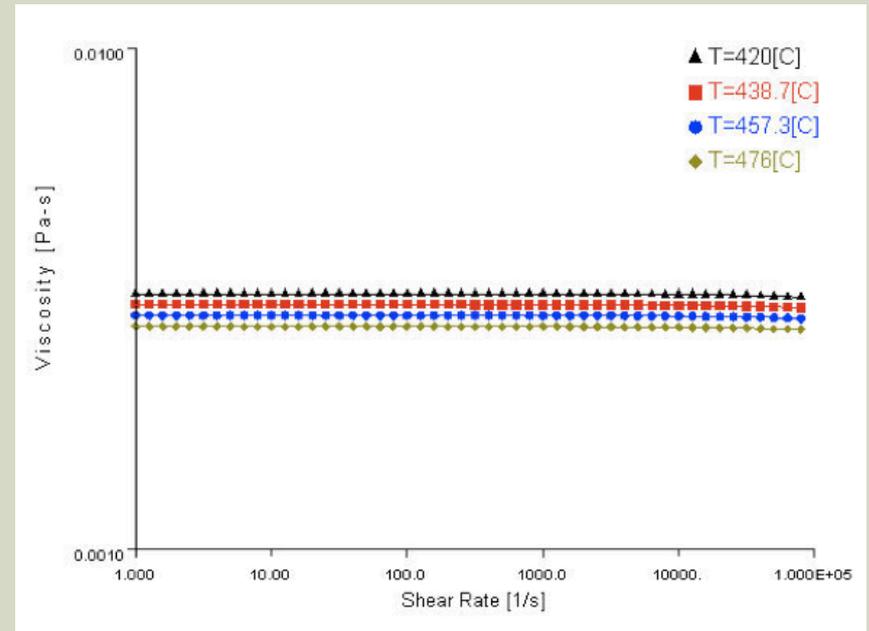
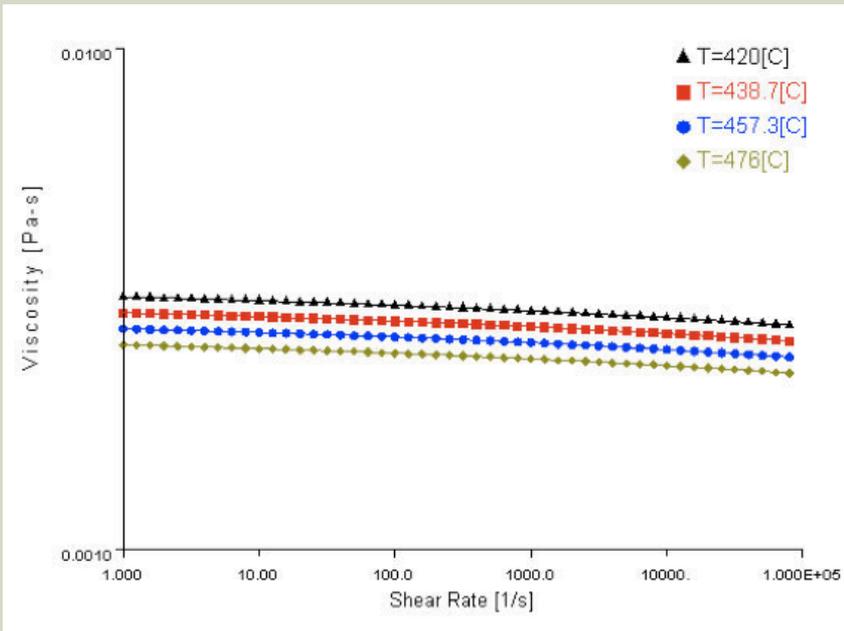
- SIMULACIONES
- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

# CONCLUSIONES

- La adaptación de los modelos de Cross-WLF y Tait se ha realizado con éxito
  - Pequeñas discrepancias entre los valores teóricos y los utilizados en las simulaciones por restricciones
    - Restricciones impuestas por el programa
    - Restricciones debidas a la falta o no de más información
  - Más conocimiento = Mejor afinados los modelos = Más diferencias aparecerán entre el caso a) y el caso b) del Modelo de Cross-WLF
    - Zamak mejor modelado, se observan variaciones en los resultados entre modelos
    - Aluminio menos información, el uso de un modelo u otro parece ser indiferente

# CONCLUSIONES

- Dados los resultados:
  - Modelo de Cross-WLF – Caso a) es la mejor opción
    - Las curvas de viscosidad se acercan más a la realidad



# CONCLUSIONES

- La geometría de la pieza es importante
  - Si la pieza es muy pequeña los resultados de las simulaciones muestran comportamientos inusuales
    - Metal solidifica muy rápido
    - Comportamiento que se corresponde con la realidad
    - Comportamiento en sintonía con alguno de los estudios del estado del arte en el que aparecen dificultades a la hora de fabricar micro piezas de plástico

# CONCLUSIONES

- Por tanto:

**MODFLOW se puede usar como simulador de inyecciones de metales líquidos, atendiendo siempre a las restricciones impuestas tanto por el programa como por la información con la que se cuente del material a simular y la geometría de la pieza**

# ÍNDICE

- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

# LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

- Se puede transformar Moldflow en una herramienta multimaterial
  - Estudio profundo del comportamiento del metal líquido
  - Obtención de modelos mucho más precisos
  - Creación de base de datos de materiales debidamente modelados
  - Con un único software se puede trabajar con inyecciones de plásticos y metales
  - Ahorro de licencias
  - Posibilidad de inclusión de nuevo material docente en el máster CAD CAM CIM

# ÍNDICE

- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**