

**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

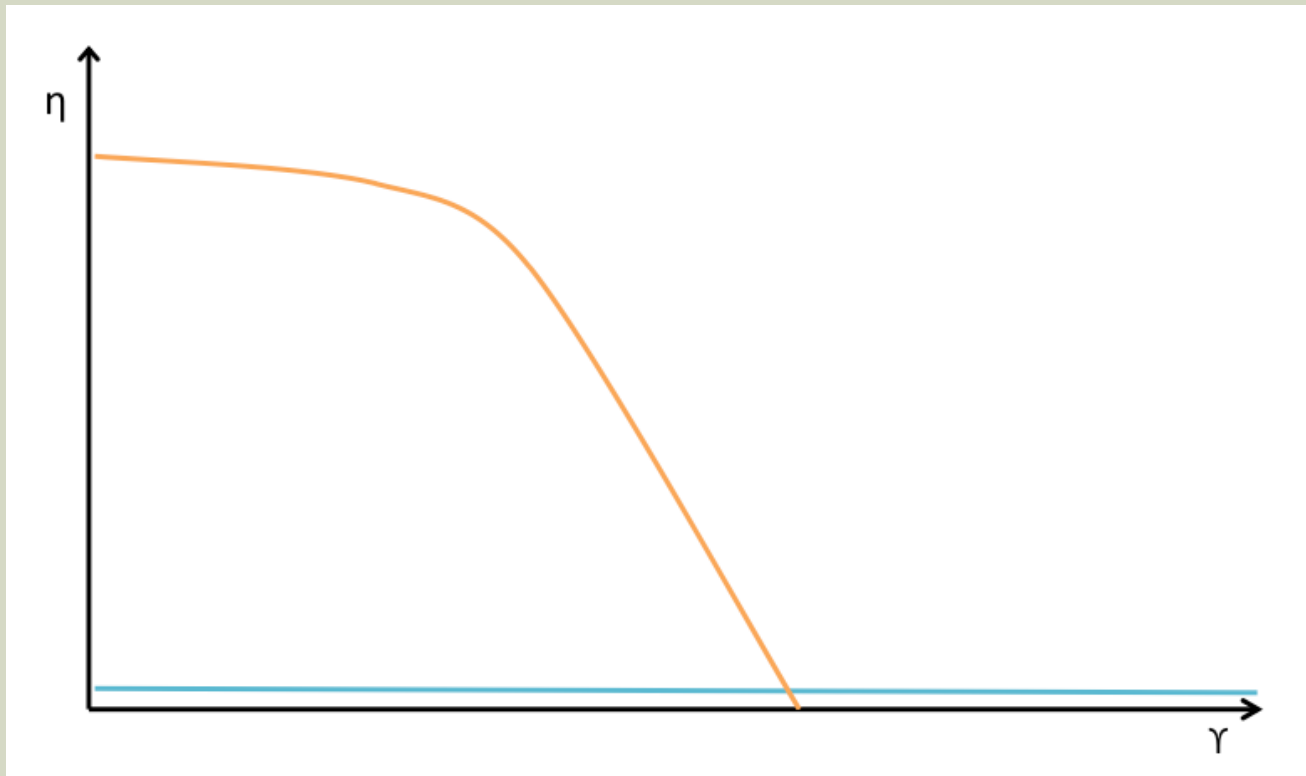
- Elementos capaz de formar cationes fácilmente y cuenta con enlaces metálicos
- En estado líquido: Fluido newtoniano
 - Comportamiento prácticamente newtoniano: Si aumenta la velocidad de cizalla la viscosidad sufre alteraciones mínimas

TERMOPLÁSTICOS Y METALES

DIFERENCIAS

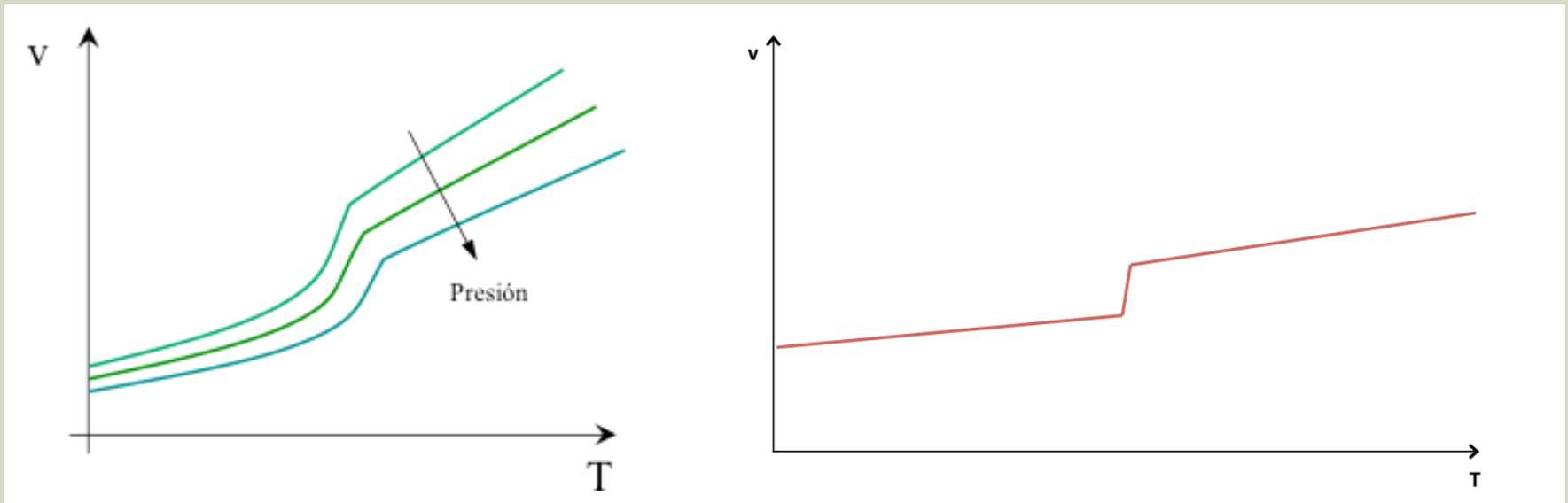
TERMOPLÁSTICOS Y METALES

- Comportamiento viscosidad



TERMOPLÁSTICOS Y METALES

■ Comportamiento pVT



TERMOPLÁSTICOS Y METALES

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

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:

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

η_0 : Viscosidad del material en condiciones de cizalla nula

τ^* : 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

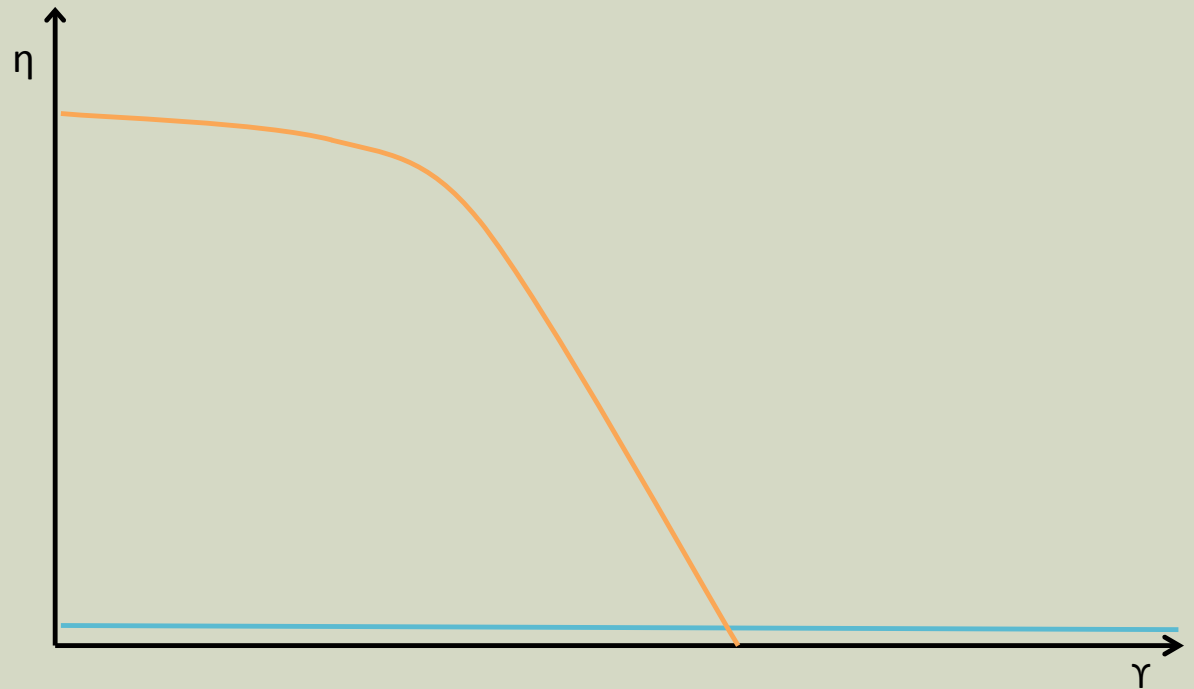
$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

■ 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 τ 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

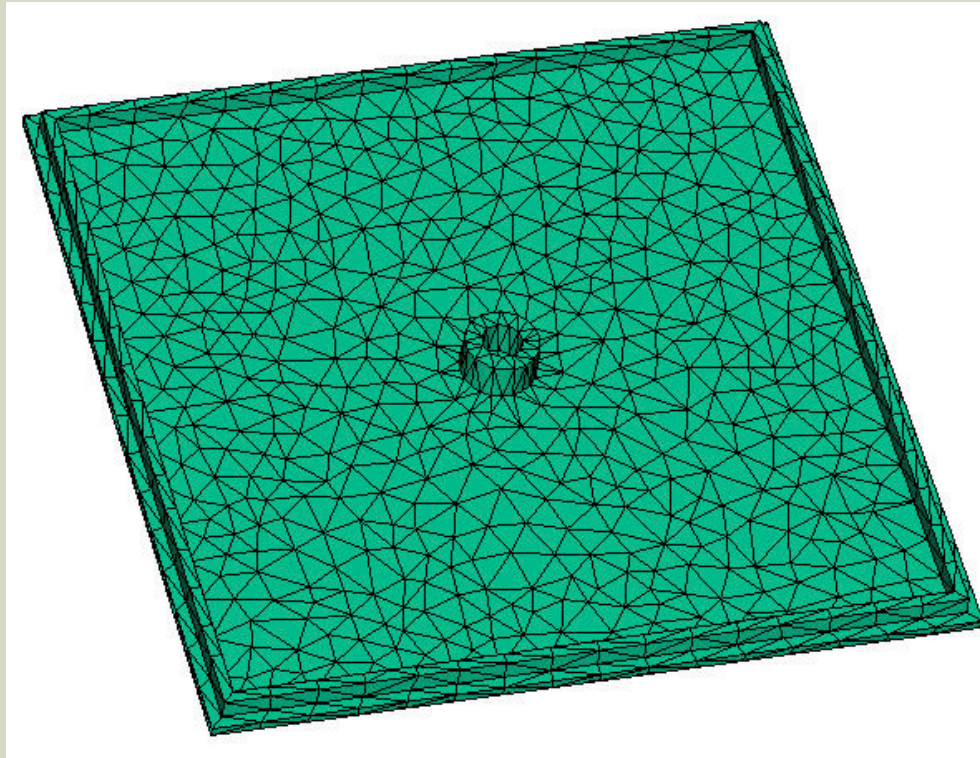
- **MODELOS MATEMÁTICOS**
- **SIMULACIONES**
- **CONCLUSIONES**
- **LINEAS DE TRABAJO FUTURAS**

SIMULACIONES

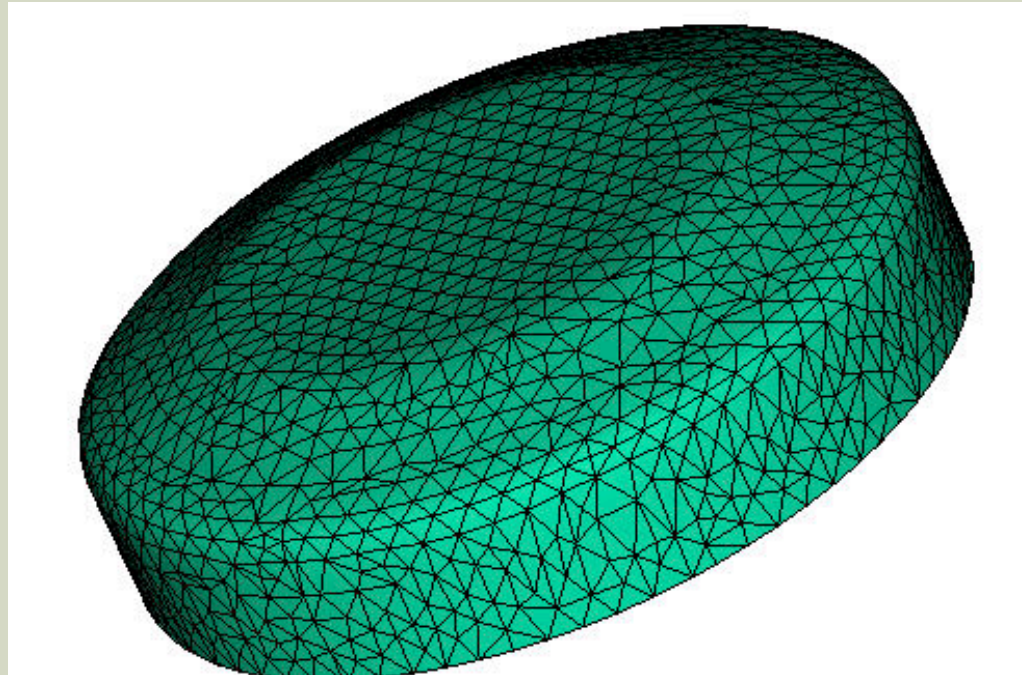
- **Objetivo:** comprobar comportamiento modelos Cross-WLF y Tait
- Se han diseñado tres piezas que han sido sometidas a una serie de simulaciones en Moldflow con distintas condiciones de llenado
- **Dos materiales:** Zamak y aluminio

SIMULACIONES

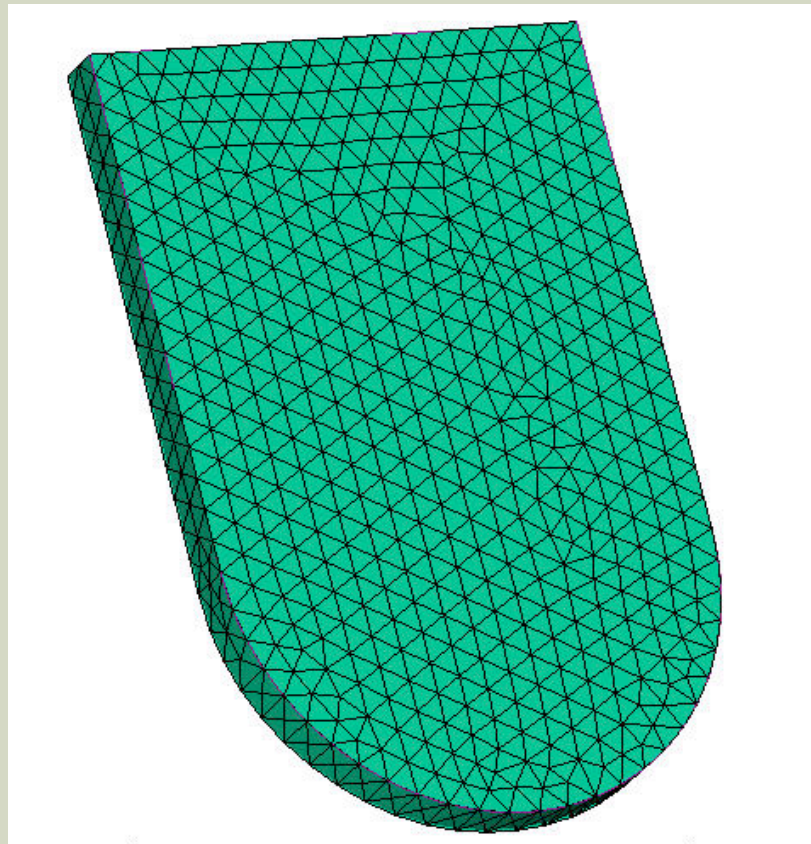
- Piezas:



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

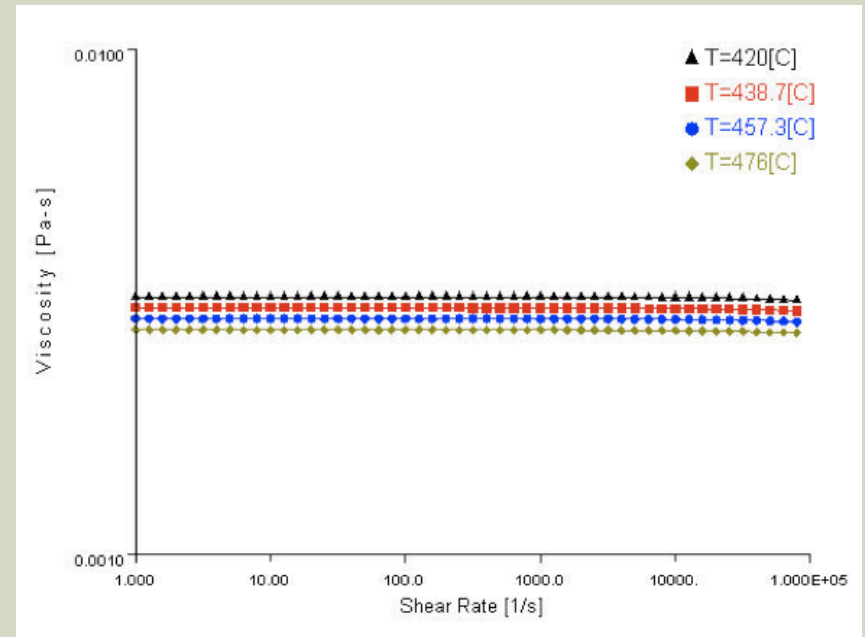
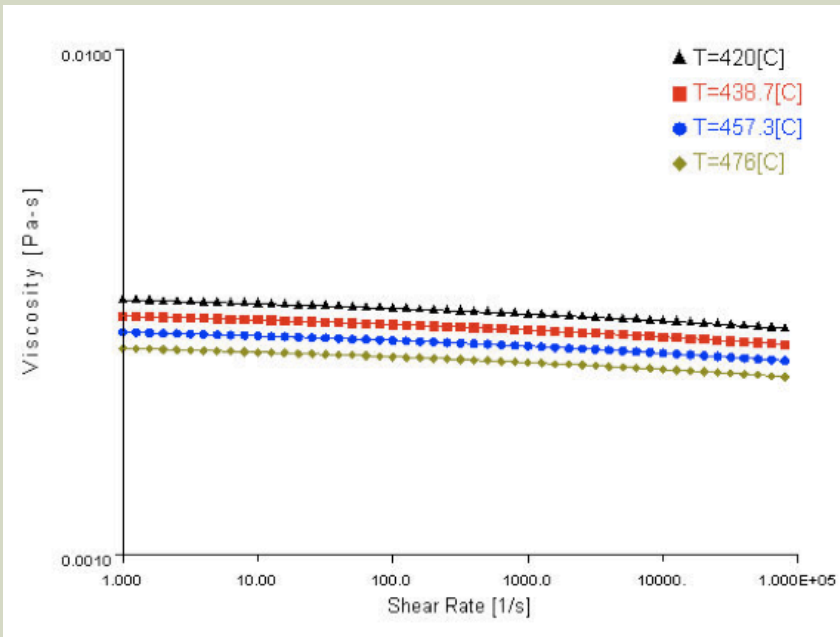
- SIMULACIONES
- CONCLUSIONES
- LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

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