

138

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

MODELADO PARA EL MEJORAMIENTO EN LA INYECCION DE POLIMERO TERMOPLASTICO

292575

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

MONTES DE OCA BALDERAS HORACIO



MEXICO, D. F.

EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA

2001.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente            Prof. Luis Angel López Latorre

Vocal                Prof. Alejandro Rubio Martínez

Secretario           Prof. Marco Antonio Uresti Maldonado

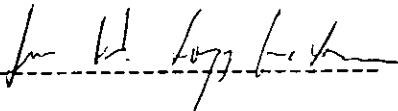
1er. Suplente        Prof. Rodolfo Ruiz Trejo

2°. Suplente         Prof. José Alfredo Tenorio López

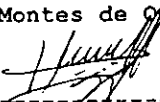
Sitio donde se desarrolló el tema:

Mina # 70 Mzn. 4 Edif 6 Dpto 202 U.H La Norma  
Del. Iztapalapa, C.P. 09300, México, D.F.

Asesor del tema:        Dr. Luis Angel López Latorre

  
-----

Sustentante:            Horacio Montes de Oca Balderas

  
-----

## CONTENIDO

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
2. DESARROLLO TEORICO	
2.1 Consideraciones Generales	7
2.2 Balance Macroscópico de Materia	8
2.3 Balance Macroscópico de Energía Mecánica (Bernoulli)	9
2.4 Balance Macroscópico de Energía Térmica	12
2.5 Resumen del Desarrollo Teórico	13
2.5.1 Proceso de Inyección	13
2.5.2 Proceso de Vaciado de la Cavidad Cilíndrica	16
3. GEOMETRIA Y COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS	
3.1 Volumen de Control	20
3.2 Propiedades Fisicoquímicas	20
3.2.1 Aire	20
3.2.2 Termoplástico Tipo Ley de Potencia	21
4. SIMULACION POR COMPUTADORA	
4.1 Secuencia de Cálculo	23
4.2 Resultados	25
5. DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS	
5.1 Proceso Isotérmico	48
5.2 Proceso Adiabático	49
5.3 Proceso de Inyección	50
6. CONCLUSIONES	52
7. BIBLIOGRAFIA	54
8. APENDICE	55

## 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

En muchas situaciones de flujo de fluidos se utilizan gases para los cuales no es posible suponer procesos a densidad constante. Por lo tanto, es necesario hacer uso de una ecuación de estado y conceptos termodinámicos para describir adecuadamente las condiciones de flujo compresible (Broadkey, 1995).

La ecuación de estado quizá mas utilizada es la del gas ideal que relaciona la presión  $p$ , la temperatura  $T$  y tradicionalmente el volumen específico  $v$ , pero que también puede escribirse en términos de la densidad  $\rho$  como:

$$p = R^* T \rho \quad \dots (1.1)$$

donde  $\rho = \frac{1}{v}$  y  $R^* = \frac{R}{M_w}$  en la que  $R$  es la constante universal de los gases y  $M_w$  el peso molecular del gas (Fermi, 1956). La forma diferencial de la ec.1.1 proporciona:

$$dp = \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho dT + \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T d\rho = R^* \rho dT + R^* T d\rho \quad \dots (1.2)$$

Por otro lado, la primera ley o principio de conservación de la energía en termodinámica clásica para sistemas cerrados en los que no hay trabajo de flecha está dada por:

$$dQ = dU + p dv \quad \dots (1.3)$$

donde  $Q$  es el calor que intercambia el sistema con los alrededores y  $U$  la energía interna.

Las ecuaciones anteriores y otras relaciones de termodinámica clásica también pueden usarse en termodinámica irreversible mediante el principio de reversibilidad microscópica de sistemas que están ligeramente removidos del equilibrio (Castellan, 1987). El presente trabajo no pretende describir la teoría de termodinámica irreversible porque es un tema difícil, sobre todo por el uso que hace del análisis tensorial pero es importante tener en mente la descripción irreversible porque permite usar los balances macroscópicos necesarios para proponer los modelos. Es suficiente entonces entender que en un proceso irreversible no es posible restablecer cada parte del sistema a su estado original a causa de la disipación de energía que ocurre por la fricción durante el flujo (Broadkey, 1995).

Por esto es posible hacer uso de la entalpía  $H$  como función de  $p$  y de  $T$  de tal forma que:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp \quad \dots (1.4)$$

y de  $U$  como función de  $T$  y de  $v$  como:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial U}{\partial v} \right)_T dv \quad \dots (1.5)$$

La ec.1.1 permite simplificar las ecs.1.4 y 1.5 como:

$$dH = Cp dT \quad \dots (1.6)$$

$$dU = Cv dT \quad \dots (1.7)$$

porque sabemos que para gas ideal  $\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = 0$ .  $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$  es la capacidad calorífica a presión constante y  $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$  es la capacidad calorífica a volumen constante.

En todo proceso de transferencia de energía hay dos comportamientos límites y en el caso particular del gas ideal son:

Proceso isotérmico (i.e.,  $dT=0$ ).  $dQ=pdv$  ....(1.8)

Proceso adiabático (i.e.,  $dQ=0$ ).  $C_vdT=-pdv$  ....(1.9)

Por otra parte, el proceso de inyección tiene como objetivo producir artículos (usualmente idénticos) cuando el polímero en estado líquido llena un molde o cavidad que una vez que se ha enfriado adquiera la forma del mismo.

Durante el procesamiento de polímeros las propiedades reológicas de los materiales son muy importantes. La respuesta de los polímeros en estado líquido se describe mediante una ecuación constitutiva que relaciona la velocidad de deformación con el esfuerzo cortante. Esta es característica de cada sustancia aunque su dependencia con la temperatura también es importante (Tadmor y Gogos, 1979).

Debido a la complejidad del comportamiento de los fluidos la mayoría de las ecuaciones constitutivas se obtienen experimentalmente, siendo la minoría las que provienen de modelos moleculares.

La ley de Newton de la viscosidad de un fluido homogéneo es una ecuación constitutiva que describe el comportamiento de los fluidos llamados newtonianos en los cuales la viscosidad es independiente del esfuerzo de corte aplicado y solo depende de la temperatura y presión. Sin embargo, existen distintas clases de sustancias cuyas propiedades reológicas dependen del esfuerzo aplicado o de la deformación resultante. Esta clase de fluidos se les conoce como no-newtonianos puramente viscosos. Dentro de estos los llamados pseudoplásticos son los que a medida que el esfuerzo aplicado aumenta la resistencia al flujo disminuye. En cambio, los fluidos dilatantes oponen mayor resistencia al flujo a medida que el esfuerzo aplicado aumenta (*Id.*).

Los polímeros no son precisamente de este tipo porque su comportamiento real es mucho mas complejo ya que presentan características viscosas y elásticas simultáneamente, pero industrialmente inclusive normalmente se aproximan por el comportamiento pseudoplástico. Debido a que poseen viscosidades elevadas, quizá  $10^6$  mayor comparadas con el agua, su flujo tiende a ser laminar.

### Planteamiento del Problema

Una porción del molde puede esquematizarse por la siguiente figura:



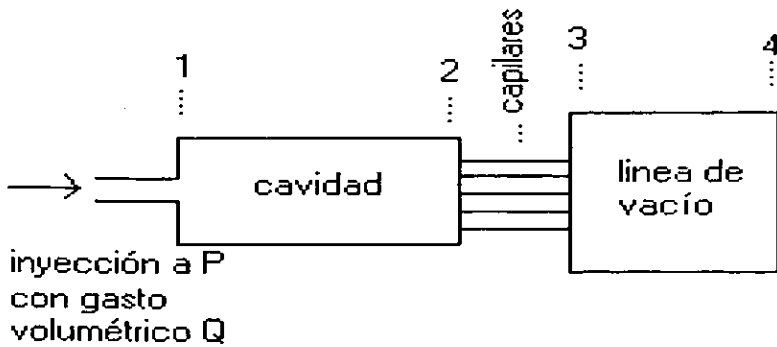


Figura 1

En la figura 1 se tienen:

SECCION 1-2: Cavidad para ser moldeada con volumen total

$$V_{cav} = \pi R_{cav}^2 L_{cav}$$

SECCION 2-3:  $N_{cap}$  tubos capilares cada uno con volumen  $V_{cap} = \pi R_{cap}^2 L_{cap}$  para extraer el aire

SECCION 3-4: Tubería colectora de aire a presión de vacío  $p_3$

La idea principal consiste en suponer que el flujo de aire desde la sección (1,2) a la sección (3,4) a través de los capilares antes de cada ciclo de inyección permite reducir el tiempo de vaciado del aire previo al necesario para introducir el termoplástico en la cavidad entre cada inyección.

Y como la resistencia del aire al flujo a través de los capilares es muy grande debido a que estos tienen un diámetro del orden de 0.125mm, entonces la disipación de energía por fricción podría ser muy importante.

Por lo anterior se establecen los siguientes objetivos.

### Objetivos

1. Proponer dos modelos diferentes de flujo para aire:

(1.a) isotérmico

(1.b) adiabático

2. Utilizar un modelo para la inyección de termoplástico a  $V_{cav}$  en el que el flujo volumétrico será función del tiempo.

3. Contrastar el proceso de inyección estando  $V_{cav}$  a distintas presiones

4. Cambiar las dimensiones del sistema, estudiar los modelos de flujo propuestos y contrastarlos con los primeros.

## 2. DESARROLLO TEORICO

### 2.1) Consideraciones Generales

Las suposiciones primarias para desarrollar los modelos de flujo isotérmico y adiabático de aire son las siguientes:

- El aire se comporta como gas ideal.
- Se comporta como un fluido homogéneo, newtoniano y compresible.
- Las propiedades fisicoquímicas del aire dependen de la temperatura.
- Se considera flujo laminar unidimensional completamente desarrollado por lo que no es necesario tomar en cuenta el desarrollo de perfiles de velocidad.
- No existen efectos de trabajo mecánico.
- El sistema cavidad-capilares-línea de vacío (ver figura 1) se encuentra en posición horizontal de tal manera que la contribución de energía potencial es despreciable.
- Proceso de transferencia de masa en la sección (1,2) a régimen transiente pero con cantidades uniformes en  $V_{cav}$ .
- Proceso de flujo en la sección (2,3) a régimen no transiente.

Para obtener el modelo de flujo de termoplástico se parte de las siguientes suposiciones iniciales:

- Flujo isotérmico, unidimensional, laminar y completamente desarrollado.
- Fluido homogéneo e incompresible que sigue el modelo ley de potencia.

- Para el flujo horizontal en la cavidad no hay efectos de energía potencial.
- La presión en la cavidad es constante durante todo el proceso de llenado.
- Flujo de termoplástico a régimen cuasi transiente.

## 2.2) Balance Macroscópico de Materia

El balance general establece (Bird et al., 1964):

$$\frac{dm_{tot}}{dt} = (\rho v A)_1 - (\rho v A)_2 \quad \dots (2.1)$$

donde  $m_{tot} = \int_V \rho dV$  es la masa total del sistema,  $v$  es la velocidad promedio del fluido,  $A = N_{cap} A_{cap}$  es el área total de la sección de flujo y  $\rho$  la densidad del fluido.

Al vaciar la cavidad el balance de materia transiente en la sección (1,2) vendrá dado por:

$$\frac{dm_{tot}}{dt} = V_{cav} \frac{d\rho_2}{dt} = -(\rho v A)_2 = -\dot{M} = -N_{cap} m \quad \dots (2.2)$$

en donde el volumen de la cavidad es  $V_{cav} = \pi R_{cav}^2 L_{cav}$  y el flujo másico por capilar dado por  $m = \rho v A_{cap} = \rho v \pi R_{cap}^2$ .

En este punto se introducen las siguientes variables adimensionales:

$$M = \frac{m}{\mu_0 L_{cap}} ; \lambda = \frac{L}{L_{cap}} ; \Lambda = \frac{\rho}{\rho_0} ; \theta = \frac{T}{T_0} ; \Pi = \frac{P}{P_0}$$

Por lo tanto, la ec.2.2 se transforma en:

$$\frac{d\Lambda_2}{dt} = -\frac{N_{cap}\mu_0 L_{cap}}{\pi R_{cav}^2 L_{cav} \rho_0} \dot{M} \quad \dots (2.3)$$

En la sección (2,3) se ha supuesto régimen no transiente de tal suerte que la ec.2.1 en términos adimensionales señala que  $\dot{M}_2 = \dot{M}_3 = \text{constante} = \text{cte}$ .

### 2.3) Balance Macroscópico de Energía Mecánica (Bernoulli)

El balance macroscópico integrado para flujo isotérmico está dado por la ecuación (Id.):

$$\frac{d}{dt}(K_{Tot} + \Phi_{Tot} + A_{Tot}) = -\Delta \left[ \left( \frac{1}{2} \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle} + \Phi + \hat{G} \right) m \right] - W - E_v \quad \dots (2.4)$$

y para flujo isoentrópico por:

$$\frac{d}{dt}(K_{Tot} + \Phi_{Tot} + U_{Tot}) = -\Delta \left[ \left( \frac{1}{2} \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle} + \Phi + \hat{H} \right) m \right] - W - E_v \quad \dots (2.5)$$

$W$  es el trabajo mecánico,  $\Phi$  la energía potencial por unidad de masa,  $E_v$  representa la velocidad de disipación de energía a causa

de la fricción dada por  $E_v = \frac{1}{2} \langle v \rangle^2 \frac{f}{R_h} L$  en donde el factor de

fricción de Fanning  $f = \frac{16}{Re} = \frac{16\mu}{\rho v d} = \frac{8\mu}{\rho v R}$ , el radio hidráulico

$R_h = \frac{\text{sección dispnible para el flujo}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{R}{2}$  y la velocidad promedio  $\bar{v} = v$ . A su

vez, el Reynolds está dado por  $Re = \frac{2\rho v R}{\mu}$ . En las ecs.2.4 y 2.5  $\hat{G}$

y  $\hat{H}$  son la energía libre de Gibbs y entalpia por unidad de masa respectivamente; y la energía cinética total  $K_{tot}$  y la energía potencial total  $\Phi_{tot}$ . En la ec.2.4 la energía libre de Helmholtz total  $A_{tot}$  y en la ec.2.5 la energía interna total  $U_{tot}$ .  $A_{tot}$ ,  $U_{tot}$ ,  $K_{tot}$  y  $\Phi_{tot}$  están dadas por:

$$K_{tot} = \iiint \frac{1}{2} \rho v^2 dV \quad ; \quad \Phi_{tot} = \iiint \rho \Phi dV \quad ; \quad A_{tot} = \iiint \rho A dV \quad ; \quad U_{tot} = \iiint \rho U dV$$

Cuando las cantidades  $A_{tot}$ ,  $U_{tot}$ ,  $K_{tot}$  y  $\Phi_{tot}$  son uniformes en  $V$  entonces:

$$K_{tot} = \frac{1}{2} \rho v^2 V \quad ; \quad \Phi_{tot} = \rho \Phi V \quad ; \quad A_{tot} = \rho \hat{A} V \quad ; \quad U_{tot} = \rho \hat{U} V$$

La energía libre de Gibbs por unidad de masa dada por  $d\hat{G} = d\hat{H} - d(T\hat{S})$

que a temperatura constante se transforma en  $d\hat{G} = \frac{dp}{\rho}$ .

Por otro lado, la entalpia viene dada por  $d\hat{H} = d\hat{U} + d(p\hat{V})$  que para un proceso adiabático sin trabajo de flecha se transforma en  $d\hat{H} = \frac{dp}{\rho}$ . Entonces para flujo isotérmico y adiabático en régimen no

transiente, despreciando los efectos de trabajo mecánico y de energía potencial, se obtiene que las ecs.2.4 y 2.5 en forma diferencial nos llevan a:

$$\varepsilon v dv + \frac{dp}{\rho} + \frac{fv^2}{4R} dL = 0 \quad \dots (2.6)$$

donde  $\varepsilon=2$  es el factor de corrección para  $\frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3}$  si el flujo es laminar.

La ec.2.6 es válida independientemente si el flujo es isotérmico o no lo es. Por lo tanto, al introducir la ec.1.2 en la ec.2.6 el Bernoulli se transforma en:

$$\text{para flujo isotérmico } \varepsilon v dv + \frac{TR^*}{\rho} d\rho + \frac{fv^2}{4R} dL = 0 \quad \dots (2.7)$$

$$\text{para flujo adiabático } \varepsilon v dv + \frac{TR^*}{\rho} d\rho + R^* dT + \frac{fv^2}{4R} dL = 0 \quad \dots (2.8)$$

Utilizando  $v = \frac{m}{\rho \pi R_{cap}^2}$ , el factor de fricción de Fanning y las variables adimensionales arriba propuestas, es fácil transformar las ecs.2.7 y 2.8 respectivamente en:

$$-\frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4} M^2 \frac{d\Lambda}{\Lambda} + \rho_0^2 T_0 R^* \theta \Lambda d\Lambda + \frac{8 \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4} M d\lambda = 0 \quad \dots (2.9)$$

$$-M^2 \left( \frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4} \right) \frac{d\Lambda}{\Lambda} + \rho_0^2 T_0 R^* \Lambda^2 d\theta + \rho_0^2 T_0 R^* \theta \Lambda d\Lambda + M \frac{8 \mu_0 \mu L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4} d\lambda = 0 \quad \dots (2.10)$$

Debe ser claro que al inicio del proceso de vaciado el aire está sujeto a las mismas condiciones iniciales. En este instante el

aire comienza a salir; así que, es posible considerar que las pérdidas por fricción son despreciables. Por tanto, para flujo isotérmico y adiabático el Bernoulli al inicio del proceso ( $t=0$ ) estará dado por:

$$v dv + \frac{dp}{\rho} = -\frac{m^2}{\pi^2 R_{cap}^4} \frac{d\rho}{\rho^3} + R^* T \frac{dp}{p} = -\frac{m^2 R^* T^2}{\pi^2 R_{cap}^4} \frac{dp}{p^3} + R^* T \frac{dp}{p} = 0 \quad \text{que en términos}$$

adimensionales se transforma en:

$$-M^2 \frac{R^* T^2 \mu_0^2 I_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4 p_0^2} \frac{d\Pi}{\Pi^3} + R^* T \frac{d\Pi}{\Pi} = 0 \quad \dots (2.11)$$

#### 2.4) Balance Macroscópico de Energía Térmica

Ahora, la ecuación general está dada por (Id.):

$$\frac{d}{dt} (K_{Tot} + \Phi_{Tot} + U_{Tot}) = -\Delta \left[ \left( \frac{1}{2} \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle} + \Phi + \hat{H} \right) m \right] + Q - W \quad \dots (2.12)$$

Donde  $K_{Tot} + \Phi_{Tot} + U_{Tot} = E_{Tot}$  es la energía total del sistema. Como antes se dijo, los términos  $K_{Tot}$ ,  $\Phi_{Tot}$  y  $U_{Tot}$  son las contribuciones totales de energía cinética, potencial e interna respectivamente.

También es claro que a condiciones isotérmicas el balance 2.12 no es necesario. Pero si en la ec.2.12 el trabajo mecánico, el calor y las contribuciones por energía cinética y potencial son despreciables se obtiene entonces el balance adiabático transiente en la sección (1,2) dado por:

$$\frac{d}{dt} (U_{Tot}) = -\Delta [\hat{H}M] = N_{cap} [(\hat{H}M)_1 - (\hat{H}M)_2] = -M_2 \hat{H}_2 = -N_{cap} m_2$$



en donde  $\dot{M}_2 = N_{cop} m_2$  es el flujo total de aire que sale de la cavidad.

Como la densidad  $\rho$  y la energía interna por unidad de masa  $\hat{U}$  son uniformes dentro de la cavidad se tiene que la energía interna total está dada por  $U_{tot} = \iiint \rho \hat{U} dV = \rho_2 \hat{U}_2 V$ . Es por ello que se obtiene

$$\frac{d(\rho_2 \hat{U}_2 V)}{dt} = -N_{cop} m_2 \left( \hat{H}_2 + \frac{p_2}{\rho_2} \right) \text{ y como } \frac{d(V \rho_2)}{dt} = -N_{cop} m_2 \text{ entonces se llega a}$$

$$d\hat{U}_2 = \hat{C}_v dT_2 = \frac{p_2}{\rho_2^2} d\rho_2 \text{ que en términos adimensionales está dado por:}$$

$$\frac{d\theta_2}{\theta_2} = \frac{R^*}{\hat{C}_v} \frac{d\Lambda_2}{\Lambda_2} \quad \dots (2.13)$$

De manera similar, si en la ec.2.12 el trabajo mecánico, el calor y las contribuciones por energía cinética y potencial son despreciables se obtiene entonces que el balance diferencial de energía térmica en régimen no transiente aplicado en la sección

$$(2,3) \text{ estará dado por } \varepsilon v dv + d\hat{H} = -\frac{\varepsilon n^2}{\pi^2 R_{cop}^4} \frac{d\rho}{\rho^3} + \hat{C}_p dT = 0 \text{ y en términos}$$

adimensionales se transforma en:

$$d\theta = M^2 \frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cop}^2}{\pi^2 R_{cop}^4 T_0 \rho_0^2 \hat{C}_p} \frac{d\Lambda}{\Lambda^3} \quad \dots (2.14)$$

## 2.5) Resumen del Desarrollo Teórico

### 2.5.1) Proceso de Inyección

La ecuación constitutiva para fluido ley de potencia está dada por  $\bar{\tau} = -m\gamma^{n-1}\bar{\gamma}$  donde  $\gamma$  es la velocidad de corte,  $m$  y  $n$  son parámetros característicos del material (Tadmor y Gogos, 1979). Para fluido incompresible en flujo unidimensional completamente desarrollado la ecuación de continuidad se reduce a  $\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$  que implica  $v_z = cte$ .

Además, la ecuación de movimiento indica que  $\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_r)}{\partial r}$ ,  $p$  depende únicamente de  $z$  mientras que el lado derecho de la ecuación anterior depende solo de  $r$ . Por lo tanto las derivadas parciales se transforman en derivadas totales de tal suerte que al integrar se obtiene:

$$\tau_r = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dz} + c_1 \quad \dots (2.15)$$

donde  $c_1$  es la constante de integración.

El único componente de velocidad distinto de cero es  $v_z$  de manera que la ecuación constitutiva se reduce a  $\tau_r = -m \left| \frac{dv_z}{dr} \right|^{n-1} \frac{dv_z}{dr}$  que al

sustituirla en la ec. 2.15 conduce a  $-m \left| \frac{dv_z}{dr} \right|^{n-1} \frac{dv_z}{dr} = \frac{r}{2} \left( \frac{dp}{dz} \right)$ . Para flujo

a través de tubería  $\frac{dv_z}{dr} \leq 0$ ; por lo tanto  $\left| \frac{dv_z}{dr} \right| = -\frac{dv_z}{dr}$  que conduce a

$\left( -\frac{dv_z}{dr} \right) = \left( -\frac{r}{2m} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n}$  con  $s=1/n$ . Esta ecuación puede ser integrada con

la condición de frontera dada por  $v_z(r=R_{cav})=0$  para obtener:

$$v_z(r) = \left( \frac{R_{cav}}{s+1} \right) \left[ -\frac{R_{cav}}{2m} \frac{dp}{dz} \right]^s \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_{cav}} \right)^{s+1} \right] \quad \dots (2.16)$$

El flujo volumétrico es  $Q = \int_0^{R_{cav}} 2\pi r v_z dr = \frac{\pi R_{cav}^3}{s+3} \left( -\frac{R_{cav}}{2m} \frac{dp}{dz} \right)^s$ . Si la presión en la cavidad y la presión de inyección son constantes el flujo volumétrico es

$$Q(z) = \frac{\pi R_{cav}^3}{s+3} \left( -\frac{R_{cav}}{2m} \frac{\Delta p}{z} \right)^s \quad \dots (2.17)$$

Donde  $\Delta p = p_{cav} - p_{iny}$ ,  $p_{cav}$  es la presión de inyección en  $z=0$ ,  $p_{cav}$  es la presión en la cavidad en  $z=L_{cav}$  y  $z=z(t)$ .

Luego, la posición del frente de flujo dado por el balance de materia en la sección (1,2) es  $\frac{dz(t)}{dt} = \frac{Q(t)}{\pi R_{cav}^2}$ . Resolviendo el balance de materia se llega a:

$$z(t) = \left( \frac{1+n}{1+3n} \right)^{\frac{1}{s}} R_{cav} \left( \frac{P_{iny} - P_{cav}}{2m} \right)^{\frac{1}{s}} t^{\frac{s+1}{s}} \quad \dots (2.18)$$

Sustituyendo la ec.2.18 en 2.17 se obtiene que el flujo volumétrico en función del tiempo viene dado por:

$$Q(t) = \pi R_{cav}^3 \left( \frac{1+n}{1+3n} \right)^{\frac{s}{s+1}} \left( \frac{n}{1+n} \right) \left( \frac{P_{iny} - P_{cav}}{2m} \right)^{\frac{s}{s+1}} \frac{1}{t^{\frac{s+1}{s}}} \quad \dots (2.19)$$

Así que, definiendo la nueva variable adimensional  $\lambda^*(t) = \frac{z(t)}{L_{cav}}$  se obtiene que la posición del frente de flujo en términos adimensionales es

$$\lambda^*(t) = \frac{\left(\frac{1+n}{1+3n}\right)^{\gamma_{(1+n)}} R_{cav} \left(\frac{P_{iny} - P_{cav}}{2m}\right)^{\lambda_{(1+n)}} t^{\gamma_{(1+n)}}}{L_{cav}} \quad \dots (2.20)$$

Cuando  $\lambda^* = 1$  la cavidad se llena.

Por último, el Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{2\pi R_{cav}^3 \left(\frac{1+n}{1+3n}\right)^{\gamma_{(1+n)}} \left(\frac{n}{1+n}\right) \left(\frac{P_{iny} - P_{cav}}{2m}\right)^{\lambda_{(1+n)}} \frac{1}{t^{\lambda_{(1+n)}}} \rho_{poi}}{\pi R_{cav} m \left(\frac{R_{cav} (P_{iny} - P_{cav})}{2mz(t)}\right)^{n-1/n}} \quad \dots (2.21)$$

### 2.5.2) Proceso de Vaciado de la Cavidad Cilíndrica

Como anteriormente se dijo, al inicio del proceso (i.e.,  $t=0$ ) el balance de energía mecánica en la sección (2,3) está dado por

$$-M^2 \frac{R^* T^2 \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4 p_0^2} \int_{\Pi_0=1}^{\Pi_1} \frac{d\Pi}{\Pi^3} + R^* T \int_{\Pi_0=1}^{\Pi_1} \frac{d\Pi}{\Pi} = 0 \text{ de manera que el flujo másico para}$$

flujo isotérmico y abiabático es

$$M = \frac{\sqrt{2\pi^2 R_{cap}^4 p_0^2 \ln \Pi_1}}{\sqrt{R^* T_0 \mu_0^2 L_{cap}^2 \left(\frac{1}{\Pi_1^2} - 1\right)}} \quad \dots (2.22)$$

Cuando  $t > 0$ , el balance de energía mecánica en la sección (2,3) para flujo isotérmico puede ser integrado como:

$$-\frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4} M^2 \int_{\Lambda_2}^{\Lambda_3} \frac{d\Lambda}{\Lambda} + p_0^2 T_0 R^* \theta \int_{\Lambda_2}^{\Lambda_3} \Lambda d\Lambda + \frac{8 \mu_0^{\Lambda_2} L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4} M \int_0^1 d\lambda = 0 .$$

Ecuación que se puede integrar a temperatura constante para obtener el flujo másico a condiciones isotérmicas dado por:

$$\dot{M} = \frac{-\frac{8\mu_0^{\Lambda_1^2} L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4} \pm \sqrt{\left(\frac{8\mu_0^{\Lambda_1^2} L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4}\right)^2 + 4 \frac{\varepsilon\mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4} \ln\left(\frac{\Lambda_3}{\Lambda_2}\right) \left(\frac{\rho_0^2 T_0 R^* \theta}{2}\right) (\Lambda_3^2 - \Lambda_2^2)}}{-2 \frac{\varepsilon\mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4} \ln\left(\frac{\Lambda_3}{\Lambda_2}\right)} \quad \dots (2.23)$$

Y el balance adiabático de energía térmica en la sección (2,3) es

$$\int_{\theta_2}^{\Lambda_3} d\theta = \dot{M}^2 \frac{\varepsilon\mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4 T_0 \rho_0^2 \hat{C}_p} \int_{\Lambda_2}^{\Lambda_3} \frac{d\Lambda}{\Lambda^3}$$

Debido a la complejidad de la ecuación empírica que relaciona la temperatura con la capacidad calorífica se decide evaluar  $\hat{C}_p$  en  $\frac{\theta_2 + \theta_3}{2}$  por lo que es posible sacar  $\hat{C}_p$  de la integral. Con fines numéricos, esto último obligará a establecer un proceso iterativo debido a que se desconoce el valor de  $\theta_3$ .

Por lo tanto, se obtiene que la temperatura adimensional al final de los capilares es

$$\theta_3 = \theta_2 - \frac{\varepsilon\mu_0^2 L_{cap}^2}{2\pi^2 R_{cap}^4 T_0 \rho_0^2 \hat{C}_p} \dot{M}^2 \left( \frac{1}{\Lambda_3^2} - \frac{1}{\Lambda_2^2} \right) \quad \dots (2.24)$$

Por otro lado, se tiene que el balance de energía térmica en la sección (1,2) al ser integrado proporciona la temperatura adimensional en la cavidad. Para un gas ideal se tiene que  $\hat{C}_v = \hat{C}_p - R^*$  con lo que la ec. 2.13 se transforma en

$\int_{\Lambda_0=1}^{\Lambda_2} \frac{d\theta_2}{\theta_2} = \frac{R^*}{\hat{C}_p - R^*} \int_{\Lambda_0=1}^{\Lambda_2} \frac{d\Lambda_2}{\Lambda_2}$  para obtener que la temperatura adimensional dentro de la cavidad es

$$\theta_2 = (\Lambda_2)^{\frac{R^*}{\hat{C}_p - R^*}} \quad \dots (2.25)$$

De nuevo, debido a la complejidad de la ecuación empírica que relaciona la temperatura con la capacidad calorífica se decide evaluar  $\hat{C}_p$  en  $\frac{\theta_0 + \theta_2}{2} = \frac{1 + \theta_2}{2}$  que nuevamente obliga a establecer un proceso iterativo por desconocer  $\theta_2$ .

Si  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  están dadas por:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4}, \quad C_2 = \rho_0^2 R^* T_0, \quad C_3 = \frac{8 \mu_0 \mu L_{cap}^2}{\pi R_{cap}^4}, \quad C_4 = \frac{\varepsilon \mu_0^2 L_{cap}^2}{\pi^2 R_{cap}^4 T_0 \rho_0^2 \hat{C}_p}$$

Se puede ver que al combinar la ec.2.10 con las ecs.2.13, 2.14, 2.24 y 2.25 se obtiene

$$M^2 \left( \frac{C_2 C_4 - 2C_1}{2} \right) \int_{\Lambda_1}^{\Lambda_2} \frac{d\Lambda}{\Lambda} + M^2 \frac{C_2 C_4}{2 \Lambda_2^2} \int_{\Lambda_1}^{\Lambda_2} \Lambda d\Lambda + C_2 \theta_2 \int_{\Lambda_1}^{\Lambda_2} \Lambda d\Lambda + M C_3 \int_0^1 d\lambda = 0 \quad \dots (2.26)$$

Cabe señalar que la viscosidad  $\mu$  en  $C_3$  al igual que la capacidad calorífica  $\hat{C}_p$  en  $C_4$  son funciones de la temperatura y debido a que son relaciones empíricas difícilmente integrables en términos de funciones elementales se evalúan a  $\frac{\theta_2 + \theta_3}{2}$ , lo cual debe tomarse en cuenta para desarrollar el proceso numérico e iterativo de cálculo.

Finalmente al integrar la ec.2.26 se obtiene que el flujo másico en el proceso adiabático es

$$M = \frac{-C_3 \pm \sqrt{C_3^2 - 4 \left( \left( \frac{C_2 C_4 - 2C_1}{2} \right) \ln \left( \frac{\Lambda_3}{\Lambda_2} \right) + \frac{C_2 C_4}{4\Lambda_2^2} (\Lambda_3^2 - \Lambda_2^2) \right) \left( \frac{C_2 \theta_2}{2} (\Lambda_3^2 - \Lambda_2^2) \right)}}{2 \left( \left( \frac{C_2 C_4 - 2C_1}{2} \right) \ln \left( \frac{\Lambda_3}{\Lambda_2} \right) + \frac{C_2 C_4}{4\Lambda_2^2} (\Lambda_3^2 - \Lambda_2^2) \right)} \dots (2.27)$$

El balance de materia transiente en la sección (1,2) viene dado por:

$$\frac{d\Lambda_2}{dt} = - \frac{N_{cap} H_0 L_{cap}}{\pi R_{cav}^2 L_{cav} \rho_0} M \dots (2.3)$$

Al combinar las ecs.2.3 y 2.22 se describe el proceso de vaciado de la cavidad al inicio del mismo.

Por otra parte, al sustituir el flujo másico adimensional a temperatura constante dado por la ec.2.23 en la ec.2.3 se describe el proceso isotérmico de vaciado para  $t > 0$ .

Finalmente, al combinar las ecs.2.3 y 2.27 se describirá el proceso adiabático de vaciado para  $t > 0$ .

Observando el conjunto de ecuaciones desarrolladas es clara la necesidad de elaborar un método numérico de cálculo.

### 3. GEOMETRIA Y COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS

#### 3.1) Volumen de Control

Las dimensiones del sistema de flujo son:

Geometría 1	Geometría 2	
$L_{cap} = 0.02 \text{ m}$	$L_{cap} = 0.02 \text{ m}$	Longitud del capilar
$R_{cap} = 6.25E-05 \text{ m}$	$R_{cap} = 5.0E-05 \text{ m}$	Radio del capilar
$N_{cap} = 20$	$N_{cap} = 20$	Numero de capilares
$R_{cav} = 2.54E-03 \text{ m}$	$R_{cav} = 1.96E-03 \text{ m}$	Radio de la cavidad
$L_{cav} = 0.254 \text{ m}$	$L_{cav} = 0.254 \text{ m}$	Longitud de la cavidad

#### 3.2) Propiedades Fisicoquímicas

##### 3.2.1) Aire

La capacidad calorífica está dada por (Smith et al., 1989):

$$\hat{C}_p(T) = R \left( 3.355 + 5.75 \cdot 10^{-4} T - \frac{1.6 \cdot 10^3}{T^2} \right) \quad \dots (3.1)$$

válida para  $T \in [298K, 2000K]$

Por otro lado, la viscosidad viene dada por (Reid et al., 1977):

$$\mu(T) = 26.69 \frac{\sqrt{M_w T}}{\sigma^2 \Omega_v} \quad \dots (3.2)$$



$$\Omega_v = \left( \frac{A}{T^B} \right) + \frac{C}{\exp(DT)} + \frac{E}{\exp(FT)} \quad \text{válido para } T \in [0.3, 100]$$

Donde:

$$T_v = \frac{kT}{e}, \quad A = 1.61145, \quad B = 0.14874, \quad C = 0.52487, \quad D = 0.77320, \quad E = 2.16178$$

$$F = 2.43787$$

y

$$\sigma = 3.617 \text{ (Å)} \quad \text{diámetro de la partícula (se asume esfera rígida)}$$

$$\frac{e}{k} = 97.0 \text{ (K)} \quad \text{parámetro de Lenard - Jones}$$

$$M_w = 28.97 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{Kg - mol}} \right) \quad \text{peso molecular del aire}$$

### 3.2.2) Termoplástico Tipo Ley de Potencia

Para polietileno de alta densidad (HDPE) Alathon 7040 producido por Du Pont (Tadmor y Gogos, 1979) se tiene que:

Polimero	Temperatura (K)	Rango de rapidez de corte	$m$ $\left( \frac{Ns^n}{m^2} \right)$	$n$	$\eta_0$ $\left( \frac{Ns}{m^2} \right)$
HDPE	453	100-1000	6.19E03	0.56	2.10E03
Alathon	473	100-1000	4.68E03	0.59	1.52E03
7040	493	100-1000	3.73E03	0.61	1.17E03

Donde:

$\eta_0$  = viscosidad a rapidez de corte cero

Por otra parte, la densidad está dada por (Id.):

$$1 - \frac{\hat{V}(T, p)}{\hat{V}(T, 0)} = 0.0894 \ln \left[ 1 + \frac{p}{B(T)} \right]$$

$$B(T) = B_0 \exp(-B_1 T)$$

Donde  $V(T, p) = \frac{1}{\rho_{pol}}$  con  $\rho_{pol}$  = densidad del polímero.

Para polietilenos:

$$\hat{V}(T, 0) = \hat{V}_0 \exp(\alpha_1 T) \quad \text{para } T > T_m$$

Polímero	$V_0$ ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	$\alpha_1 \times 10^4$ ( $\text{K}^{-1}$ )	Rango de temperatura (K)
HDPE	0.9172	7.80	415-473

Polímero	$B_0$ (bar)	$B_1 \times 10^3$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	Rango de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
HDPE	1767	4.661	142-200

#### 4. SIMULACION POR COMPUTADORA

Gracias a la complejidad del balance de masa transiente dado por la ec.2.3 resulta inevitable hacer un planteamiento que permita resolver numéricamente dicha ecuación. Para ello, se utiliza el método Runge-Kutta de 4° orden (Hamming, 1986) así como programación en lenguaje Fortran<sup>1</sup> (Chapman, 1995). Por lo tanto, en esta sección se presenta la secuencia de cálculo para resolver el problema de flujo isotérmico, adiabático y de inyección de termoplástico, así como los resultados correspondientes a las simulaciones por computadora.

##### 4.1) Secuencia de Cálculo

Para flujo isotérmico de aire:

1. Fijar condiciones iniciales:  $t(1)=0$ ,  $P_0=100\text{Kpa}$ ,  $T_0=353\text{K}$  y  $P_3=20\text{Kpa}$ ,  $\Delta t$ ,  $I=1$ .
2. Calcular  $\dot{M}(1)$  con ec.2.22 y  $Re(1)$
3.  $I=2$
4. Calcular  $\Lambda_2(2)$  en  $t(2)=t(1)+\Delta t$  con ecs.2.3 y 2.22 utilizando método Runge-Kutta.
5. Con  $\Lambda_2(2)$  calcular:  $\dot{M}(2)$ ,  $P_2(2)$  y  $Re(2)$
6. Calcular  $\Lambda_2(I+1)$  en  $t(I+1)=t(I)+\Delta t$  con ecs.2.3 y 2.23 utilizando método Runge-Kutta.
7. Con  $\Lambda_2(I+1)$  calcular:  $\dot{M}(I+1)$ ,  $P_2(I+1)$  y  $Re(I+1)$
8.  $I=I+1$
9. Si  $Re(I) \geq 1E-6$ , entonces regresa a 6.
10. Fin

---

<sup>1</sup> Los programas se muestran en el apéndice

Para flujo adiabático de aire:

1. Fijar condiciones iniciales:  $t(1)=0$ ,  $P_c=100\text{Kpa}$ ,  $T_0=353\text{K}$  y  $P_3=20\text{Kpa}$ ,  $\Delta t$ ,  $I=1$ .
2. Calcular  $M(1)$  con ec.2.22 y Re(1)
3.  $I=2$
4. Calcular  $\Lambda_2(2)$  en  $t(2)=t(1)+\Delta t$  con ecs.2.3 y 2.22 utilizando método Runge-Kutta.
5. Suponer  $\theta_2(2)$
6.  $\theta'_2(2)=\theta_2(2)$
7. Calcular  $C_v$  en  $(1+\theta'_2(2))/2$
8. Con  $\Lambda_2(2)$  calcular:  $\theta_2(2)$
9. Si  $|\theta'_2(2)-\theta_2(2)| \geq 1E-6$ , entonces regresa a 6.
10. Suponer  $\theta_3(2)$
11.  $\theta'_3(2)=\theta_3(2)$
12. Calcular  $C_p$  y  $\mu$  en  $(\theta_2(2)+\theta'_3(2))/2$
13. Con  $\Lambda_2(2)$  calcular:  $M(2)$  con ec.2.27
11. Con  $\Lambda_2(2)$  y  $M(2)$  calcular:  $\theta_3(2)$  y  $\Lambda_3(2)$  con ec.2.24
12. Si  $|\theta'_3(2)-\theta_3(2)| \geq 1E-6$ , entonces regresa a 11.
13. Con  $\Lambda_2(2)$  y  $M(2)$  calcular:  $P_2(2)$  y Re(2)
14. Calcular  $\Lambda_2(I+1)$  en  $t(I+1)=t(I)+\Delta t$  con ecs.2.3 y 2.27 utilizando método Runge-Kutta.
15. Suponer  $\theta_2(I+1)$
16.  $\theta'_2(I+1)=\theta_2(I+1)$
17. Calcular  $C_v$  en  $(1+\theta'_2(I+1))/2$
18. Con  $\Lambda_2(I+1)$  calcular:  $\theta_2(I+1)$
19. Si  $|\theta'_2(I+1)-\theta_2(I+1)| \geq 1E-6$ , entonces regresa a 16.
20. Suponer  $\theta_3(I+1)$

21.  $\theta'_3(I+1) = \theta_3(I+1)$
22. Calcular  $C_p$  y  $\mu$  en  $(\theta_3(I+1) + \theta'_3(I+1))/2$
23. Con  $\Lambda_2(I+1)$  calcular:  $M(I+1)$  con ec.2.27
24. Con  $\Lambda_2(I+1)$  y  $M(I+1)$  calcular:  $\theta_3(I+1)$  y  $\Lambda_3(I+1)$  con ec.2.24
25. Si  $|\theta'_3(I+1) - \theta_3(I+1)| \geq 1E-6$ , entonces regresa a 21.
26. Con  $\Lambda_2(I+1)$  y  $M(I+1)$  calcular:  $P_2(I+1)$  y  $Re(I+1)$
27.  $I = I + 1$
28. Si  $Re(I) \geq 1E-6$ , entonces regresa a 14.
29. Fin

Para flujo de termoplástico:

1. Fijar  $I=1$ ,  $\Delta t$ ,  $P_{iny}=20.6\text{MPa}$ ,  $P_{cav}=20\text{KPa}$ ,  $T_{pol}453\text{K}$ ,  $t(1)=0$ ,  $\lambda^*(1)=0$ ,  
 $\gamma(1)=\infty$ ,  $Q(1)=\infty$  y  $Re(1)=\infty$
2.  $t(I+1) = t(I) + \Delta t$
3. En  $t(I+1)$  calcular  $\lambda^*(I+1)$ ,  $\gamma(I+1)$ ,  $Q(I+1)$  y  $Re(I+1)$
4.  $I = I + 1$
5. Si  $\lambda^*(I) \leq 1$ , entonces regresa a 2.
6. Fin

#### 4.2) Resultados

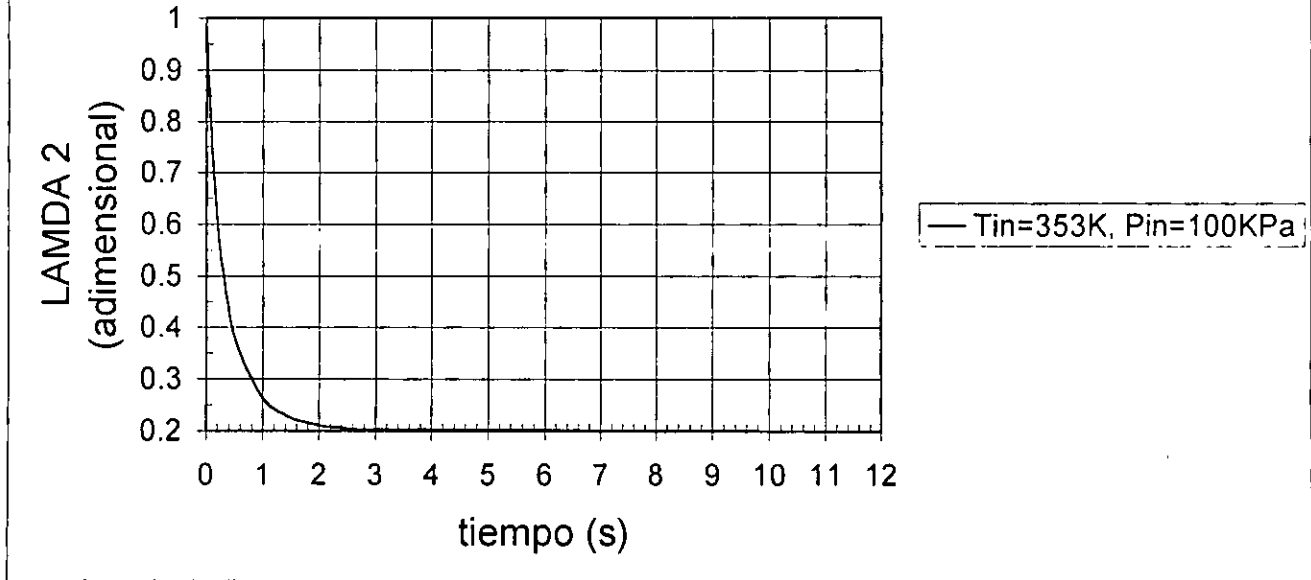
TABLA 1

$P_{1n}=100\text{KPa}$ ,  $T_{1n}=353\text{K}$ ,  $N_{\text{cap}}=20$ ,  $R_{\text{cap}}=0.0625\text{mm}$ ,  $L_{\text{caf}}=20\text{mm}$ ,  $R_{\text{cav}}=2.45\text{mm}$ ,  $l_{\text{cav}}=254\text{mm}$ ,  $P_3=20\text{KPa}$

DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE GEOMETRIA 1

Tiempo [s]	Flujo [g/h]	Presión [KPa]	$A_2$ ----	Reynolds -----
0.0000	71.9253	100.0000	1.0000	671.5314
0.0001	49.5755	99.9620	0.9996	462.8619
0.0091	47.4958	97.2844	0.9728	443.4456
0.0181	45.5099	94.7193	0.9472	424.9034
0.0271	43.6139	92.2617	0.9226	407.2016
0.0361	41.8043	89.9066	0.8991	390.3068
0.0451	40.0777	87.6494	0.8765	374.1864
0.0541	38.4306	85.4857	0.8549	358.8082
0.0631	36.8597	83.4111	0.8341	344.1408
0.0721	35.3616	81.4216	0.8142	330.1536
0.0811	33.9331	79.5132	0.7951	316.8167
0.0902	32.5712	77.6821	0.7768	304.1011
0.0992	31.2728	75.9247	0.7592	291.9785
0.1082	30.0349	74.2377	0.7424	280.4217
0.1172	28.8549	72.6176	0.7262	269.4042
0.1262	27.7299	71.0615	0.7106	258.9005
0.1352	26.6573	69.5662	0.6957	248.8862
0.1442	25.6346	68.1290	0.6813	239.3376
0.1532	24.6593	66.7472	0.6675	230.2320
0.1622	23.7292	65.4182	0.6542	221.5477
0.1712	22.8419	64.1395	0.6414	213.2639
0.1802	21.9954	62.9089	0.6291	205.3607
0.1892	21.1877	61.7240	0.6172	197.8191
0.1982	20.4167	60.5829	0.6058	190.6209
0.2072	19.6807	59.4835	0.5948	183.7490
0.2162	18.9778	58.4239	0.5842	177.1868
0.2252	18.3065	57.4024	0.5740	170.9187
0.2343	17.6650	56.4171	0.5642	164.9299
0.2433	17.0520	55.4665	0.5547	159.2062
0.2523	16.4659	54.5491	0.5455	153.7342
0.2613	15.9054	53.6634	0.5366	148.5012
0.2703	15.3692	52.8080	0.5281	143.4952
0.2793	14.8562	51.9815	0.5198	138.7047
0.2883	14.3650	51.1828	0.5118	134.1190
0.2973	13.8947	50.4106	0.5041	129.7277
0.3063	13.4441	49.6638	0.4966	125.5212
0.3153	13.0124	48.9413	0.4894	121.4903
0.3243	12.5985	48.2422	0.4824	117.6262
0.3333	12.2017	47.5654	0.4757	113.9209
0.3423	11.8209	46.9100	0.4691	110.3664
0.5315	6.4710	36.8577	0.3686	60.4162
0.9818	2.1165	26.5999	0.2660	19.7604
1.4321	0.8569	22.8902	0.2289	8.0000
1.8824	0.3788	21.3241	0.2132	3.5364
2.3327	0.1741	20.6188	0.2062	1.6254
2.7830	0.0815	20.2918	0.2029	0.7605
10.5644	0.0000	20.0000	0.2000	0.0000

Gráfica 1  
DESCOMPRESIÓN ISOTERMICA DE AIRE  
GEOMETRIA 1



Gráfica 2  
DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE  
GEOMETRIA 1

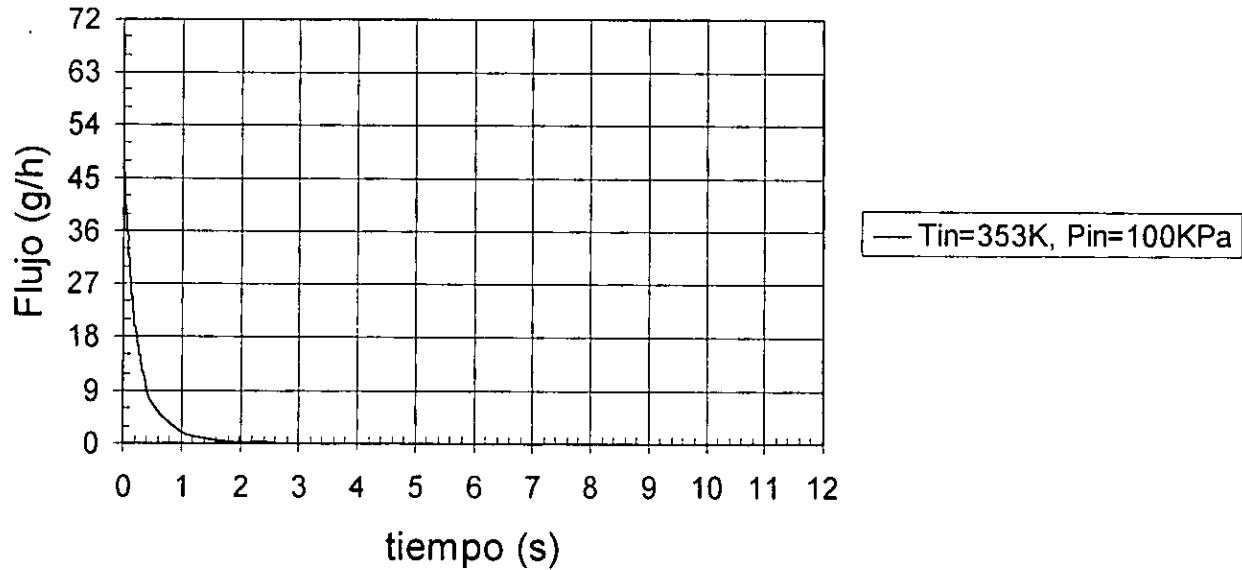




TABLA 2

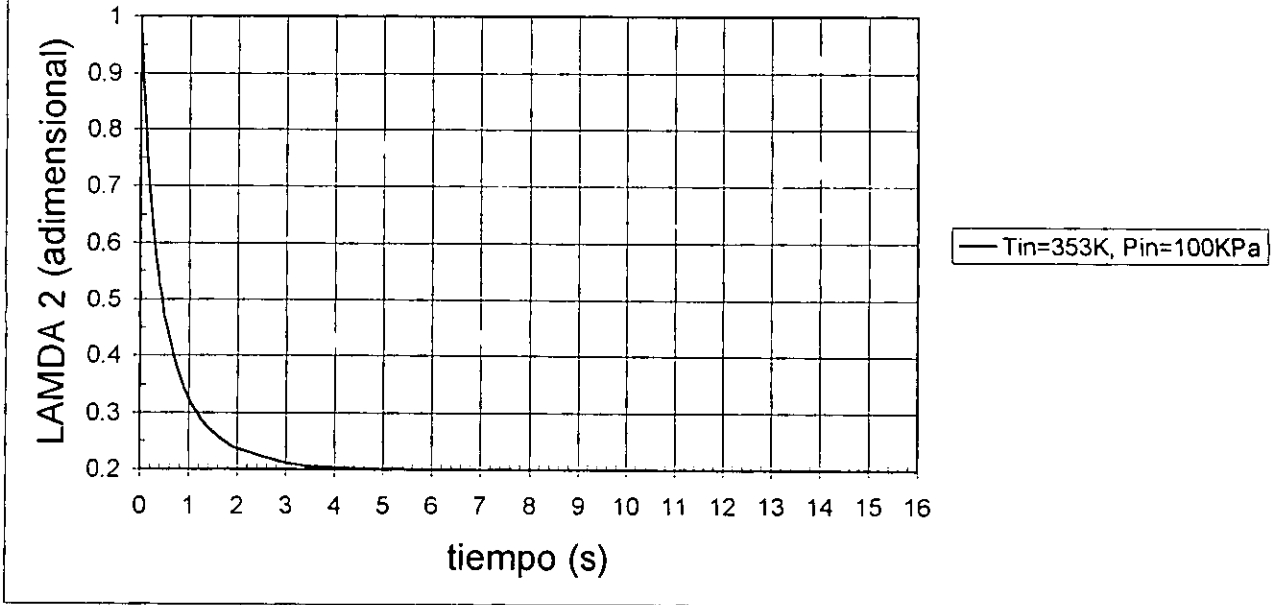
$P_{in}=100\text{KPa}$ ,  $T_{in}=353\text{K}$ ,  $N_{cap}=20$ ,  $R_{cap}=0.05\text{mm}$ ,  $L_{cap}=20\text{mm}$ ,  $R_{cav}=1.96\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_3=20\text{KPa}$

DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE GEOMETRIA 2

Tiempo [s]	Flujo [g/h]	Presión [KPa]	$A_2$ ----	Reynolds -----
0.0000	46.0322	100.0000	1.0000	537.2251
0.0001	23.6602	99.9757	0.9998	276.1293
0.0058	23.1302	98.7107	0.9871	269.9445
0.0116	22.6149	97.4741	0.9747	263.9303
0.0173	22.1137	96.2652	0.9627	258.0816
0.0231	21.6264	95.0831	0.9508	252.3935
0.0289	21.1523	93.9272	0.9393	246.8613
0.0346	20.6913	92.7967	0.9280	241.4805
0.0404	20.2428	91.6908	0.9169	236.2464
0.0462	19.8065	90.6090	0.9061	231.1549
0.0519	19.3821	89.5506	0.8955	226.2015
0.0577	18.9692	88.5150	0.8851	221.3822
0.0635	18.5674	87.5014	0.8750	216.6929
0.0692	18.1764	86.5094	0.8651	212.1299
0.0750	17.7959	85.5384	0.8554	207.6892
0.0808	17.4255	84.5877	0.8459	203.3672
0.0865	17.0651	83.6569	0.8366	199.1604
0.0923	16.7142	82.7454	0.8275	195.0652
0.0980	16.3726	81.8527	0.8185	191.0784
0.1038	16.0400	80.9783	0.8098	187.1967
0.1096	15.7161	80.1217	0.8012	183.4168
0.1153	15.4007	79.2824	0.7928	179.7359
0.1211	15.0935	78.4601	0.7846	176.1508
0.1269	14.7943	77.6542	0.7765	172.6587
0.1326	14.5028	76.8643	0.7686	169.2568
0.1384	14.2188	76.0901	0.7609	165.9425
0.1442	13.9421	75.3310	0.7533	162.7130
0.1499	13.6724	74.5868	0.7459	159.5659
0.1557	13.4096	73.8570	0.7386	156.4987
0.1614	13.1534	73.1413	0.7314	153.5091
0.1672	12.9037	72.4393	0.7244	150.5946
0.1730	12.6602	71.7506	0.7175	147.7532
0.1787	12.4228	71.0750	0.7108	144.9826
0.1845	12.1913	70.4121	0.7041	142.2807
0.1903	11.9655	69.7616	0.6976	139.6455
0.1960	11.7453	69.1232	0.6912	137.0751
0.2018	11.5304	68.4966	0.6850	134.5675
0.2076	11.3208	67.8814	0.6788	132.1210
0.2133	11.1162	67.2775	0.6728	129.7337
0.2191	10.9166	66.6846	0.6668	127.4039
0.2249	10.7218	66.1023	0.6610	125.1299
0.3401	7.6456	56.3531	0.5635	89.2294
0.4554	5.6565	49.2875	0.4929	66.0153
0.5707	4.3117	43.9905	0.4399	50.3209
0.6860	3.3669	39.9092	0.3991	39.2935
0.8013	2.6809	36.6944	0.3669	31.2883
0.9165	2.1691	34.1161	0.3412	25.3149
1.0318	1.7782	32.0177	0.3202	20.7531

1.1471	1.4738	30.2891	0.3029	17.2002
1.2624	1.2327	28.8504	0.2885	14.3865
1.3777	1.0390	27.6430	0.2764	12.1261
1.4929	0.8815	26.6222	0.2662	10.2878
1.6082	0.7521	25.7540	0.2575	8.7769
1.7235	0.6447	25.0118	0.2501	7.5236
1.8388	0.5549	24.3744	0.2437	6.4758
1.9540	0.4793	23.8248	0.2382	5.5936
2.9916	0.1417	21.2014	0.2120	1.6535
3.9138	0.0515	20.4450	0.2045	0.6014
4.9513	0.0170	20.1476	0.2015	0.1980
5.9888	0.0056	20.0492	0.2005	0.0658
6.9111	0.0021	20.0185	0.2002	0.0248
7.9486	0.0007	20.0062	0.2001	0.0083
8.9861	0.0002	20.0021	0.2000	0.0028
9.9083	0.0001	20.0008	0.2000	0.0010
15.8568	0.0000	20.0000	0.2000	0.0000

Gráfica 3  
DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE  
GEOMETRIA 2



Gráfica 4  
DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE  
GEOMETRIA 2

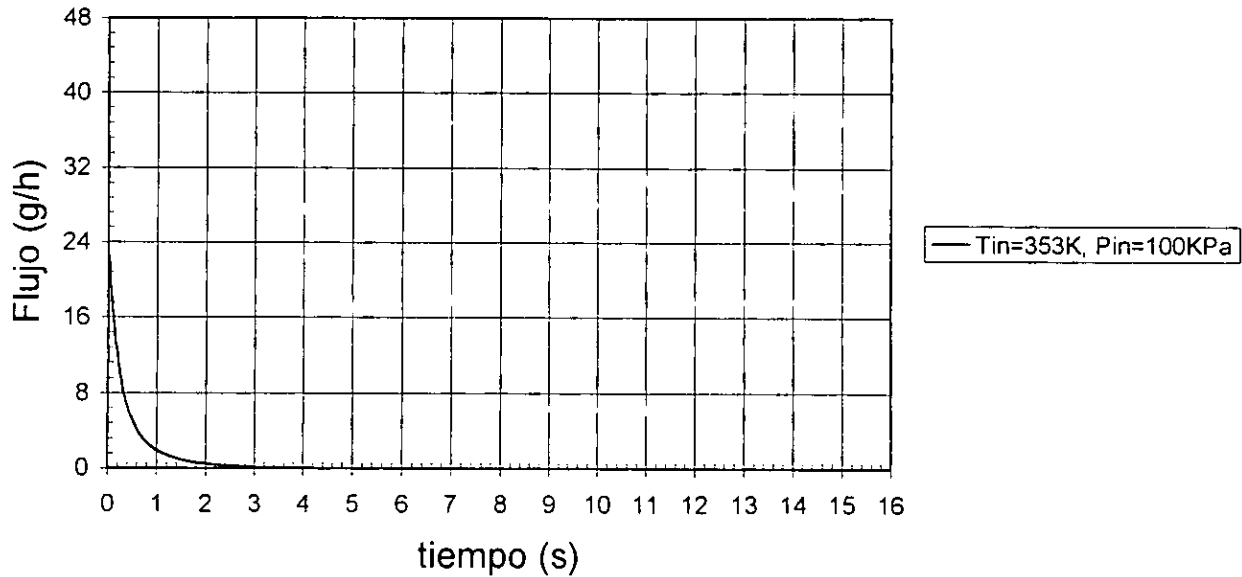


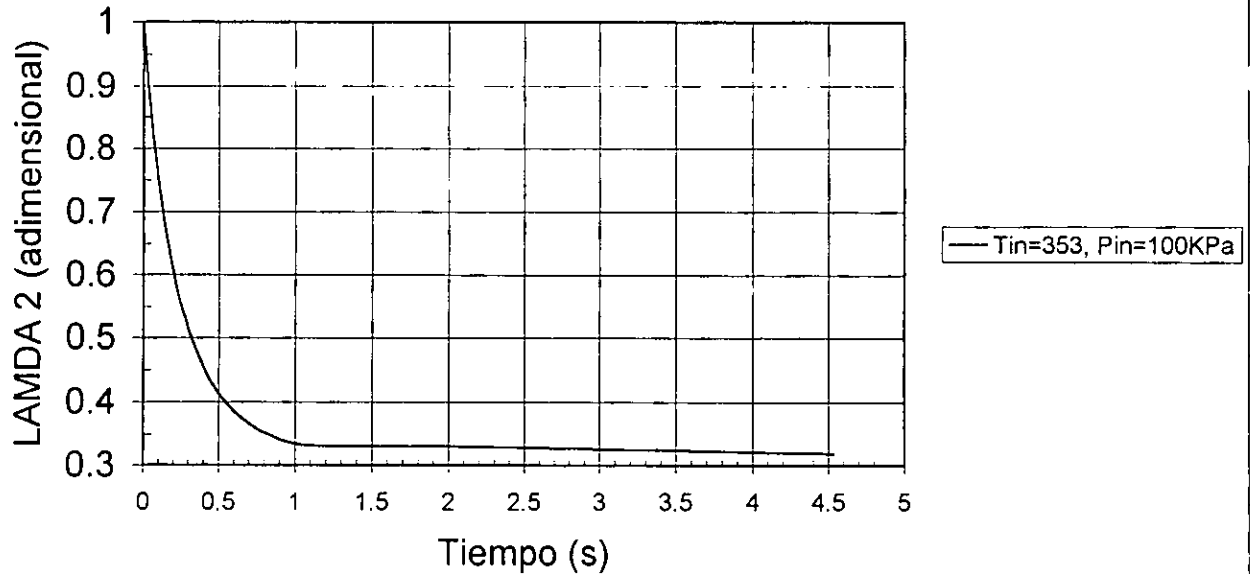
TABLA 3

$P_{1n}=100\text{KPa}$ ,  $T_{1n}=353\text{K}$ ,  $N_{cap}=20$ ,  $R_{cap}=0.0625\text{mm}$ ,  $L_{cap}=20\text{mm}$ ,  $R_{cav}=2.45\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_3=20\text{KPa}$

DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE GEOMETRIA 1

Tiempo [s]	Flujo [g/h]	Presión [KPa]	Temp 2 K	Temp 3 K	$\Lambda_2$ ----	$\Lambda_3$ ----	Reynolds -----
0.0000	71.9253	100.0000	353.0000	-----	1.0000	-----	671.5314
0.0001	56.5207	99.9470	352.9473	287.9266	0.9996	0.2452	565.6651
0.0002	56.4879	99.9054	352.9058	287.9509	0.9993	0.2452	565.3487
0.0092	53.3413	95.8845	348.8369	290.1665	0.9703	0.2433	534.9760
0.0182	50.4135	92.1275	344.9172	292.2644	0.9429	0.2416	506.6580
0.0272	47.7072	88.6115	341.1384	293.6906	0.9169	0.2404	480.7459
0.0362	45.1915	85.3169	337.4937	294.7655	0.8924	0.2395	456.7352
0.0452	42.8496	82.2260	333.9768	295.5197	0.8691	0.2389	434.4435
0.0542	40.6665	79.3226	330.5817	295.9834	0.8470	0.2385	413.7082
0.0632	38.6286	76.5922	327.3028	296.1858	0.8261	0.2384	394.3839
0.0722	36.7238	74.0219	324.1349	296.1546	0.8061	0.2384	376.3410
0.0812	34.9411	71.5995	321.0731	295.9164	0.7872	0.2386	359.4641
0.0902	33.2706	69.3144	318.1128	295.4956	0.7692	0.2389	343.6499
0.0992	31.7032	67.1567	315.2497	294.9150	0.7520	0.2394	328.8063
0.1083	30.2309	65.1173	312.4797	294.1957	0.7356	0.2400	314.8512
0.1173	28.8464	63.1881	309.7990	293.3566	0.7200	0.2407	301.7107
0.1263	27.5430	61.3615	307.2040	292.4152	0.7051	0.2414	289.3190
0.1353	26.3147	59.6307	304.6913	291.3870	0.6909	0.2423	277.6167
0.1443	25.1560	57.9894	302.2577	290.2862	0.6772	0.2432	266.5507
0.1533	24.0619	56.4317	299.9001	289.1252	0.6642	0.2442	256.0729
0.1623	23.0278	54.9523	297.6157	287.9152	0.6518	0.2452	246.1400
0.1713	22.0496	53.5464	295.4018	286.6662	0.6399	0.2463	236.7128
0.1803	21.1234	52.2092	293.2558	285.3870	0.6285	0.2474	227.7559
0.1893	20.2458	50.9368	291.1751	284.0853	0.6175	0.2485	219.2370
0.1983	19.4135	49.7250	289.1576	282.7678	0.6070	0.2497	211.1267
0.2073	18.6236	48.5704	287.2009	281.4407	0.5970	0.2509	203.3983
0.2163	17.8734	47.4697	285.3029	280.1090	0.5873	0.2520	196.0274
0.2253	17.1604	46.4197	283.4617	278.7773	0.5781	0.2532	188.9916
0.2343	16.4823	45.4174	281.6752	277.4496	0.5692	0.2545	182.2702
0.2433	15.8369	44.4604	279.9417	276.1293	0.5606	0.2557	175.8446
0.2524	15.2223	43.5460	278.2594	274.8191	0.5524	0.2569	169.6971
0.2614	14.6366	42.6719	276.6265	273.5218	0.5445	0.2581	163.8119
0.2704	14.0781	41.8360	275.0416	272.2394	0.5369	0.2593	158.1742
0.2884	13.0368	40.2706	272.0092	269.7262	0.5226	0.2617	147.5871
0.2974	12.5510	39.5374	270.5588	268.4981	0.5158	0.2629	142.6132
0.3154	11.6431	38.1618	267.7829	266.1045	0.5031	0.2653	133.2499
0.3244	11.2186	37.5163	266.4548	264.9403	0.4970	0.2665	128.8408
0.3424	10.4234	36.3032	263.9121	262.6800	0.4856	0.2688	120.5230
0.3602	9.7042	35.2017	261.5483	260.5440	0.4751	0.2710	112.9310
0.4502	6.8233	30.7628	251.4275	250.7282	0.4319	0.2816	81.7631
0.5403	4.8791	27.7203	243.8481	243.4655	0.4013	0.2900	59.8075
0.6303	3.5267	25.5890	238.1641	237.9262	0.3793	0.2967	44.0024
0.7204	2.5828	24.0694	233.8946	234.1053	0.3633	0.3016	32.6504
0.8105	1.8895	22.9735	230.6902	230.8826	0.3515	0.3058	24.1401
1.0807	0.7529	21.1775	225.1862	225.3299	0.3320	0.3133	9.7996
2.1614	0.0194	20.0531	221.5629	221.3136	0.3195	0.3190	0.2557
4.5369	0.0000	20.0000	221.4617	221.2149	0.3191	0.3191	0.0000

Gráfica 5  
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE  
GEOMETRIA 1



Gráfica 6  
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE  
GEOMETRIA 1

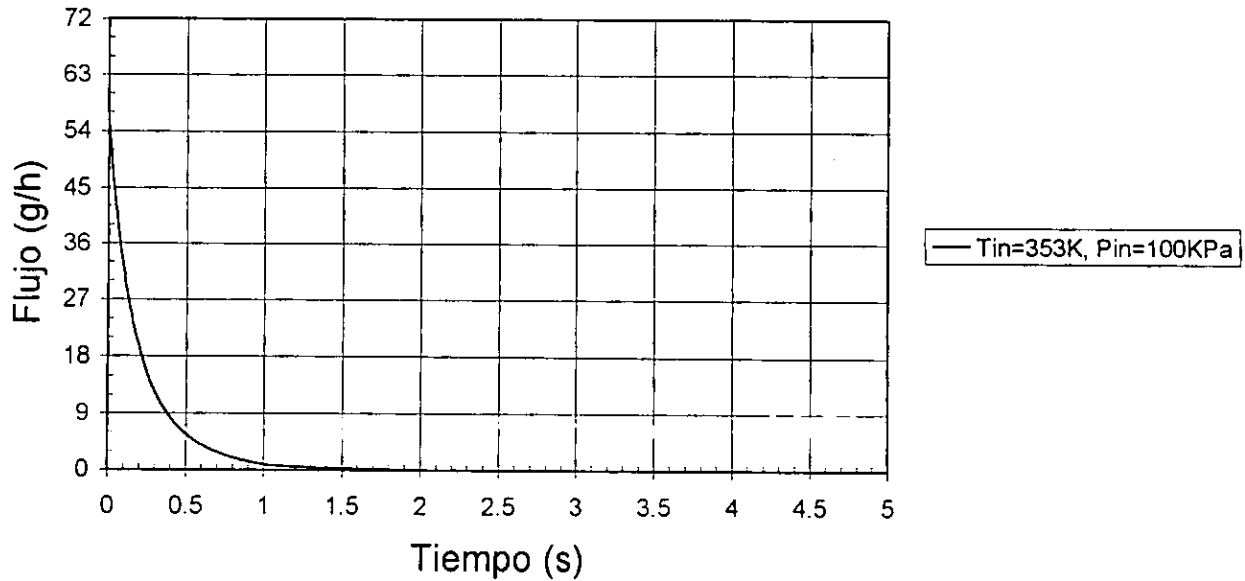


TABLA 4

$P_{1n}=100\text{KPa}$ ,  $T_{1n}=353\text{K}$ ,  $N_{cap}=20$ ,  $R_{cap}=0.05\text{mm}$ ,  $L_{cap}=20\text{mm}$ ,  $R_{cav}=1.96\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_j=20\text{KPa}$

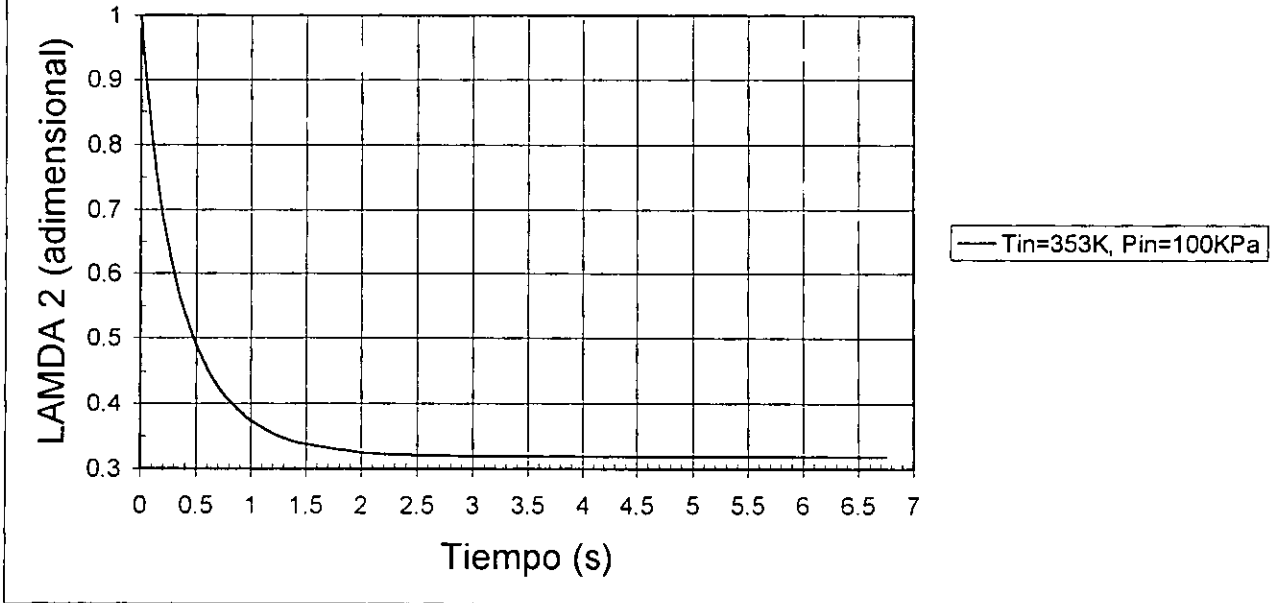
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE GEOMETRIA 2

Tiempo [s]	Flujo [g/h]	Presión [KPa]	Temp 2 K	Temp 3 K	$\Lambda_2$	$\Lambda_3$	Reynolds
0.0000	46.0322	100.0000	353.0000	-----	1.0000	-----	537.2251
0.0001	25.4619	99.9661	352.9663	314.5201	0.9998	0.2245	309.3249
0.0001	25.4547	99.9474	352.9476	314.5229	0.9996	0.2245	309.2432
0.0059	24.7527	98.1036	351.0980	314.7609	0.9864	0.2243	301.2374
0.0116	24.0780	96.3192	349.2829	314.9171	0.9734	0.2242	293.5522
0.0174	23.4292	94.5917	347.5014	314.9968	0.9609	0.2241	286.1699
0.0232	22.8050	92.9185	345.7524	315.0048	0.9487	0.2241	279.0738
0.0289	22.2042	91.2975	344.0350	314.9461	0.9368	0.2242	272.2486
0.0347	21.6256	89.7263	342.3485	314.8250	0.9252	0.2243	265.6797
0.0405	21.0682	88.2029	340.6919	314.6459	0.9139	0.2244	259.3538
0.0462	20.5309	86.7254	339.0645	314.4131	0.9029	0.2245	253.2581
0.0520	20.0128	85.2918	337.4655	314.1302	0.8922	0.2247	247.3809
0.0578	19.5130	83.9005	335.8941	313.8011	0.8817	0.2250	241.7111
0.0635	19.0306	82.5497	334.3497	313.4293	0.8715	0.2253	236.2384
0.0693	18.5648	81.2379	332.8316	313.0180	0.8616	0.2255	230.9531
0.0750	18.1148	79.9635	331.3391	312.5703	0.8519	0.2259	225.8461
0.0808	17.6800	78.7251	329.8716	312.0893	0.8424	0.2262	220.9088
0.0866	17.2597	77.5214	328.4284	311.5776	0.8332	0.2266	216.1332
0.0923	16.8532	76.3511	327.0090	311.0379	0.8242	0.2270	211.5118
0.0981	16.4600	75.2128	325.6128	310.4725	0.8154	0.2274	207.0376
0.1039	16.0794	74.1055	324.2393	309.8838	0.8068	0.2278	202.7038
0.1096	15.7110	73.0280	322.8879	309.2740	0.7984	0.2283	198.5041
0.1154	15.3542	71.9792	321.5581	308.6449	0.7902	0.2287	194.4328
0.1212	15.0085	70.9582	320.2494	307.9985	0.7821	0.2292	190.4841
0.1269	14.6735	69.9638	318.9614	307.3365	0.7743	0.2297	186.6529
0.1327	14.3487	68.9953	317.6936	306.6606	0.7666	0.2302	182.9341
0.1385	14.0338	68.0517	316.4455	305.9723	0.7591	0.2307	179.3231
0.1442	13.7283	67.1322	315.2168	305.2730	0.7518	0.2313	175.8154
0.1500	13.4318	66.2359	314.0069	304.5640	0.7446	0.2318	172.4069
0.1557	13.1441	65.3620	312.8155	303.8467	0.7376	0.2324	169.0936
0.1615	12.8647	64.5099	311.6422	303.1220	0.7307	0.2329	165.8716
0.1673	12.5934	63.6788	310.4866	302.3911	0.7240	0.2335	162.7374
0.1730	12.3299	62.8681	309.3484	301.6551	0.7174	0.2340	159.6877
0.1788	12.0738	62.0769	308.2272	300.9148	0.7109	0.2346	156.7192
0.1846	11.8249	61.3048	307.1226	300.1710	0.7046	0.2352	153.8288
0.1903	11.5829	60.5512	306.0343	299.4246	0.6984	0.2358	151.0137
0.1961	11.3475	59.8154	304.9619	298.6763	0.6924	0.2364	148.2711
0.2019	11.1186	59.0969	303.9053	297.9269	0.6864	0.2370	145.5983
0.2076	10.8959	58.3951	302.8640	297.1769	0.6806	0.2376	142.9929
0.2134	10.6791	57.7096	301.8377	296.4269	0.6749	0.2382	140.4525
0.2191	10.4681	57.0399	300.8262	295.6775	0.6693	0.2388	137.9747
0.2249	10.2627	56.3854	299.8292	294.9291	0.6638	0.2394	135.5575
0.2305	10.0686	55.7647	298.8757	294.2047	0.6586	0.2400	133.2686
0.2881	8.3251	50.0903	289.7696	286.8993	0.6102	0.2461	112.4852
0.3458	6.9578	45.5038	281.8303	280.0517	0.5699	0.2521	95.8292
0.4034	5.8669	41.7494	274.8760	273.7720	0.5362	0.2579	82.2439
0.4611	4.9837	38.6432	268.7626	268.0816	0.5075	0.2634	71.0029
0.5187	4.2598	36.0499	263.3731	262.9608	0.4832	0.2685	61.5909



0.5763	3.6599	33.8680	258.6118	258.3713	0.4623	0.2733	53.6324
0.6340	3.1582	32.0203	254.3985	254.2684	0.4443	0.2777	46.8478
0.6916	2.7312	30.4481	250.6698	250.2500	0.4288	0.2821	40.9857
0.7493	2.3728	29.1031	247.3651	247.0207	0.4153	0.2858	35.9618
0.8069	2.0668	27.9470	244.4334	244.1449	0.4036	0.2892	31.6062
0.8645	1.8043	26.9497	241.8314	241.5852	0.3934	0.2922	27.8155
0.9222	1.5781	26.0866	239.5217	239.3080	0.3845	0.2950	24.5059
0.9798	1.3825	25.3377	237.4712	237.2830	0.3766	0.2975	21.6089
1.0375	1.2129	24.6862	235.6508	235.4830	0.3698	0.2998	19.0677
1.0951	1.0718	24.1159	234.0281	234.2664	0.3638	0.3014	16.9274
1.1527	0.9420	23.6170	232.5852	232.8104	0.3584	0.3033	14.9487
1.2104	0.8286	23.1808	231.3049	231.5178	0.3538	0.3049	13.2056
1.2680	0.7294	22.7989	230.1692	230.3707	0.3497	0.3065	11.6687
1.3257	0.6425	22.4640	229.1620	229.3531	0.3460	0.3078	10.3128
1.3833	0.5662	22.1702	228.2690	228.4506	0.3428	0.3090	9.1159
1.4409	0.4992	21.9120	227.4773	227.6504	0.3400	0.3101	8.0589
2.0173	0.1438	20.5435	223.1610	223.2864	0.3250	0.3162	2.3566
2.5937	0.0392	20.1743	221.9605	221.6990	0.3208	0.3184	0.6446
3.1701	0.0116	20.0673	221.6097	221.3574	0.3197	0.3189	0.1907
3.7465	0.0034	20.0357	221.5058	221.2562	0.3193	0.3191	0.0564
4.3229	0.0010	20.0264	221.4750	221.2263	0.3192	0.3191	0.0167
4.8993	0.0003	20.0236	221.4659	221.2174	0.3192	0.3191	0.0049
5.4757	0.0001	20.0228	221.4632	221.2148	0.3192	0.3191	0.0015
6.0521	0.0000	20.0226	221.4624	221.2140	0.3191	0.3191	0.0004
6.7443	0.0000	20.0000	221.4622	221.2138	0.3191	0.3191	0.0000

Gráfica 7  
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE  
GEOMETRIA 2



Gráfica 8  
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE  
GEOMETRIA 2

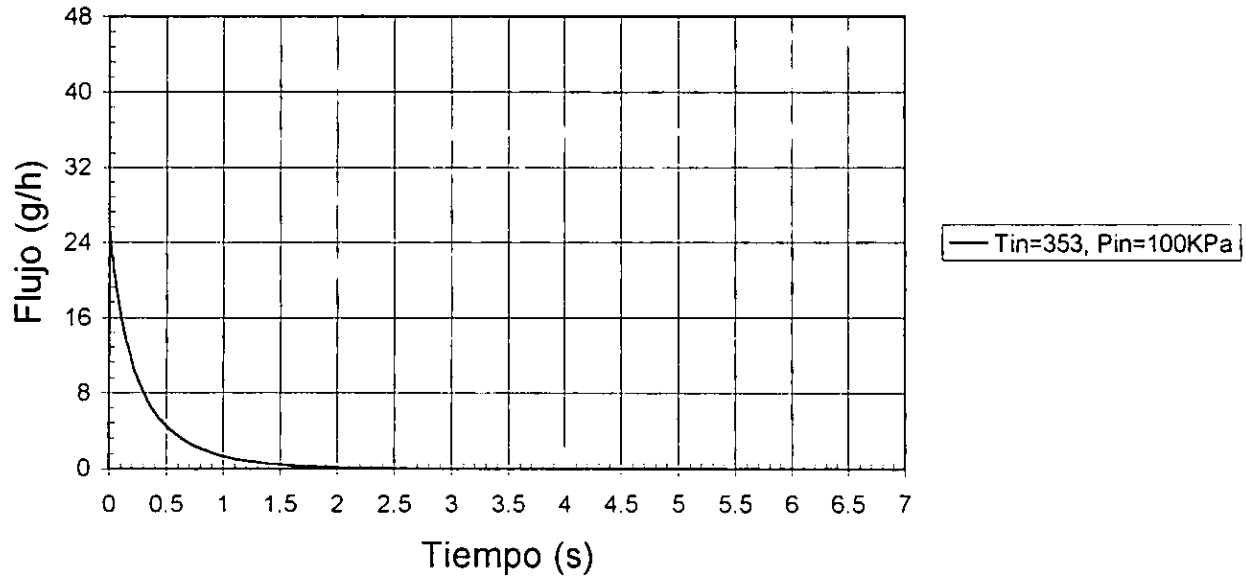


TABLA 5

$P_{iny}=20.6\text{MPa}$ ,  $T_{Pci}=453\text{K}$ ,  $R_{cav}=2.45\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_{cav}=100\text{KPa}$

FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 1

Tiempo [s]	Gasto [m3/s]	Gama [1/s]	Lamda -----	Reynolds -----
0.0000	infinito	infinito	0.0000	infinito
0.0200	2.0995E-05	2204.7840	0.2500	2.3797E-02
0.0400	1.3385E-05	1405.6980	0.3188	1.2335E-02
0.0600	1.0287E-05	1080.3067	0.3675	8.3983E-03
0.0700	9.3072E-06	977.4063	0.3879	7.2564E-03
0.0800	8.5341E-06	896.2270	0.4065	6.3936E-03
0.1000	7.3830E-06	775.3351	0.4396	5.1745E-03
0.1200	6.5587E-06	688.7681	0.4686	4.3531E-03
0.1400	5.9339E-06	623.1622	0.4946	3.7612E-03
0.1600	5.4411E-06	571.4049	0.5183	3.3140E-03
0.1800	5.0405E-06	529.3319	0.5402	2.9639E-03
0.2200	4.4246E-06	464.6619	0.5796	2.4504E-03
0.2400	4.1816E-06	439.1360	0.5975	2.2564E-03
0.2500	4.0722E-06	427.6484	0.6061	2.1707E-03
0.2600	3.9698E-06	416.8946	0.6145	2.0915E-03
0.2700	3.8737E-06	406.8020	0.6227	2.0180E-03
0.2800	3.7833E-06	397.3078	0.6307	1.9496E-03
0.2900	3.6980E-06	388.3569	0.6385	1.8858E-03
0.3100	3.5413E-06	371.8976	0.6536	1.7702E-03
0.3200	3.4691E-06	364.3091	0.6610	1.7178E-03
0.3400	3.3351E-06	350.2461	0.6752	1.6218E-03
0.3500	3.2730E-06	343.7150	0.6821	1.5778E-03
0.3600	3.2136E-06	337.4847	0.6888	1.5363E-03
0.3700	3.1570E-06	331.5334	0.6955	1.4969E-03
0.3800	3.1028E-06	325.8416	0.7020	1.4595E-03
0.3900	3.0509E-06	320.3917	0.7084	1.4240E-03
0.4100	2.9534E-06	310.1543	0.7210	1.3581E-03
0.4200	2.9075E-06	305.3389	0.7271	1.3274E-03
0.4300	2.8634E-06	300.7089	0.7331	1.2981E-03
0.4400	2.8210E-06	296.2532	0.7390	1.2701E-03
0.4500	2.7801E-06	291.9614	0.7449	1.2433E-03
0.4600	2.7407E-06	287.8241	0.7506	1.2177E-03
0.4700	2.7027E-06	283.8326	0.7563	1.1931E-03
0.4800	2.6660E-06	279.9787	0.7619	1.1695E-03
0.4900	2.6306E-06	276.2550	0.7675	1.1469E-03
0.5100	2.5632E-06	269.1744	0.7783	1.1042E-03
0.5600	2.4121E-06	253.3134	0.8042	1.0105E-03
0.5850	2.3447E-06	246.2301	0.8167	9.6955E-04
0.6100	2.2818E-06	239.6291	0.8287	9.3184E-04
0.6600	2.1680E-06	227.6787	0.8519	8.6478E-04
0.7100	2.0676E-06	217.1342	0.8740	8.0693E-04
0.7600	1.9782E-06	207.7477	0.8952	7.5651E-04
0.8100	1.8981E-06	199.3277	0.9154	7.1217E-04
0.8600	1.8256E-06	191.7236	0.9348	6.7285E-04
0.9100	1.7599E-06	184.8155	0.9535	6.3775E-04
0.9600	1.6998E-06	178.5065	0.9716	6.0622E-04
1.0100	1.6447E-06	172.7172	0.9890	5.7773E-04
1.0423	1.6114E-06	169.2203	1.0000	5.6073E-04

Gráfica 9  
FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 1

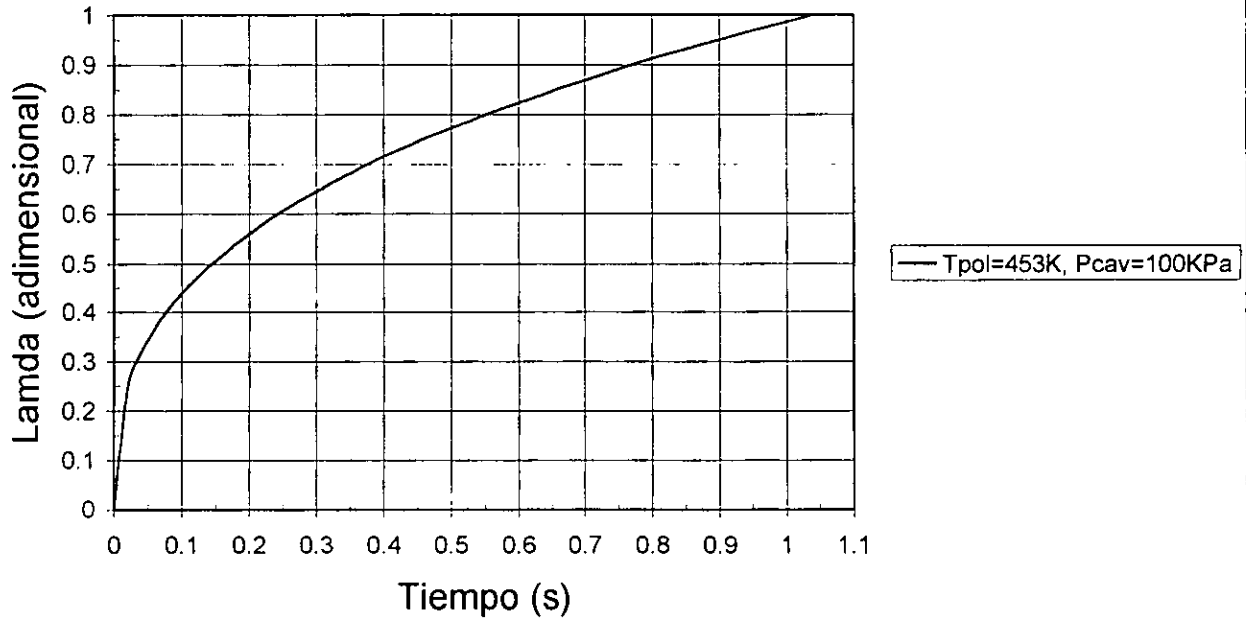


TABLA 6

 $P_{iny}=20.6\text{MPa}$ ,  $T_{pol}=453\text{K}$ ,  $R_{cav}=1.96\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_{cav}=100\text{KPa}$ 

## FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 2

Tiempo [s]	Gasto [m3/s]	Gama [1/s]	Lamda -----	Reynolds -----
0.0000	infinito	infinito	0.0000	infinito
0.0200	1.0749E-05	2204.7840	0.2000	1.5230E-02
0.0400	6.8534E-06	1405.6980	0.2550	7.8943E-03
0.0600	5.2669E-06	1080.3067	0.2940	5.3749E-03
0.0800	4.3695E-06	896.2270	0.3252	4.0919E-03
0.1000	3.7801E-06	775.3351	0.3517	3.3117E-03
0.1200	3.3580E-06	688.7681	0.3749	2.7860E-03
0.1400	3.0382E-06	623.1622	0.3957	2.4072E-03
0.1600	2.7858E-06	571.4049	0.4147	2.1210E-03
0.1800	2.5807E-06	529.3319	0.4322	1.8969E-03
0.2200	2.2654E-06	464.6619	0.4637	1.5682E-03
0.2400	2.1410E-06	439.1360	0.4780	1.4441E-03
0.2600	2.0325E-06	416.8946	0.4916	1.3385E-03
0.2700	1.9833E-06	406.8020	0.4982	1.2915E-03
0.2800	1.9370E-06	397.3078	0.5046	1.2477E-03
0.2900	1.8934E-06	388.3569	0.5108	1.2069E-03
0.3100	1.8132E-06	371.8976	0.5229	1.1330E-03
0.3200	1.7762E-06	364.3091	0.5288	1.0994E-03
0.3300	1.7410E-06	357.1018	0.5345	1.0678E-03
0.3400	1.7076E-06	350.2461	0.5401	1.0380E-03
0.3500	1.6758E-06	343.7150	0.5456	1.0098E-03
0.3600	1.6454E-06	337.4847	0.5511	9.8321E-04
0.3700	1.6164E-06	331.5334	0.5564	9.5800E-04
0.3800	1.5886E-06	325.8416	0.5616	9.3408E-04
0.3900	1.5620E-06	320.3917	0.5667	9.1136E-04
0.4100	1.5121E-06	310.1543	0.5768	8.6916E-04
0.4200	1.4887E-06	305.3389	0.5817	8.4952E-04
0.4300	1.4661E-06	300.7089	0.5865	8.3078E-04
0.4400	1.4444E-06	296.2532	0.5912	8.1287E-04
0.4500	1.4234E-06	291.9614	0.5959	7.9574E-04
0.4600	1.4033E-06	287.8241	0.6005	7.7933E-04
0.4700	1.3838E-06	283.8326	0.6051	7.6360E-04
0.4800	1.3650E-06	279.9787	0.6095	7.4851E-04
0.4900	1.3469E-06	276.2550	0.6140	7.3402E-04
0.5600	1.2350E-06	253.3134	0.6434	6.4675E-04
0.6600	1.1100E-06	227.6787	0.6816	5.5346E-04
0.7600	1.0129E-06	207.7477	0.7161	4.8417E-04
0.8600	9.3473E-07	191.7236	0.7478	4.3063E-04
0.9600	8.7029E-07	178.5065	0.7773	3.8798E-04
1.0600	8.1606E-07	167.3821	0.8047	3.5319E-04
1.1600	7.6966E-07	157.8648	0.8306	3.2426E-04
1.2600	7.2942E-07	149.6116	0.8550	2.9981E-04
1.3600	6.9413E-07	142.3729	0.8782	2.7887E-04
1.4600	6.6287E-07	135.9622	0.9003	2.6073E-04
1.5600	6.3496E-07	130.2372	0.9215	2.4485E-04
1.6600	6.0985E-07	125.0873	0.9418	2.3085E-04
1.7600	5.8712E-07	120.4250	0.9613	2.1839E-04
1.9696	5.4575E-07	111.9397	1.0000	3.5887E-04

Gráfica 10  
FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 2

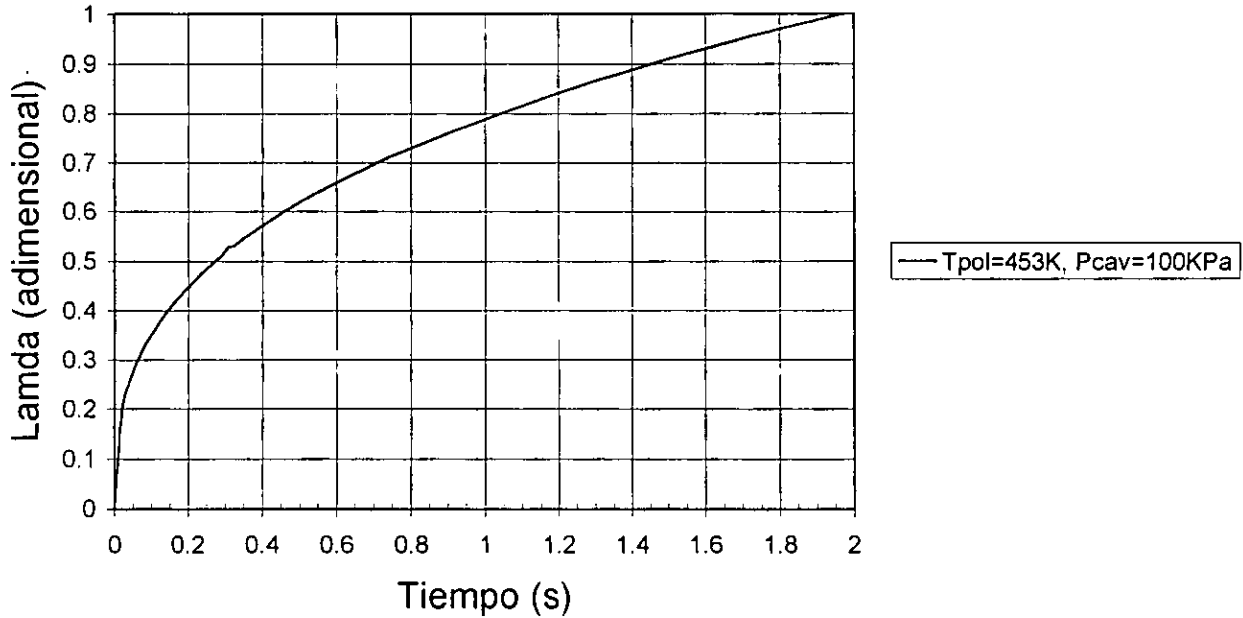


TABLA 7

 $P_{iny}=20.6\text{MPa}$ ;  $T_{pol}=453\text{K}$ ;  $R_{cav}=2.45\text{mm}$ ;  $L_{cav}=254\text{mm}$ ;  $P_{cav}=20\text{KPa}$ 

## FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 1

Tiempo [s]	Gasto [m <sup>3</sup> /s]	Gama [1/s]	Lamda -----	Reynolds -----
0.0000	infinito	infinito	0.0000	infinito
0.0200	2.1048E-05	2210.3673	0.2506	2.3885E-02
0.0400	1.3419E-05	1409.2577	0.3196	1.2381E-02
0.0600	1.0313E-05	1083.0424	0.3684	8.4294E-03
0.0700	9.3307E-06	979.8814	0.3889	7.2833E-03
0.0800	8.5557E-06	898.4965	0.4075	6.4172E-03
0.1000	7.4017E-06	777.2985	0.4407	5.1936E-03
0.1200	6.5753E-06	690.5123	0.4698	4.3692E-03
0.1400	5.9490E-06	624.7402	0.4959	3.7752E-03
0.1600	5.4549E-06	572.8519	0.5197	3.3263E-03
0.1800	5.0532E-06	530.6723	0.5416	2.9748E-03
0.2200	4.4359E-06	465.8386	0.5810	2.4594E-03
0.2400	4.1922E-06	440.2480	0.5990	2.2647E-03
0.2500	4.0825E-06	428.7313	0.6077	2.1787E-03
0.2600	3.9798E-06	417.9503	0.6161	2.0992E-03
0.2700	3.8835E-06	407.8322	0.6243	2.0254E-03
0.2800	3.7929E-06	398.3139	0.6323	1.9568E-03
0.2900	3.7074E-06	389.3403	0.6401	1.8928E-03
0.3100	3.5503E-06	372.8394	0.6553	1.7768E-03
0.3200	3.4778E-06	365.2316	0.6626	1.7241E-03
0.3400	3.3436E-06	351.1330	0.6769	1.6278E-03
0.3500	3.2812E-06	344.5854	0.6838	1.5837E-03
0.3600	3.2218E-06	338.3393	0.6906	1.5419E-03
0.3700	3.1650E-06	332.3729	0.6972	1.5024E-03
0.3800	3.1106E-06	326.6668	0.7038	1.4649E-03
0.3900	3.0586E-06	321.2030	0.7102	1.4293E-03
0.4100	2.9609E-06	310.9397	0.7228	1.3631E-03
0.4200	2.9149E-06	306.1121	0.7289	1.3323E-03
0.4300	2.8707E-06	301.4704	0.7350	1.3029E-03
0.4400	2.8282E-06	297.0034	0.7409	1.2748E-03
0.4500	2.7872E-06	292.7008	0.7468	1.2479E-03
0.4600	2.7477E-06	288.5530	0.7525	1.2222E-03
0.4700	2.7096E-06	284.5513	0.7582	1.1975E-03
0.4800	2.6728E-06	280.6877	0.7639	1.1739E-03
0.4900	2.6372E-06	276.9546	0.7694	1.1511E-03
0.5100	2.5696E-06	269.8561	0.7803	1.1083E-03
0.5600	2.4182E-06	253.9548	0.8063	1.0143E-03
0.6100	2.2876E-06	240.2360	0.8308	9.3529E-04
0.6350	2.2287E-06	234.0511	0.8426	9.0034E-04
0.6600	2.1735E-06	228.2552	0.8541	8.6798E-04
0.7100	2.0729E-06	217.6841	0.8763	8.0992E-04
0.7600	1.9832E-06	208.2738	0.8974	7.5931E-04
0.8100	1.9029E-06	199.8324	0.9177	7.1480E-04
0.8600	1.8303E-06	192.2091	0.9372	6.7534E-04
0.9100	1.7643E-06	185.2835	0.9559	6.4011E-04
0.9600	1.7041E-06	178.9585	0.9740	6.0846E-04
1.0348	1.6488E-06	173.1545	1.0000	5.7987E-04



Gráfica 11  
FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA1

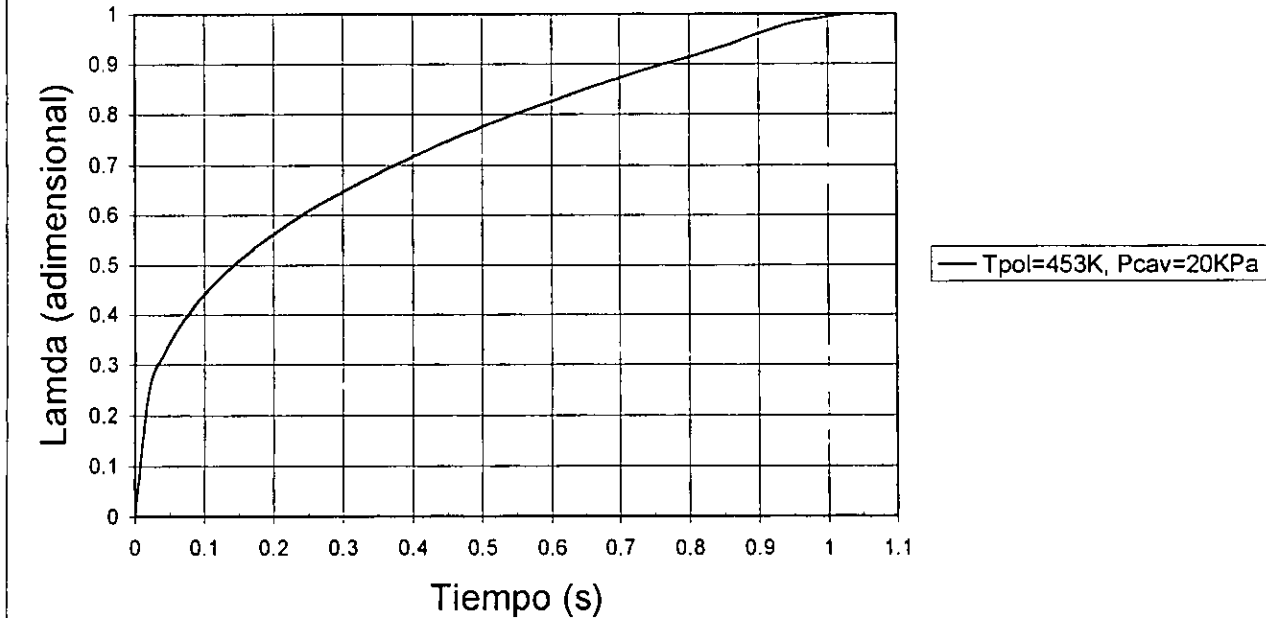


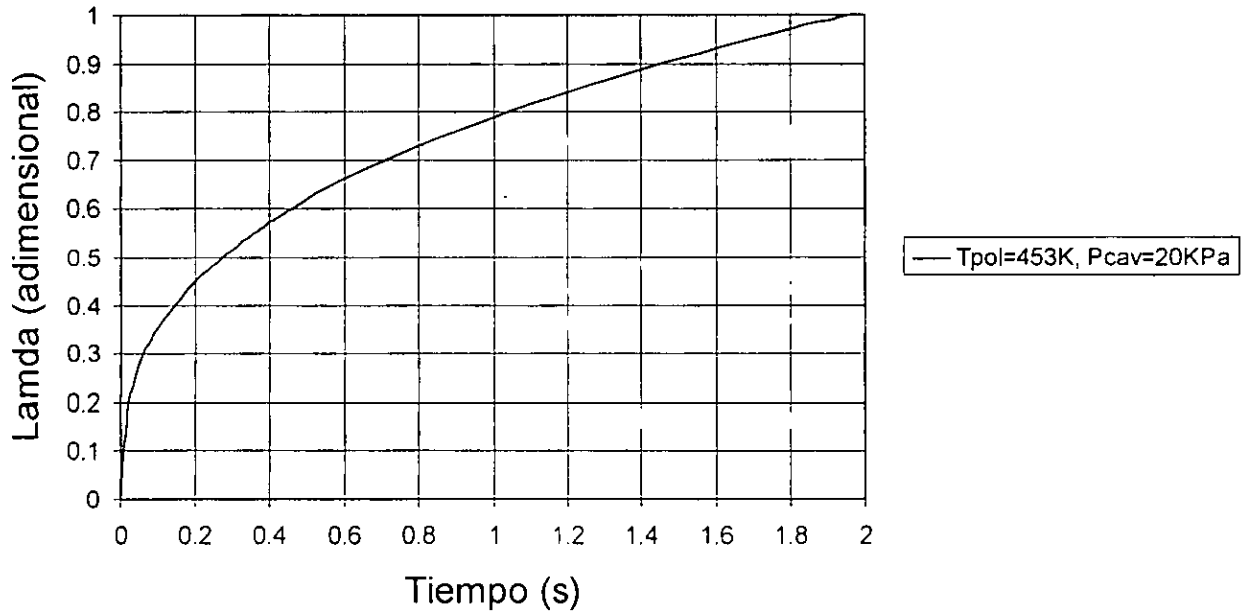
TABLA 8

$P_{iny}=20.6\text{MPa}$ ,  $T_{pol}=453\text{K}$ ,  $R_{cav}=1.96\text{mm}$ ,  $L_{cav}=254\text{mm}$ ,  $P_{cav}=20\text{KPa}$

FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 2

Tiempo [s]	Gasto [m3/s]	Gama [1/s]	Lamda -----	Reynolds -----
0.0000	infinito	infinito	0.0000	infinito
0.0200	1.0776E-05	2210.3673	0.2005	1.5287E-02
0.0400	6.8707E-06	1409.2577	0.2557	7.9236E-03
0.0600	5.2803E-06	1083.0424	0.2947	5.3948E-03
0.0800	4.3805E-06	898.4965	0.3260	4.1070E-03
0.1000	3.7897E-06	777.2985	0.3526	3.3239E-03
0.1200	3.3665E-06	690.5123	0.3758	2.7963E-03
0.1400	3.0459E-06	624.7402	0.3967	2.4161E-03
0.1600	2.7929E-06	572.8519	0.4157	2.1288E-03
0.1800	2.5872E-06	530.6723	0.4333	1.9039E-03
0.2200	2.2712E-06	465.8386	0.4648	1.5740E-03
0.2400	2.1464E-06	440.2480	0.4792	1.4494E-03
0.2600	2.0377E-06	417.9503	0.4929	1.3435E-03
0.2700	1.9884E-06	407.8322	0.4994	1.2963E-03
0.2800	1.9419E-06	398.3139	0.5059	1.2523E-03
0.2900	1.8982E-06	389.3403	0.5121	1.2114E-03
0.3100	1.8177E-06	372.8394	0.5242	1.1371E-03
0.3200	1.7807E-06	365.2316	0.5301	1.1034E-03
0.3300	1.7454E-06	358.0061	0.5359	1.0717E-03
0.3400	1.7119E-06	351.1330	0.5415	1.0418E-03
0.3500	1.6800E-06	344.5854	0.5470	1.0136E-03
0.3600	1.6495E-06	338.3393	0.5525	9.8684E-04
0.3700	1.6205E-06	332.3729	0.5578	9.6154E-04
0.3800	1.5926E-06	326.6668	0.5630	9.3753E-04
0.3900	1.5660E-06	321.2030	0.5682	9.1473E-04
0.4100	1.5160E-06	310.9397	0.5782	8.7237E-04
0.4200	1.4924E-06	306.1121	0.5831	8.5267E-04
0.4300	1.4698E-06	301.4704	0.5880	8.3386E-04
0.4400	1.4480E-06	297.0034	0.5927	8.1588E-04
0.4500	1.4270E-06	292.7008	0.5974	7.9868E-04
0.4600	1.4068E-06	288.5530	0.6020	7.8221E-04
0.4900	1.3503E-06	276.9546	0.6155	7.3673E-04
0.5600	1.2381E-06	253.9548	0.6450	6.4914E-04
0.6600	1.1128E-06	228.2552	0.6833	5.5551E-04
0.7600	1.0154E-06	208.2738	0.7179	4.8596E-04
0.8600	9.3710E-07	192.2091	0.7497	4.3222E-04
0.9600	8.7250E-07	178.9585	0.7792	3.8941E-04
1.0600	8.1812E-07	167.8060	0.8068	3.5450E-04
1.1600	7.7161E-07	158.2646	0.8327	3.2546E-04
1.2600	7.3127E-07	149.9905	0.8572	3.0092E-04
1.3600	6.9588E-07	142.7334	0.8804	2.7990E-04
1.4600	6.6455E-07	136.3065	0.9026	2.6169E-04
1.5600	6.3657E-07	130.5670	0.9238	2.4576E-04
1.6600	6.1140E-07	125.4040	0.9442	2.3170E-04
1.7600	5.8861E-07	120.7299	0.9638	2.1920E-04
1.8600	5.6786E-07	116.4743	0.9826	2.0801E-04
1.9100	5.5816E-07	114.4852	0.9918	2.0285E-04
1.9554	5.4970E-07	112.7502	1.0000	1.9837E-04

Gráfica 12  
FLUJO DE TERMOPLASTICO GEOMETRIA 2



## 5. DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS

De las tablas 1, 2, 3 y 4 se obtiene que para flujo isotérmico y adiabático de aire (ambas geometrías)  $Re < 672$ , de manera que la suposición de flujo laminar (Bird et al., 1964) es adecuada. A su vez, el Reynolds permite calcular la longitud de entrada dada por  $L_e = (0.035)(2R_{cap})(Re)$  (Id.), de tal suerte que para la geometría 1  $L_e \leq (0.035)(0.125\text{mm})(671.5314) = 2.9379\text{mm}$  mientras que para la geometría 2  $L_e \leq (0.035)(0.1\text{mm})(537.2251) = 1.8803\text{mm}$ , es decir, durante todo el proceso en ambas geometrías la longitud de entrada representa menos del 15 por ciento de la longitud total de los capilares. De esto último se infiere que es aceptable considerar flujo completamente desarrollado, sobre todo cuando el modelado de flujo se ha supuesto unidimensional.

### 5.1) Proceso Isotérmico

De las tablas 1 y 2 se obtiene que el flujo inicial en la geometría 1 (71.9253g/h) es alrededor del 36 por ciento mayor que en la geometría 2 (46.0322g/h), esto se debe básicamente a que el área total de flujo en la primer geometría es mayor que en la segunda. Así mismo, en el primer caso el tiempo de vaciado de la cavidad es de 10.5644s en tanto que en el segundo es de 15.8568s, no obstante que la masa inicial en la geometría 1 (0.0047g) es alrededor del 36 por ciento mayor respecto de la geometría 2 (0.0030g). En este último caso el tiempo total de vaciado es aproximadamente 50 por ciento mayor respecto del primero.

Por otro lado, es preciso recordar que para obtener el flujo másico inicial no fueron consideradas las pérdidas por fricción, de tal manera que después de 0.0001s el flujo másico decae

rápidamente de 71.9253g/h a 49.5755g/h (31 por ciento) en la geometría 1 y de 46.0322g/h a 23.6602g/h (48 por ciento) en la geometría 2. Esto último sugiere que aún cuando la viscosidad del aire es muy pequeña la resistencia al flujo dado por  $E_v = \frac{8\nu\mu_{cap}}{\rho R_{cap}^2}$  es

muy grande gracias a las dimensiones de los tubos capilares.

Finalmente, las tablas 1 y 2 así como las gráficas 1, 2, 3 y 4 indican que para ambas geometrías, la densidad y el flujo másico disminuyen alrededor del 95 por ciento en menos del 10 por ciento del tiempo total de vaciado.

## 5.2) Proceso Adiabático

En esta ocasión, de las tablas 3 y 4 se obtiene que el flujo inicial en la geometría 1 (71.9253g/h) es alrededor del 36 por ciento mayor que en la geometría 2 (46.0322g/h). Al igual que para flujo isotérmico esto se debe básicamente a que el área total de flujo en la primer geometría es alrededor del 36 por ciento mayor que en la segunda.

Por otro lado, el tiempo total de vaciado es de 4.5369s y 6.7443s para la geometría 1 y 2 respectivamente, es decir, en el primer caso el tiempo de vaciado es aproximadamente 32 por ciento menor que en el segundo no obstante que en la geometría 1 la masa inicial es mayor que en la geometría 2.

En contraste con el proceso isotérmico, en este caso el tiempo total de vaciado es alrededor del 132 y 135 por ciento menor para la geometría 1 y 2 respectivamente, gracias a que para flujo adiabático la energía cinética del aire aumenta proporcionalmente

con la disminución de temperatura  $\frac{\Delta v^2}{2} = -C_p \Delta T$ . En este sentido, de las tablas 3 y 4 se obtiene que después de 0.0001s la temperatura del aire en la sección (3,4) cambia alrededor de un 18 y 11 por ciento para la geometría 1 y 2 respectivamente. Así mismo, en ambas geometrías la temperatura del aire al final del proceso cambia aproximadamente un 37 por ciento respecto de la temperatura inicial.

Por otra parte, en las tablas 3 y 4 se observa que después de 0.0001s el flujo ha disminuido de 71.9253g/h a 56.5207g/h (21 por ciento) para la geometría 1 mientras que de 46.0322g/h a 25.4619g/h (44 por ciento) para la geometría 2. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el proceso isotérmico resulta que en este caso la disminución en el flujo másico es menor debido al incremento en la energía cinética. De esta forma, después de 0.0001s el flujo másico cambia drásticamente en virtud de que inicialmente se asumen despreciables las pérdidas de energía por fricción, mientras que para  $t > 0$  estas vienen dadas por

$$E_v = \frac{8\nu\mu L_{cap}}{\rho R_{cap}^2}$$

en donde gracias a las dimensiones de los capilares el aire opone una resistencia considerable al flujo aún cuando su viscosidad es muy pequeña.

Por último, de las tablas 3 y 4 y de las gráficas 5, 6, 7 y 8 indican que para ambas geometrías, la densidad y el flujo másico disminuyen alrededor del 82 y 90 por ciento respectivamente en menos del 10 por ciento del tiempo total de vaciado.

### 5.3) Proceso de Inyección

Para el flujo de termoplástico se tiene que que al inicio del proceso de llenado  $Q=\gamma=Re=\alpha$ , esto se debe a que inicialmente el fluido está en reposo y súbitamente se pone en movimiento. A su vez, para  $t>0$  se tiene que  $Re\leq 1$ , es decir, efectivamente el flujo de termoplástico es laminar.

Por otra parte, de las tablas 5 y 7 se obtiene que para la geometría 1 el tiempo de llenado de la cavidad (i.e.,  $\lambda^*=1$ ) es de 1.0423s con  $P_{cav}=100KPa$  y de 1.0348s con  $P_{cav}=20KPa$ , es decir, disminuir la presión en la cavidad antes de inyectar el termoplástico permite aumentar la velocidad de inyección en menos del 1 por ciento. A su vez, de las tablas 6 y 8 se obtiene que para la geometría 2 el tiempo de llenado es de 1.9696s con  $P_{cav}=100KPa$  y de 1.9554s con  $P_{cav}=20KPa$ . De nueva cuenta el tiempo de llenado disminuye menos del 1 por ciento al disminuir la presión en la cavidad.

Sin embargo, si  $P_{cav}=20KPa$  o si  $P_{cav}=100KPa$ , en las gráficas 9, 10, 11 y 12 se observa que el tiempo de llenado para la geometría 2 es aproximadamente 47 por ciento mayor que para geometría 1 en virtud de que el área transversal de flujo para esta última es alrededor del 36 por ciento mayor. Así mismo, antes de que la cavidad se llene, el Reynolds, el flujo volumétrico y la rapidez de corte para la geometría 1 con  $P_{cav}=20KPa$  son mayores que para la geometría 2 con  $P_{cav}=20KPa$ . De nueva cuenta esto se debe a las dimensiones del área transversal de flujo.

## 6. CONCLUSIONES

El planteamiento de los modelos de flujo isotérmico y adiabático de aire parte de ciertas consideraciones generales que, como se analizó en la sección anterior, son adecuadas de acuerdo a las propiedades del aire y al sistema de flujo considerado (i.e., fluido compresible, flujo laminar completamente desarrollado y diámetro de los capilares). Con base en esto, es posible afirmar que bajo condiciones adiabáticas de flujo la cavidad se vacía más rápido que bajo condiciones de flujo a temperatura constante. Así mismo, disminuir el diámetro de los capilares produce que el aire presente mayor resistencia al flujo, de tal suerte que la cavidad tarda más tiempo en vaciarse.

En cuanto al modelo de flujo de termoplástico, las suposiciones de las cuales parte (i.e., flujo isotérmico, laminar, completamente desarrollado así como gradiente de presión constante) permiten hacer un primer acercamiento del comportamiento del fenómeno porque el flujo de termoplástico en la cavidad es realmente un proceso bidimensional y no isotérmico; desarrollar un modelo adecuado requiere de mucho más trabajo y dificultad de cálculo.

A las presiones de inyección utilizadas industrialmente el tiempo que el termoplástico tarda en llenar la cavidad no es a final de cuantas el parámetro relevante porque de alguna manera éste queda fijo por la geometría del molde. Pero como el proceso de inyección involucra diferentes tiempos de operación (i.e., inyección, enfriamiento, operaciones mecánicas de apertura y cierre del molde, vaciado de aire) entonces el reducir alrededor del 130 por ciento el tiempo de vaciado de aire puede ayudar a reducir el tiempo por ciclo global de inyección de 22 a 15 segundos lo que sí permitiría aumentar la producción por ciclo alrededor del 30



por ciento que es considerablemente atractivo. Quizá menos atractivo sea la necesidad mecánica y térmica de lograrlo.

Como otro aspecto importante del modelo señala un alto grado de enfriamiento, entonces sería conveniente desarrollar un modelo no adiabático; un modelo que intuitivamente sería más complicado de acuerdo a los resultados del trabajo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- BIRD R.B., STEWART W.E., LIGHTFOOT E.N., Fenómenos de Transporte, Edit. Reverté, España, 1964.
- BROADKEY R.S., The Phenomena of Fluid Motions, Edit. Dover, EUA, 1995.
- CASTELLAN G.W., Fisicoquímica, Edit. Addison-Wesley Iberoamericana, EUA, 1987.
- CHAPMAN S.J., Introduction to Fortran 90/95, Edit. McGraw-Hill, EUA, 1998.
- FERMI E., Thermodynamics, Edit. Dover, EUA, 1956.
- HAMMING R.W., Numerical Methods for Scientist and Engineers, Edit. Dover, EUA, 1986.
- REID R.C., PRAUSNITZ J.M., SHERWOOD T.K., The Properties of Gases and Liquids, Edit. McGraw-Hill, EUA, 1977.
- SMITH J.M., VAN NESS H.C., Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Edit. McGraw-Hill, México, 1989.
- TADMOR Z., GOGOS C.G., Principles of Polymer Processing, Edit. Jhon Wiley & Sons, EUA, 1979.

a) Proceso isotérmico

```

PROGRAM ISOTERMICO
USE CONST
IMPLICIT NONE
INTEGER::I
CHARACTER::ESCRIBE
REAL*8::P1,T1,P3,RO1,RO3,B
REAL*8,DIMENSION(500000)::MUAIRE,FLUJO,FLUX,REYNOLDS
REAL*8,DIMENSION(500000)::TAU,RHO2,PRESSURE,TMPO,TETA_AVE
ESCRIBE='N'
P1=100000.00
T1=353.00
P3=20000.00
RO1=P1/(R*T1)
RO3=P3/(R*T1)
TAU(1)=0.0
RHO2(I)=1.0
CICLO1:DO I=1,300000
CALL RUNGE_KUTTA(I,T1,P1,RO1,P3,TAU,RHO2,FLUJO)
TETA_AVE(I)=1.0
CALL VISC_AIRE (I,T1,TETA_AVE,MUAIRE)
TMPO(I)=RO1*RCAP**3*MUP*TAU(I)/(MUAIRE(I)**2*RCAV)
FLUX(I)=FLUJO(I)*MUAIRE(I)*LCAP*NCAP*1.0E3*3600.0 ! EN [g/h]
PRESSURE(I)=P1*RHO2(I)/1000.00 ! en KPa
REYNOLDS(I)=FLUX(I)*2.0/(PI*RCAP*MUAIRE(I)*1000.0*NCAP*3600.0)
!WRITE(*,5)FLUX(I),RHO2(I),I,TAU(I),REYNOLDS(I)
IF (FLUX(I)<1.0E-7) GOTO 30
END DO CICLO1
30 IF (ESCRIBE.EQ.'S') THEN
OPEN (100,FILE='ISOT_GEO2.doc',ACTION='WRITE',STATUS='REPLACE')
WRITE(100,*) !DESCOMPRESION ISOTERMICA DE AIRE'
WRITE(100,*)
ENCABEZADO1=' Tiempo Flujo Presion Rho2
&
Reynolds'
WRITE(100,20)ENCABEZADO1
ENCABEZADO2=' [s] [g/h] [KPa] ----
&
-----'
WRITE(100,20)ENCABEZADO2
ENCABEZADO3='-----&
-----'
WRITE(100,20)ENCABEZADO3
20 FORMAT (A80)
ESCRIBE1: DO I=1,40,1
!WRITE(100,40)TMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),RHO2(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE1
ESCRIBE2: DO I=61,1111,50
!WRITE(100,40)TMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),RHO2(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE2
!WRITE(100,40)TMPO(1175),FLUX(1175),PRESSURE(1175),RHO2(1175),REYNOLDS(1175)
40 FORMAT (3X,F8.4,4X,F9.4,9X,F8.4,7X,F8.4,11X,F9.4)
ESCRIBE3: DO I=1,40,1
WRITE(100,40)TMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),RHO2(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE3

```

```
ESCRIBE4: DO I=41,2741,20
WRITE(100,40)TMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),RHO2(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE4
WRITE(100,40)TMPO(2753),FLUX(2753),PRESSURE(2753),RHO2(2753),REYNOLDS(2753)
END IF
END PROGRAM ISOTÉRMICO
```

## b) Proceso adiabático

```
PROGRAM ADIABATICO
USE CONSTANTES
IMPLICIT NONE
INTEGER::I
CHARACTER::IMPRIME_DATOS,GEO
CHARACTER(81)::ENCABEZADO1,ENCABEZADO2,ENCABEZADO3
REAL*8::P1,T1,P3,RO1,X1,K1,K2,K3,K4,B
REAL*8,DIMENSION(200000)::RHO2,RHO3,TETA3,FLUJOA,TETA2,MUINICIAL,TAU, &
TETA_AVER,MUAIRE,RHO2A,RHO2B,RHO2C,TIEMPO,CPAIRE,TETA_AVE,FLUX, &
REYNOLDS,PRESSURE,TMPO,TEMP3,TEMP2,DELTA
IMPRIME_DATOS='N'
GEO='1'
P1=100000.00
T1=353.00
P3=20000.00
RO1=P1/(R*T1)
TAU(1)=0.0
RHO2(1)=1.0
DO I=1,200000
TETA_AVER(I)=1.0
CALL VISC_AIRE (I,T1,TETA_AVER,MUINICIAL)
X1=- (NCAP*RCAP**3*LCAP*MUP)/(PI*MUINICIAL(I)*RCAV**3*LCAV)
CALL TEMP_3 (I,P1,P3,T1,RO1,RHO2,RHO3,TETA3)
CALL ADIABATICO (I,P1,T1,RO1,RHO2,RHO3,TETA3,FLUJOA)
K1=INC*X1*FLUJOA(I)
RHO2A(I)=RHO2(I)+K1/2.0
CALL TEMP_3 (I,P1,P3,T1,RO1,RHO2A,RHO3,TETA3)
CALL ADIABATICO (I,P1,T1,RO1,RHO2A,RHO3,TETA3,FLUJOA)
K2=INC*X1*FLUJOA(I)
RHO2B(I)=RHO2(I)+K2/2.0
CALL TEMP_3 (I,P1,P3,T1,RO1,RHO2B,RHO3,TETA3)
CALL ADIABATICO (I,P1,T1,RO1,RHO2B,RHO3,TETA3,FLUJOA)
K3=INC*X1*FLUJOA(I)
RHO2C(I)=RHO2(I)+K3
CALL TEMP_3 (I,P1,P3,T1,RO1,RHO2C,RHO3,TETA3)
CALL ADIABATICO (I,P1,T1,RO1,RHO2C,RHO3,TETA3,FLUJOA)
K4=INC*X1*FLUJOA(I)
TAU(I+1)=TAU(I)+INC
RHO2(I+1)=RHO2(I)+(K1+2.0*K2+2.0*K3+K4)/6.0
CALL TEMP_2 (I,T1,RHO2,TETA2)
TIEMPO(I)=RO1*RCAP**3*MUP*TAU(I)/(MUINICIAL(I)**2*RCAV)
TETA_AVE(I)=(TETA2(I)+TETA3(I))/2.0
CALL VISC_AIRE (I,T1,TETA_AVE,MUAIRE)
CALL CP_AIRE(I,T1,TETA_AVE,CPAIRE)
FLUX(I)=FLUJOA(I)*MUINICIAL(I)*LCAP*NCAP*1.0E3*3600.0 ! EN [g/h]
REYNOLDS(I)=FLUX(I)*2.0/(PI*RCAP*MUAIRE(I)*1000.0*NCAP*3600.0)
PRESSURE(I)=P1*TETA2(I)*RHO2(I)/1000.00 ! en kPa
TEMP3(I)=TETA3(I)*T1
TEMP2(I)=TETA2(I)*T1
DELTA(I)=TEMP2(I)-TEMP3(I)
IF (REYNOLDS(I)<1.0E-4) GOTO 50
END DO
50 DATOS:IF (IMPRIME_DATOS.EQ.'S') THEN
OPEN (100,FILE='GEO1_ADIAB.doc',ACTION='WRITE',STATUS='REPLACE')
```

```

WRITE(100,*)'
WRITE(100,*)'
DESCOMPRESION ADIABATICA DE AIRE'
ENCABEZADO1='Tiempo Flujo Presion Temp 2 Temp 3 &
RHO2 RHO3 Reynolds'
WRITE(100,20)ENCABEZADO1
ENCABEZADO2=' [s] [g/h] [KPa] K K &
-----&
WRITE(100,20)ENCABEZADO2
ENCABEZADO3='-----&
-----&
WRITE(100,20)ENCABEZADO3
20 FORMAT (A80)
if (geo=='2') then
DO I=1,2
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
DO I=3,3903,100
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
DO I=4000,24000,1000
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
DO I=25000,105000,10000
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
WRITE(100,30)TIEMPO(117009),FLUX(117009),PRESSURE(117009),TEMP2(117009),TEMP3(1
17009),&
RHO2(117009),RHO3(117009),REYNOLDS(117009)
end if
if (geo=='1') then
DO I=1,2
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
DO I=3,3903,100
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
DO I=4000,24000,1000
WRITE(100,30)TIEMPO(I),FLUX(I),PRESSURE(I),TEMP2(I),TEMP3(I),&
RHO2(I),RHO3(I),REYNOLDS(I)
END DO
WRITE(100,30)TIEMPO(50376),FLUX(50376),PRESSURE(50376),TEMP2(50376),TEMP3(50376
),RHO2(50376),RHO3(50376),REYNOLDS(50376)
END IF
30 FORMAT (F6.4,2X,F8.4,3X,F8.4,3X,F8.4,3X,F8.4,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F9.4)
END IF DATOS
END PROGRAM ADIABATICO

```

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA 59

c) Proceso de inyección

```

PROGRAM TERMOPLASTICO
USE CONSTANTES
IMPLICIT NONE
REAL, DIMENSION(500000)::X,Y
REAL*8::M,N,TPOL
REAL*8::RCAP,LCAP,RCAV,LCAV,PINY,DENSITY,PCAV,ROI,INC,A,B,C,D,E,F
REAL*8,DIMENSION(500000)::TAU,MUAIRE,LAMDA, TMPO,GASTO, POSICION, SHEAR, REYNOLDS
CHARACTER::GEO,TEMP,ESCRIBE
INTEGER::I
ESCRIBE='N'
ROI=PI/(R*T1)
PCAV=20000.0
GEO='2'
TEMP='1'
TPOL=453.0
PINY=2.06E7
TEMP1:IF (TEMP.EQ.'1') THEN
N=0.54
M=6.19E3
END IF TEMP1
GEO1:IF (GEO.EQ.'1') THEN
RCAP=6.25E-5
LCAP=2.0E-2
RCAV=2.45E-3
LCAV=0.254
END IF GEO1
GEO2:IF (GEO.EQ.'2') THEN
RCAP=6.25E-5/1.25
LCAP=2.0E-2
RCAV=2.45E-3/1.25
LCAV=0.254
END IF GEO2
CALL DENSIDAD (TPOL,PINY,DENSITY)
INC=1.0D-5
TMPO(2)=INC
DO I=2,300000
TMPO(I+1)=TMPO(I)+INC
POSICION(I)=EXP(N/(N+1.0)*LOG((1.0+N)/(1.0+3.0*N))) * 6
RCAV*EXP(1.0/(N+1.0)*LOG((PINY-PCAV)/(2.0*M))) * 6
EXP(N/(1.0+N)*LOG(TMPO(I)))
LAMDA(I)=POSICION(I)/LCAV
D=PI*RCAV**3*EXP(N/(1.0+N)*LOG((1.0+N)/(1.0+3.0*N)))*N/(1.0+N)
E=EXP(1.0/(N+1.0)*LOG((PINY-PCAV)/(2.0*M)))
F=1.0/(EXP(1.0/(1.0+N)*LOG(TMPO(I))))
GASTO(I)=D*E*F
SHEAR(I)=EXP((1.0/N)*LOG((RCAV*(PINY-PCAV))/(2.0*M*POSICION(I))))
REYNOLDS(I)=(GASTO(I)*DENSITY*2.0)/(PI*RCAV*M*EXP((N-1.0)*LOG(SHEAR(I))))
IF (LAMDA(I)>=1.00001) GOTO 10
END DO
10 TMPO(1)=0.0
GASTO(1)=10000.0
REYNOLDS(1)=10000.0
SHEAR(1)=10000.0
LAMDA(1)=0.0

```

```

IF (ESCRIBE.EQ.'S') THEN
OPEN (100,FILE='GE01_20.DOC',ACTION='WRITE',STATUS='new')
WRITE(100,'')
FLUJO DE TERMOPLASTICO POR CAVIDAD CILINDRICA'
WRITE(100,'')
ENCABEZADO1='      Tiempo          Gasto          Gama          Lamda          6
Reynolds'
WRITE(100,20)ENCABEZADO1
ENCABEZADO2='      [s]          [m3/s]          [1/s]          ----          6
-----'
WRITE(100,20)ENCABEZADO2
ENCABEZADO3='-----&
-----'
WRITE(100,20)ENCABEZADO3
20 FORMAT (A80)
ESCRIBE1: DO I=1,50000,1000
WRITE(100,40)TMPO(I),GASTO(I),SHEAR(I),LAMDA(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE1
ESCRIBE2: DO I=51000,101000,2500
WRITE(100,40)TMPO(I),GASTO(I),SHEAR(I),LAMDA(I),REYNOLDS(I)
END DO ESCRIBE2
WRITE(100,40)TMPO(103845),GASTO(103845),SHEAR(103845),LAMDA(103845),REYNOLDS(10
3845)
40 FORMAT(3X,F6.4,5X,ES12.4,5X,F12.4,4X,F8.4,6X,ES10.4)
END IF
END PROGRAM TERMOPLASTICO

```