



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DEFORMACION Y RUPTURA DE GOTAS NEWTONIANAS
Y NO NEWTONIANAS EN UN FLUJO A DOS
FASES A BAJO NUMERO DE REYNOLDS**

T E S I S

Que para obtener el Título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

P r e s e n t a:
FLORENCIA SERRANIA SOTO

Director de Tesis: Baltasar Mena I.

México, D F.

1988



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 está 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.

I N D I C E

	PAGINA
Introducción	2
CAPITULO I	
Fluidos Newtonianos	5
Fluidos No Newtonianos	11
CAPITULO II	
Antecedentes teóricos y experimentales	16
CAPITULO III	
Descripción experimental y obtención de datos	20
Objetivo	21
Arreglo experimental	22
Procedimiento experimental	26
Fluidos utilizados	28
Parámetros adimensionales	29
Medición de parámetros	30
Datos obtenidos	36
CAPITULO IV	
Resultados y conclusiones	38
Patrones de deformación y rompimiento	39
Secuencias fotográficas	42
Observaciones experimentales	45
Conclusiones	53
Bibliografía	54
Referencias	55

INTRODUCCION

La mecánica de fluidos no Newtonianos ha tenido gran desarrollo en los últimos veinte años.

La Reología, que estudia el comportamiento de los fluidos no Newtonianos, intenta en términos suficientemente específicos, predecir dicho comportamiento.

Debido a que los fluidos no Newtonianos son muy variados y se encuentran frecuentemente en la naturaleza, su estudio es cada vez más trascendente.

La relevancia del conocimiento de las propiedades reológicas de algunos fluidos del cuerpo humano es altamente reconocida actualmente. En particular, la respuesta de las mucosidades en el sistema respiratorio, así como la acción lubricante del líquido sinovial en todas las articulaciones del cuerpo, fenómeno que presenta una respuesta reológica.

Recientemente se han hecho diversas investigaciones sobre la sangre desde el punto de vista reológico. Los eritrocitos que forman un 40% del volumen sanguíneo y contienen proteínas de muy alto peso

molecular, que hacen que la sangre se comporte como una suspensión y por esto se estudia como un flujo a dos fases.

Una aplicación más específica del fenómeno de un flujo a dos fases puede observarse en la recuperación secundaria del petróleo, donde se utiliza un líquido de empuje a través de un medio poroso. Esta aplicación ha dado origen a numerosos estudios acerca del comportamiento de diversas combinaciones de gotas Newtonianas y viscoelásticas, en fluidos de sostén a bajo número de Reynolds, en diferentes tipos de geometrías.

Consecuentemente se desarrolló un proyecto de investigación dentro del Instituto de Investigaciones en Materiales, con objeto de explicar dichos fenómenos y predecir el comportamiento de gotas no Newtonianas inmiscibles en un fluido de sostén.

El objeto principal de este trabajo experimental es intentar explicar el fenómeno de deformación y ruptura de gotas Newtonianas y no Newtonianas en un flujo a dos fases dentro de una geometría y condiciones de flujo específicas.

CAPITULO 1

FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS

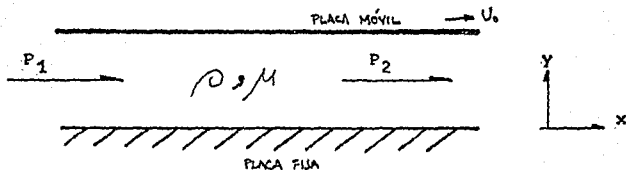
FLUIDOS NEWTONIANOS

Un fluido se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. Los sólidos sufren una deformación cuando se les aplica un esfuerzo cortante, pero dicha deformación es independiente del tiempo. Los fluidos sin embargo, continúan deformándose en todo momento que se encuentran sometidos al esfuerzo.

La medida de la deformación de un fluido está dada por el cambio de posición de un punto, por unidad de tiempo. Se le conoce también como "Rapidez de Deformación".

Para los fluidos Newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación. El coeficiente que los relaciona se llama coeficiente de viscosidad, o simplemente viscosidad.

Un ejemplo, sin duda significativo, que ilustra la relación lineal que existe entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación, es el que a continuación se presenta:



$$P_2 - P_1 = \text{Cte}$$

FIG. 1.1

$$\Delta P = \text{Cte}$$

El flujo es unidireccional: en dirección X'X

El flujo es estacionario

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad \tau_{yx} = \mu \frac{u}{h}$$

Considérese un fluido que escurre entre dos placas paralelas infinitas, como se muestra en la Fig. 1.1 Una de las placas se encuentra fija y la otra se mueve con una velocidad constante U_0 . Este movimiento da origen a un flujo cortante simple o "Flujo de Couette".

El problema puede idealizarse mediante un viscosímetro de Couette consistente en un par de cilindros coaxiales, como se muestra en la Fig. 1.2. El cilindro interior está fijo y un par de fuerza se aplica al cilindro exterior, causando una rotación constante. Si la

relación h/r_0 es suficientemente pequeña, entonces la curvatura de la región anular es despreciable y esto se asemeja a las dos placas paralelas infinitas.

La fuerza por unidad de área (F/A) requerida para mantener en movimiento el cilindro está en función de la velocidad U_0 dividida entre h . En el viscosímetro de Couette, la fuerza F se encuentra representada por el par aplicado, dividido entre el brazo de palanca r_2 y el área A del cilindro exterior.

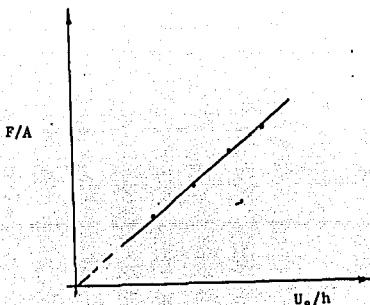


FIG.1.3

→ Donde la pendiente es la viscosidad;

$$F/A = T_{yx}; \quad \frac{U_0}{h} = -\frac{dv_x}{dy}$$

$$F/A = \mu \left(\frac{U_0}{h} \right)$$

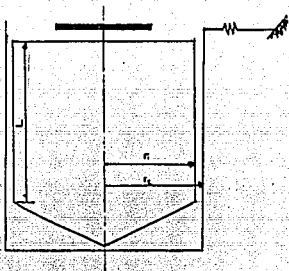


FIG 1.2

DEMOSTRACION:

Ecuaciones de movimiento:

$$r \cdot r \quad -\rho \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r} \quad (1)$$

$$\theta \cdot \theta \quad 0 = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) \right) \right] \quad (2)$$

$$z \cdot z \quad 0 = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \quad (3)$$

La única componente de velocidad se tiene en V_θ .

Para que las líneas de corriente sean circulares se tiene que:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$$

Resumiendo, la ecuación por resolver es:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rV_e) \right) = 0 \quad (4)$$

La ecuación de flujo unidireccional estacionario es:

$$V = V(r)$$

Las condiciones de contorno son:

$$V_e = 0 \quad \text{y} \quad r = r_1$$

$$V_e = \Lambda r_2 \quad \text{y} \quad r = r_2$$

Integrando la ecuación (4):

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rV_e) = C_1$$

$$\frac{d}{dr} (rV_e) = C_1 r$$

$$rV_e = \frac{C_1 r^2}{2} + C_2$$

$$V_e = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (5)$$

Sustituyendo las ecuaciones de contorno:

$$0 = C_1 r_1 + \frac{C_2}{r_1}$$

$$\Lambda r_2 = C_1 r_2 + \frac{C_2}{r_2} \quad (6)$$

Resolviendo simultaneamente las ecuaciones (5) y (6):

$$V_e = r \Lambda \frac{\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

Para medir el esfuerzo en el cilindro:

$$\tau_{r\theta} \Big|_{r=r_1} = -\tau_{\theta r} \Big|_{r=r_1} (2\pi r_1 L) \tau_1$$

Utilizando las ecuaciones de esfuerzo:

$$\tau_{r\theta} = \mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{r \partial \theta} \right]$$

$$\tau_1 = \frac{4\pi\mu L r^2 \omega}{\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]}$$

Finalmente, se tiene que la viscosidad se encuentra representada en siguiente ecuación lineal:

$$\mu = \frac{\tau_1 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]}{4\pi L r^2 \omega}$$

FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Existen muchos fluidos que exhiben un comportamiento Newtoniano. Sin embargo, existe también una importante clase de fluidos la cual no tiene el mismo comportamiento. A estos fluidos se les conoce como fluidos No Newtonianos.

La relación que existe entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación se encuentra indicada en la Fig. 1.4. En ella se muestran los tipos de comportamiento que han sido observados experimentalmente.

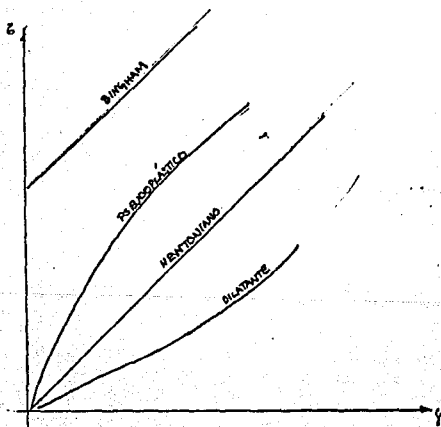


FIG. 1.4.

Modelo de Bingham:

El modelo de Bingham está caracterizado por fluidos que empiezan a deformarse cuando el esfuerzo cortante aplicado alcanza un valor crítico, T_0 . La relación del esfuerzo cortante, la rapidez de deformación y su viscosidad se encuentra representada por la siguiente ecuación:

$$\tau_{yx} = \left(\mu_r + \frac{T_0}{\left| \frac{dv_x}{dy} \right|} \right) \frac{dv_x}{dy} \quad \text{si } |\tau_{yx}| > T_0$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \quad \text{si } |\tau_{yx}| < T_0$$

Fluidos Pseudoplástico:

Si la viscosidad de un fluido disminuye cuando se incrementa la rapidez de deformación el fluido es llamado pseudoplástico. Este efecto es verdaderamente significativo, si se toma en cuenta la viscosidad puede disminuir hasta en 10^3 ó 10^4 veces. Ejemplos de este tipo de fluidos son casi todas las soluciones de polímeros.

Fluido Dilatante:

Estos fluidos tienen un comportamiento inverso al del fluido pseudoplástico. Es decir, al incrementar la rapidez de deformación, se incrementa también la viscosidad. Tal comportamiento es observado

en suspensiones concentradas de partículas muy pequeñas (suelos, arcillas, productos de latex, etc.).

El comportamiento de los fluidos dilatantes y pseudoplásticos puede representarse por la siguiente Ley de Potencias:

$$\tau_{yx} = m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy}$$

Cuando $n=1$ la ecuación se reduce a la ecuación de fluidos Newtonianos y en ese caso $m=\mu$

Si $n>1$, la ecuación describe un comportamiento de fluido dilatante.

Los tipos de fluidos mencionados anteriormente son llamados también fluidos No Newtonianos viscosos y sus propiedades son independientes del tiempo. Esto es, la rapidez de deformación en cualquier punto del fluido es una función simple del esfuerzo cortante en ese punto.

Existe otro tipo de fluidos cuyo comportamiento no depende solamente de la rapidez de deformación, sino del tiempo en que el esfuerzo cortante ha sido aplicado.

Fluidos Tixotrópicos:

Los materiales tixotrópicos son aquellos cuya consistencia depende de la duración del esfuerzo, así como de la velocidad de deformación.

Si un material tixotrópico se pone en movimiento a velocidad constante, después de un periodo de reposo, la estructura se rompe progresivamente y la viscosidad aparente disminuirá con el tiempo.

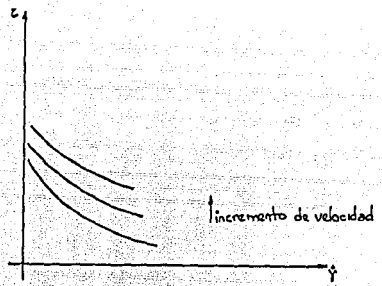


FIG. 1.5.

Fluidos reopéticos:

En este tipo de fluidos existe un caso de deformación gradual de la estructura con respecto del tiempo. Existe con frecuencia un valor crítico de esfuerzo en el cual la deformación de la estructura no ocurre. En su lugar hay un rompimiento.

Este comportamiento se observa en soluciones diluidas de pentóxido de vanadio y bentonita.

CAPITULO II

ANTECEDENTES TEORICOS Y EXPERIMENTALES

La deformación y ruptura de gotas suspendidas dentro de un medio viscoso ha sido estudiada por algunos investigadores desde el punto de vista teórico y experimental.

Dichas investigaciones constituyen grandes aportaciones, ya que el fenómeno de deformación y rompimiento de gotas de fluido inmiscible en otro es de gran relevancia en algunos procesos químicos, poliméricos y biológicos.

En años recientes, la industria de proceso de polímeros ha desarrollado clasificaciones de materiales poliméricos que al combinarse con otro polímero o aditivo producen fluidos a dos fases.

Tales combinaciones, al formar flujos a dos fases, provocan también la formación de pequeñas partículas o gotas inmiscibles que cambian trascendentalmente las propiedades reológicas del producto final.

Las propiedades que pueden cambiar son, entre otras: la viscosidad, la elasticidad y la tensión superficial. El primer estudio acerca de la deformación de gotas fue hecho por Taylor (1) quien consideró una gota de un fluido muy viscoso, con una rapidez de deformación uniforme y un flujo hiperbólico. En su análisis Taylor utilizó la Solución de la Ecuación General de Stokes, para determinar los campos de velocidad y presión dentro y fuera de la gota.

Sus resultados indicaron que, en flujo estacionario, la gota, que inicialmente era esférica, adoptaba una forma de esferoide que dependía esencialmente de dos parámetros:

Uno, la relación de viscosidades de la gota con respecto del medio, y dos, la relación que existe entre el producto de los radios (gota y tubería) con el esfuerzo cortante aplicado y la tensión interfacial.

Concluyó que, a bajas rapidezces de deformación, sus observaciones experimentales concordaban con su teoría.

Bartok y Mason (2) realizaron experimentos similares a los de Taylor, utilizando un flujo de Couette y observaron las líneas de flujo en el interior de las gotas, que devenían esferoides. Los resultados obtenidos concordaban con la teoría de Taylor.

Chaffey y Brenner (3) trataron de mejorar esta teoría, obteniendo soluciones de segundo orden en términos de un parámetro adimensional "E" definido como $E = We(19k+16/16k+16)$. Concluyeron que los resultados de Taylor eran válidos siempre y cuando los efectos de viscosidad fueran dominantes con respecto a los efectos de tensión interfacial, o esta fuera dominante sobre aquella, pero no cuando ambos efectos fueran comparables en magnitud.

Desafortunadamente, los trabajos mencionados anteriormente fueron hechos únicamente para fluidos Newtonianos.

Los trabajos hechos para explicar la deformación de gotas con fluidos no Newtonianos son pocos. Entre ellos pueden mencionarse los de Chin y Han (4) quienes trabajaron con gotas viscoelásticas en un medio viscoelástico.

En su trabajo hacen especial énfasis en el intento por explicar el papel que juega la elasticidad en la deformación y rompimiento de gotas teniendo como parámetros principales a la viscosidad y a la tensión interfacial. Aunque inicialmente utilizan un flujo de Poiseuille, este sufre perturbaciones que son difícilmente cuantificables. Por dichas imperfecciones en el flujo no pueden establecer una relación real entre los efectos observados y los efectos esperados en su teoría.

Han y Funatsu (5) utilizan un arreglo similar al de Chin y Han, que consta de una tubería con entrada cónica a una de menor diámetro. Toman en cuenta gasto constante y materiales viscoelásticos también. Concluyeron que en canales convergentes circulares, el rompimiento de las gotas ocurre cuando éstas sufren una elongación dentro del canal de menor diámetro y reculan dentro de una zona de relajamiento.

Encontraron que las condiciones de deformación y ruptura están relacionadas con las propiedades reológicas de las sustancias empleadas, y consideraron que las gotas de materiales viscoelásticos eran hidrodinámicamente más estables que las gotas newtonianas.

Olbricht y Leal (6) trabajaron con una tubería sinusoidal y gasto constante. Manejaron el concepto de presión extra debido a la presencia de la gota en la tubería; la relación de velocidades (U); la relación de densidades (ρ) y el número capilar (Γ), definido como: $\Gamma = \mu U_0 / \gamma$ (γ es la tensión interfacial); además, el número de Deborah, definido como $D = \theta(\dot{\gamma}) / \lambda \dot{\gamma}$ (θ es el tiempo de relajación del fluido y λ la rapidez de deformación).

Analizaron gotas excéntricas en el flujo y su estudio se enfocó principalmente a explicar la importancia del cociente de densidades con relación a la deformación y rompimiento, debido a los efectos de pared que causa la gota.

Concluyeron que debido a la posición excéntrica de la gota, ésta causa un incremento de presión en ΔP , con relación a una gota que pasa por el centro.

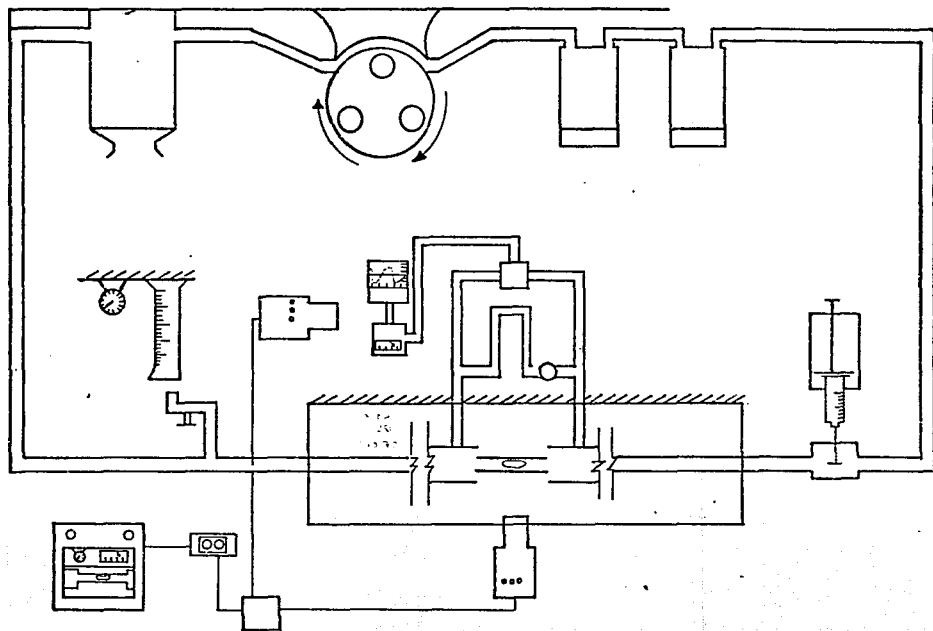
En sus experimentos con fluidos viscoelásticos como medio de suspensión, observaron que la viscoelasticidad es un factor importante en la determinación de la forma de la gota.

C A P I T U L O I I I

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO Y OBTENCION DE DATOS

O B J E T I V O

Explicar el mecanismo de ruptura y deformación de gotas newtonianas y viscoelásticas dentro de un canal de sección transversal circular, con una constricción abrupta, que tiene una relación de radios 1:4 y con un fluido newtoniano de suspensión en un flujo de bajo número de Reynolds.



ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental se muestra en la figura 3.1.

Una bomba peristáltica (P) mueve el fluido (A) y lo hace pasar a través de dos botellas amortiguadoras (B) para obtener un flujo uniforme. Sin las botellas se tendría un flujo oscilatorio.

Después de pasar por las botellas amortiguadoras, el flujo atraviesa por una cámara de recepción (r) en donde con una jeringa milimétrica (SP), que se activa por un émbolo con velocidad controlada, se inyectan gotas de volumen conocido. El flujo, ya a dos fases (medio y gota), pasa por la sección de prueba que consta de una tubería de sección transversal circular con una constricción abrupta que la conecta a una tubería con un diámetro menor.

Un transductor diferencial de presión (T) con respuesta instantánea mide el gradiente de presión existente en la sección de prueba. Un manómetro diferencial se encuentra colocado adicionalmente en paralelo con el transductor de presión (T). El manómetro diferencial indica únicamente la diferencia de presión necesaria para mantener el flujo sin la gota.

Un multímetro digital (M) recibe la señal que capta el transductor

de presión. El multímetro da la medida instantánea de la presión extra causada por la gota en el momento que pasa por la constricción.

La tubería tiene una longitud de 2 m y la sección de prueba, 0.4m. La distancia entre las terminales del transductor es de 0.2 m. La longitud de la tubería de menor diámetro es de 0.15 m.

Después de que la gota ha atravesado la sección de prueba, es retirada del flujo por una conexión en "T" que se encuentra al final de la tubería.

Aquí mismo se mide el gasto con una probeta graduada y un cronómetro.

La sección de prueba se encuentra sumergida en un baño a temperatura constante.

Con dos cámaras de video se hace la visualización del flujo.

Las cámaras se encuentran interconectadas por medio de un divisor de imágenes, que da la señal dividida en un monitor. Las imágenes obtenidas se graban en una videgrabadora.

La primera cámara es móvil y se encuentra frente a la sección de prueba, para seguir el movimiento de la gota. La segunda cámara permanece fija frente al multímetro y al cronómetro, para registrar lec

turas instantáneas de presión al paso de la gota por la constricción y, cuando es necesario, lecturas en el cronómetro para tener la velocidad de la gota.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Todos los datos se tomaron cuando el flujo se encontraba en régimen estacionario. El tiempo de estabilización del flujo dependía del gas to que se estuviera manejando, así como el tiempo en que la gota atravesaba la zona de prueba.

Las gotas podían ser inyectadas cuando el multímetro marcaba una lectura estable. Una vez que la gota había atravesado la sección de prueba, tenía que retirarse inmediatamente.

Para inyectar una nueva gota se tenía que esperar primero, a que la gota anterior saliera del sistema, y después que la lectura en el multímetro se estabilizara nuevamente.

Debido a que en algunas gotas se utilizó tetracloruro de carbono (CCl_4), ya que éste es volátil a temperatura ambiente, la densidad y la viscosidad de la mezcla: [CCl_4 más aceite para automóvil] tenían que verificarse continuamente.

Por otro lado, la glicerina absorbe humedad del medio ambiente y por lo tanto su densidad y viscosidad no son constantes. Por esa razón no se utilizó glicerina químicamente pura, sino glicerina diluida en agua destilada al 95% de su concentración en peso y se manejó siem-

pre dentro de un depósito completamente sellado, para que absorbiera la menor cantidad de humedad posible. Igualando las densidades del fluido de suspensión y la de la gota, se aseguraba que ésta viajara por la línea del centro del flujo.

La sección de prueba, incluyendo el depósito que contenía al fluido, se encontraba sumergido en un baño a temperatura constante. Todas las mediciones efectuadas se hicieron a una temperatura de 20°C.

El arreglo experimental fue diseñado por J. Cruz Mena y F. Serranía con la supervisión del Dr. Baltasar Mena. Fue construido en el taller del Instituto de Investigaciones en Materiales.

FLUIDOS UTILIZADOS

Los primeros experimentos se hicieron con fluidos newtonianos. {

Para el fluido de sostén se utilizó glicerina al 95% de su concentración en peso en algunos casos y aceite silicón de diferentes viscosidades (10cP y 50cP) en otros.

Las gotas se hicieron de una mezcla de aceite para automóvil y tetracloruro de carbono (CCl_4), para igualar la densidad de la gota con la del medio. En todos los experimentos la relación de densidades fue aproximadamente igual a la unidad.

Una vez que se estableció el mecanismo de deformación y ruptura, se procedió a utilizar gotas de fluidos viscoelásticos.

Las gotas viscoelásticas fueron hechas de policramida separan AP-30 diluida en agua destilada al 0.6% de su concentración en peso.

El fluido de sostén fue aceite silicón de diferentes viscosidades (10cP y 50cP). Por estas características siempre se manejó un fluido de sostén newtoniano.

PARAMETROS ADIMENSIONALES

Para explicar el fenómeno de deformación y/o ruptura de gotas fue necesario tomar en cuenta parámetros que fueran importantes y que a la vez pudieran ser determinados experimentalmente. Se buscó que tuvieran una interrelación que permitiera encontrar características generales dentro del problema. Ellos son los siguientes:

$$u = \frac{u_1}{u_0}$$

Donde: u_1 es la velocidad promedio de la gota y u_0 es la velocidad del fluido de sostén.

$$\zeta = \frac{\mu_i}{\mu_0}$$

Donde: μ_i es la viscosidad de la gota y μ_0 es la viscosidad del fluido de sostén.

$$R = \frac{r}{R_0}$$

Donde: r es el radio de la gota (cuando tiene forma esférica) y R_0 el radio interior de la tubería.

$$\beta = \frac{\mu_0 u_0}{\gamma}$$

Donde: μ_0 es la viscosidad del flujo en suspensión, u_0 la velocidad del flujo y γ la tensión interfacial.

$$\rho = \frac{\rho_i}{\rho_0}$$

Donde: ρ_0 es la densidad del fluido en suspensión y ρ_i la densidad de la gota.

ΔP

Gradiente de presión debido a la gota.

MEDICION DE PARAMETROS

Velocidad de la gota (u_1):

La medición de u_1 se hizo visualmente, colocando una regla graduada exactamente atrás de la tubería y con un cronómetro. La referencia fue la parte central de la gota. Las lecturas fueron captadas por una cámara de televisión y posteriormente grabadas en una videocinta.

Velocidad del flujo (u_0):

Se utilizaron trazadores dentro del flujo que describan el perfil de velocidades. Se consideró la velocidad máxima y se registró la lectura en una videocinta.

Densidad (ρ_0 y ρ_1):

Para estas mediciones se utilizó un picnómetro de volumen conocido y temperatura controlada.

Viscosidad (μ_0 y μ_1):

Para los fluidos newtonianos se utilizó un viscosímetro de Brookfield. Para la medición de viscosidad de fluidos No Newtonianos fue necesario utilizar el Regoniómetro de Weissenberg de la Facultad de Ingeniería.

Tensión Interfacial:

La tensión interfacial que existe entre el medio y la gota se obtuvo mediante un aparato muy sencillo, diseñado especialmente para este problema. Consiste en un recipiente de forma semiesférica, totalmente sellado. En la parte superior se insertaron dos tubos capilares; uno de los cuales sirve para mostrar la presión hidrostática del fluido que se encuentra contenido en el recipiente. Por el segundo tubo, que se encuentra conectado a una jeringa, se inyecta una gota con presión y volumen controlados. Una vez que la gota se encuentra dentro del recipiente y con una forma totalmente esférica, se mide en el primer tubo capilar la diferencia de altura causada por ésta. Como se conoce la presión causada por la gota cuando se encuentra dentro del fluido y se conoce su volumen, puede entonces conocerse la fuerza por unidad de longitud que existe entre la gota y el otro fluido.

Gradiente de presión causado por la gota (ΔP):

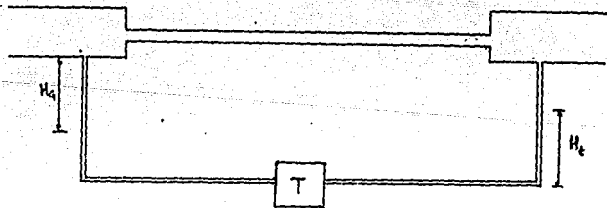
En el arreglo experimental, dentro de la sección de prueba, se encuentra colocado un transductor de presión. Dicho transductor de presión mide la diferencia de presión que causa el flujo. Cuando el flujo ha alcanzado un estado estable, la lectura del transductor se cierra en ceros y en el momento en que la gota atraviesa por la constricción registra exclusivamente el incremento de presión causado por la gota.

CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DE PRESION

Como se expresó anteriormente, para obtener la medición de la diferencia de presión causada por la gota al paso por la constricción se utilizó un transductor de presión. Dicho transductor se encuentra conectado a un multímetro el cual da las lecturas en unidades de corriente eléctrica (mA).

Por la razón anterior se tuvo que hacer primero una calibración del transductor para tener lecturas lo más exactas posible y segundo una correlación entre miliamperes y unidades de presión (dín/cm^2).

El esquema es el siguiente:



Los datos son los siguientes:

h_g (cm)	I (mA)	Q(ml/min)
2.3	0.615	24.7
2.7	0.725	28.99
3.4	0.905	36.5
1.6	0.414	17.18
0.8	0.214	8.59
0.4	0.114	4.29

TABLA (a)

h_c (cm)	I (mA)	Q(ml/min)
22	1.710	27.9
9.2	0.682	13.2
20.7	1.609	26.5
29.3	2.240	10.6
14.4	1.051	19.6
21.4	1.680	34.4

TABLA (b)

Correlacionando los datos de la tabla (a) se tiene:

$$m = 0.025$$

$$b = 0.018$$

$$I = 0.025 Q - 0.018 \quad (1)$$

Poniendo la ecuación (1) en función de h_G :

$$I = 0.26 h_G + 0.018 \quad (2)$$

Como en el arreglo experimental $\Delta P = (h_t - h_G) \rho g$, se correlacionan los datos de la tabla (b) y se obtiene finalmente:

$$\Delta P = 4452,14 I + 17.5$$

Donde:

h_G = Diferencia de altura de glicerina en el manómetro

h_t = Diferencia de altura de CCl_4 en el manómetro

La gráfica obtenida se muestra en la fig. 3.2

$\Delta P \left(\frac{\text{cm}}{\text{cm}} \right)$

Tabla de correlación

11000

10000

9000

8000

7000

6000

5000

4000

3000

0

0.5

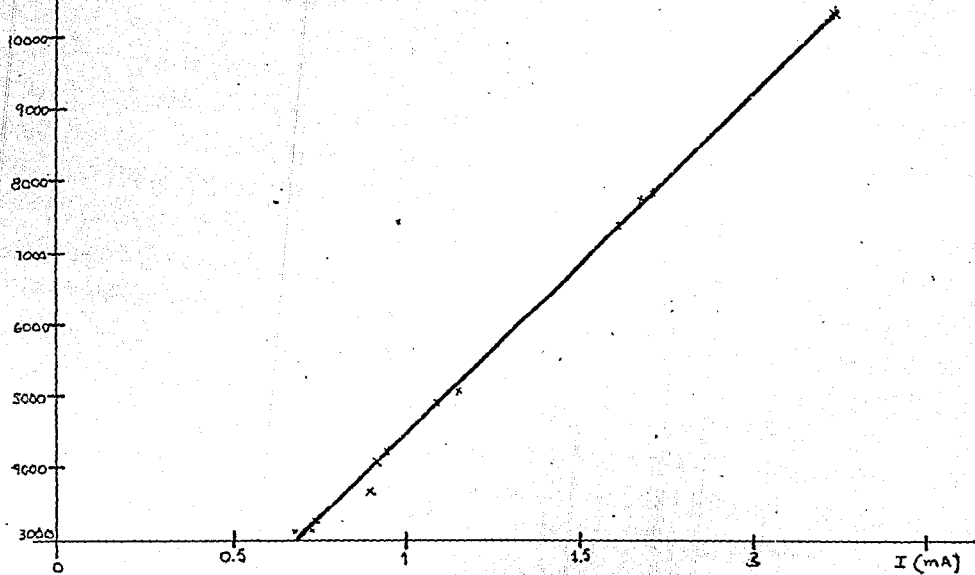
1

1.5

3

I (mA)

Fig. 3.1



DATOS OBTENIDOSGOTA: CCl₄ + aceite para autom6vil

MEDIO: Glicerina

No	Q(ml/min)	λ	$\Delta P(\text{Din/cm}^3)$	$\Delta P(\text{Din/cm}^3)$ gota	u	RUPTURA
1	8.8	1.05	1952.84	781.01	1.2	sf
2	8.6	1.09	1874.72	429.46	1.2	no
3	8.2	1.14	1874.72	898.19	1.3	sf
4	8.2	1.05	1835.65	781.01	1.3	sf
5	8.0	1.28	1796.60	898.19	1.0	no
6	13.4	0.8	2421.57	468.52	1.2	sf
7	13.8	0.7	2421.57	273.21	1.2	sf
8	13.6	0.63	2421.57	273.21	1.2	sf
9	12.4	1.03	2460.63	781.01	1.2	sf
10	13.4	0.88	2421.57	624.76	1.1	sf
11	13.6	1.07	2460.63	1015.37	1.2	sf
12	13.6	1.07	2421.57	820.07	1.2	sf
13	13.6	1.05	2382.51	781.01	1.2	sf
14	17.0	1.04	3163.73	1015.37	1.0	sf
15	17.4	0.84	3163.73	823.07	1.2	no
16	17.2	0.95	3163.73	937.27	1.2	sf
17	17.4	1.07	3124.67	1093.50	1.0	sf
18	17.4	1.14	3124.67	1015.37	1.0	sf
19	17.4	1.04	3124.7	1015.37	1.2	sf
20	17.4	1.04	3124.56	1132.56	1.2	sf
21	19.2	1.01	5487.87	812.26	1.1	sf
22	19.4	0.71	5476.15	679.45	1.0	no
23	28.6	1.05	5487.87	812.26	1.2	no
24	26.2	0.75	5476.15	679.45	1.2	no

TABLA 3.3

GOTA: Silicón
 MEDIO: Glicerina

No	Q(ml/min)		P(Din/cm ²)	u	RUPTURA
1	18.14	1.11	7615.2	1.2	no
2	19.1	1.25	7617.4	1.2	sf
3	19.01	1.17	7621.2	1.2	sf
4	19.2	1.18	7617.4	1.2	sf
5	16.98	0.90	4921.3	1.1	no
6	16.91	0.95	4920.3	1.2	no
7	17.33	1.21	4895.1	1.1	sf
8	17.20	1.24	4896.6	1.2	sf
9	17.24	1.30	4896.6	1.2	sf

TABLA 3.4

GOTA: Separán AP-30 8%
 MEDIO: Silicón

No	Q(ml/min)		P(Din/cm ²)	u	RUPTURA
1	31.85	0.80	11436.3	1.2	no
2	31.86	1.09	11426.3	1.2	no
3	31.85	1.17	11426.3	1.1	no
4	31.85	2.1	11246.3	1.1	no
5	31.85	2.4	11246.3	1.1	no
6	12.50	2.4	10140.1	1.2	no
7	12.50	2.2	10141.2	1.2	no

TABLA 3.5

CAPITULO IV

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

PATRONES DE DEFORMACION Y ROMPIMIENTO

1. SISTEMA NEWTONIANO - NEWTONIANO

EFFECTOS DE TAMAÑO Y GASTO

Para gotas de tetracloruro de carbono (CCl_4) + aceite para automóvil y glicerina como fluido de sostén, se encontró un volumen crítico de la gota a partir del cual empieza a existir rompimiento.

En la fig. 4.1 se muestra una secuencia fotográfica de una gota pasando a través de la constricción.

Para gastos debajo de $20\text{cm}^3/\text{min}$ y $\lambda = 0.7$ no hay rompimiento

En la fig. 4.2 se muestra una gota del mismo volumen pero con un gasto de $Q = 23\text{cm}^3/\text{min}$. En esta secuencia la gota se rompe en una grande seguida por dos de volumen muy pequeño.

Manteniendo un gasto entre $18\text{cm}^3/\text{min}$ y $20\text{cm}^3/\text{min}$ se encontró que existe un tamaño crítico de la gota, a partir del cual todas las gotas se rompen. Dicho volumen se encuentra cuando λ sobrepasa el valor de 0.7

En todos los casos la relación de viscosidades es $\zeta = 1/4$

2. SISTEMA NEWTONIANO - NEWTONIANO

EFFECTOS DE VISCOSIDAD

En la fig. 4.3 se muestra una gota de silicón + CCl_4 y el fluido de sostén es glicerina. Las condiciones de flujo son las mismas que en la fig. 4.2; la única variación se encuentra en la relación de viscosidades. La viscosidad de la gota es mayor que la de la glicerina $Z > 1$

En esta secuencia se observa que la gota sufre deformación pero no hay ruptura.

En la fig. 4.4 el volumen de la gota se incrementa hasta $\lambda=1.4$ y se observa deformación, también sin rompimiento. Igual que en la fig.4.3 se tiene que $Z > 1$

Cuando $Z > 1$ los valores críticos de λ y Q para los cuales existe rompimiento son más grandes debido al incremento en la relación de viscosidades.

3. SISTEMA NEWTONIANO _ VISCOELASTICO

EFFECTOS DE VISCOELASTICIDAD

En las fig. 4.5 y 4.6 se muestran casos comparativos. La secuencia 4.5 muestra una gota de glicerina, con silicón como fluido de suspensión. La secuencia 4.6 se trata de una gota de separán AP-30 al 0.6% de concentración, con silicón de 10cP como fluido en suspensión.

Las condiciones de flujo en ambas secuencias son iguales.

En la fig. 4.5 puede observarse un comportamiento newtoniano, causante del rompimiento debido a que el volumen de la gota y las condiciones de flujo han sobrepasado el valor crítico.

En la fig. 4.6 puede observarse un comportamiento distinto, ya que la gota no se rompe.

Lo anterior se vuelve significativo al observar la secuencia de la fig. 4.7. El material de la gota y el medio es el mismo que el de la fig. 4.6. Aunque $\lambda=2$ y $Q=40\text{cm}^3/\text{min}$, la gota no se rompe.

En estos casos son los efectos de elasticidad los que inhiben el rompimiento de la gota.

SECUENCIAS FOTOGRAFICAS

Fig. 4.1

Sistema: Newtoniano - Newtoniano

Gota: Aceite para automóvil + CCl_4

Medio: Glicerina

 $Q = 20 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 0.7$ $\tau = 0.2$ $\rho = 1.0$

No hubo rompimiento

Fig. 4.2

Sistema: Newtoniano - Newtoniano

Gota : Aceite para automóvil + CCl_4

Medio : Glicerina

 $Q = 23 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 0.7$ $\tau = 0.2$ $\rho = 1.0$

Sí hubo rompimiento

Fig. 4.3

Sistema: Newtoniano - Newtoniano

Gota: Aceite silicona + CCl_4

Medio: Glicerina

 $Q = 23 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 0.7$ $\tau = 1.2$ $\rho = 1.0$

No hubo rompimiento

Fig. 4.4

Sistema: Newtoniano - Newtoniano

Medio: Glicerina

Gota: Aceite silicón + CCl_4 $Q = 23 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 1.4$ $z = 1.2$ $\rho = 1.0$

No hay rompimiento

Fig. 4.5

Sistema: Newtoniano - Newtoniano

Gota: Glicerina

Medio: Silicón

 $Q = 25 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 1.0$ $z = 0.2$ $\rho = 1.0$

Si hay rompimiento

Fig. 4.6

Sistema: Newtoniano - Viscoelástico

Medio: Aceite silicón

Gota: Separán AP-30

 $Q = 25 \text{ cm}^3/\text{min}$ $\lambda = 1.0$ $\rho = 1.0$

No hay rompimiento

Fig. 4.7

Sistema: Newtoniano - Viscoelástico

Medio: Aceite Silicón

Gota: Separán AP-30

$Q = 40 \text{ cm}^3/\text{min}$

$\lambda = 2.0$

$\rho = 1.0$

No hay rompimiento



Fig 4.1

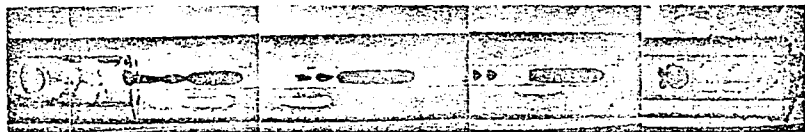


Fig 4.2



Fig. 4.3

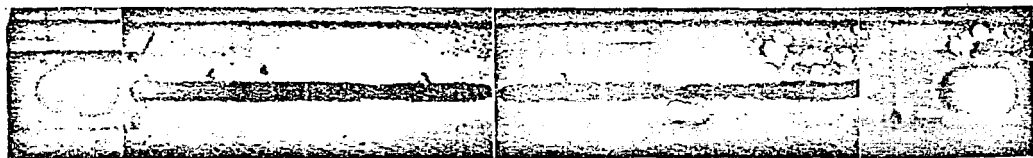


Fig. 4.4

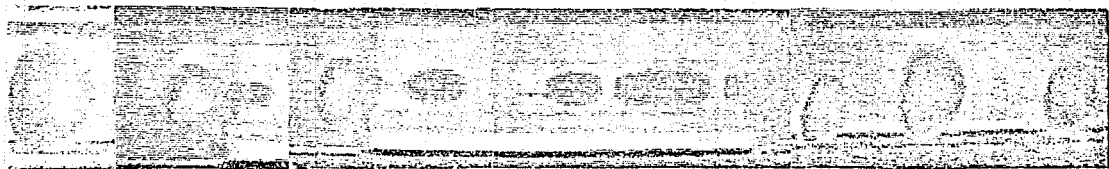


Fig. 4.5

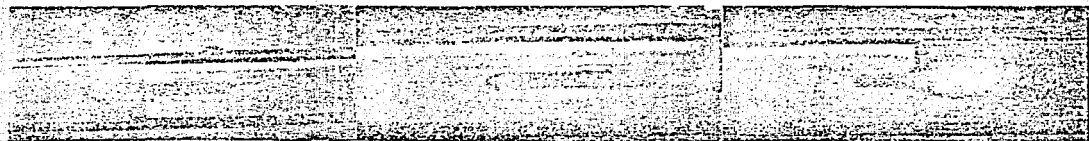


Fig. 4.6

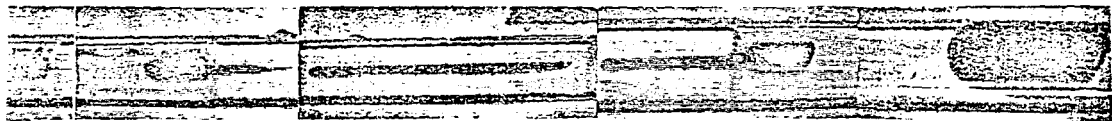


Fig. 47.

OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Frecuentemente el rompimiento de la gota ocurre cuando ésta recula.

Un contraste sorprendente entre un fluido Newtoniano y uno no Newtoniano se puede observar en el experimento de Kapoor (8). En un tubo introdujo una solución al 2% de carboximetil celulosa en agua, en estado estacionario y marcó con una línea de grafito una referencia en el fluido. Aplicó un gradiente de presión que retiró segundos más tarde.

Con este experimento observó que la línea de grafito (que se había deformado con el campo de velocidad del flujo), al retirar el gradiente de presión, trataba de regresar a su estado original.

Relacionando lo anterior con el experimento se tiene lo siguiente:

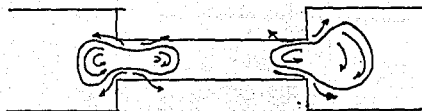


Fig. 4.a.

Puede observarse que la gota al entrar a la constricción sufre deformación, y al salir la gota recula, causando algunas veces rompimiento. Dentro de la constricción existe una zona en la cual siempre se forma ahorcamiento y es ahí precisamente donde, si existe, se lleva a cabo el rompimiento. Esto podría deberse a las líneas de flujo que se forman dentro de la constricción debido a la geometría utilizada.

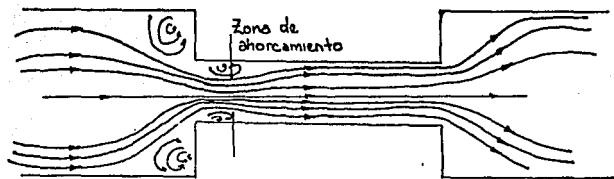


Fig. 4.b.

Esto es difícilmente comprobable, ya que no se tiene un método efectivo de visualización de flujo. Aunque se trabajó con flujo laminar, el cambio abrupto en en el área de la sección transversal podría formar el efecto de "vena contracta", que hace que se produzcan las perturbaciones indicadas en la fig. 4.b.

Por otro lado, existe un valor crítico de λ que depende de la relación de viscosidades y del gasto. En otras palabras, para cierta relación de viscosidad y gasto, existe un tamaño crítico de la gota en el cual se presenta el rompimiento. Entonces: $\lambda_c = f(Q, \mu)$.

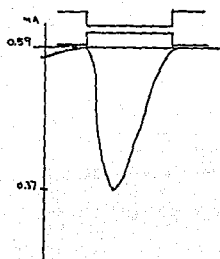
La geometría de la tubería es de fundamental importancia para fijar los parámetros anteriores.

Con relación al gradiente de presión debido a la gota se encontró que el valor máximo de presión se tiene cuando la gota se encuentra exactamente en la entrada de la constricción. A cerca de la relación que guarda este parámetro con la deformación o rompimiento, se obtuvo lo siguiente:

Como se habló anteriormente en el Capítulo II, F. Avila (8) trabajó con un gradiente de presión causado únicamente por la gota al pasar por la constricción (ΔP^+).

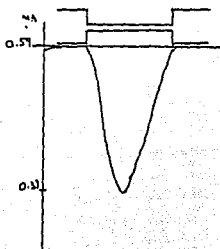
Debido a esos estudios, en el presente trabajo se tomó como base ese parámetro con el fin de poder establecer un patrón de deformación y rompimiento ligado a éste.

A continuación se muestran dos gráficas con las mismas características de material y tamaño de la gota, así como las mismas condiciones de flujo:



$\lambda = 1.07$
 $Q = 11.1 \text{ ml/min}$
 $\Delta P = 996.77 \text{ dy/cm}^2$
 Sí hay ruptura

4.c



$\lambda = 1.07$
 $Q = 13.60 \text{ ml/min}$
 $\Delta P = 996.00$

No hay ruptura

4.d.

Lo que puede observarse es que en la gráfica 4.c. existe rompimiento y en la gráfica 4.d. no existe rompimiento. Por lo que puede concluirse que el parámetro de gradiente de presión debido a la gota no está ligado con el rompimiento de la misma.

Para el caso de gotas viscoelásticas con las mismas condiciones de flujo que se usaron en las gotas newtonianas se observó que los efectos de elasticidad son dominantes en la deformación..

Particularmente, para el caso de Separán AP-30 al 0.6% no existe un valor crítico de gasto o volumen. Los efectos de elasticidad inhiben el rompimiento: la gota recula pero no se rompe.

El valor crítico de presión debida a la gota es mucho menor que para gotas newtonianas, y el valor máximo es mucho mayor.

CONCLUSIONES

SISTEMA NEWTONIANO - NEWTONIANO

Como resultado de los experimentos anteriormente descritos, los mecanismos de ruptura parecen ser los siguientes:

1. Existe un valor crítico de λ desde el cual empieza a existir rompimiento. Ese valor es λ_c .
2. Cuando los efectos viscosos son dominantes, es decir, $\lambda > 1$ el valor crítico de λ aumenta considerablemente. Hasta un valor de $\lambda = 1.4$ no existe rompimiento.

SISTEMA NEWTONIANO - NO NEWTONIANO

No existe un valor crítico de Ω y λ para el cual exista rompimiento. Los efectos de elasticidad para este caso, son los que inhiben el rompimiento.