

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANALISIS VISCOELASTICO DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS EN EL
PROCESO DE RECUBRIMIENTO VIA RODILLOS

POR

MONICA ALCALA SOBREVILLA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIA DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

DICIEMBRE 2007

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANALISIS VISCOELASTICO DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS EN EL
PROCESO DE RECUBRIMIENTO VIA RODILLOS

POR

MONICA ALCALA SOBREVILLA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIA DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

DICIEMBRE 2007

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos A. Guerrero Salazar, por el gran apoyo que me dio al permitirme y recomendarme a realizar mi trabajo de Tesis en ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL, esto me ayudo a desarrollar mucho mis habilidades ya que me estuve en la necesidad de hacer uso de ellas, nuevamente muchas gracias por su apoyo y confianza.

Al Dr Gabriel Ascanio quien me asesoro y guió cuando estuve con el en Montreal, gracias por sus grandes aportaciones técnicas que hizo a mi trabajo de tesis, gracias tambien por confiar en mi y apoyar mi estancia técnica .

Al Dr Philippe A Tanguy por aceptarme como un estudiante mas de su grupo de investigadores y por permitirme usar las instalaciones del POLYTECHNIQUE DE MONTREAL para realizar la experimentación de mi proyecto.

A los maestros que compartieron conmigo y mis compañeros sus conocimientos y experiencias adquiridas en la materia a lo largo de su vida profesional

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por prestar sus instalaciones para preparar a sus alumnos y hacerlos valer internacionalmente en el ámbito científico y de esta manera atraer la mirada de otros mercados hacia nuestro país para la inversión en tecnología.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el financiamiento de la beca brindada, con este apoyo me ha permitido tener un futuro mas prometedor y sobre todo me ha hecho reflexionar sobre la importancia de valorar aun mas a mi país y de querer poner todo de mi parte para apoyar el desarrollo tecnológico.

INDICE

Resumen	3
Capitulo 1. Introducción General	
1.1 Introducción General	4
1.2 Defectos	7
1.3 Preparación de los fluidos	8
1.4 Objetivo General	9
Capitulo 2. Revisión Bibliográfica	
2.1 Recubrimiento por rodillos	10
2.2 Intervalo de distancia entre rodillos deformables	15
2.3 Formación de películas múltiples a la salida del “nip”	16
2.4 Misting	18
2.5 Reología de suspensiones y de los fluidos	24
2.6 Reología de corte	25
2.7 Reología extensional	27
Capitulo 3. Equipo y Metodología	
3.1 Maquina de rodillos	29
3.2 Transductor de presión	31
3.3 Reómetro de orificio	33

	5
3.4 Obtención de imágenes	35
3.5 Tensión superficial	36
3.6 Fluidos	37
Capitulo 4 Resultados y Discusión	
4.1 Caracterización de los fluidos	39
4.2 Perfiles de presión	46
4.3 Viscosidad extensional	58
4.4 Análisis de imágenes	70
Conclusiones y Recomendaciones	77
Referencias Bibliográficas	79
Índice de Figuras	82
Índice de Tablas	84

RESUMEN

En este trabajo se estudio los efectos reologicos sobre el fenómeno del misting en el recubrimiento por rodillos para ello se preparo siete fluidos diferentes, cada uno se hizo pasar individualmente a través de una máquina recubridora vía rodillos de laboratorio con la finalidad de caracterizar las propiedades hidrodinámicas de cada uno de los fluidos. La máquina consiste básicamente de un rodillo deformable y un rodillo rígido, además de un sistema de alimentación y una cuchilla barredora que sirve para controlar la cantidad de fluido aplicado sobre el rodillo de transferencia (rodillo deformable). Los perfiles de presión para la caracterización hidrodinámica se obtuvieron mediante un transductor miniatura localizado sobre la superficie del rodillo de soporte (rodillo rígido). El flujo a la salida del punto donde se juntan los rodillos “nip” se analizó mediante una cámara de alta velocidad. Las propiedades reológicas de corte se determinaron mediante un reómetro modelo AR 2000. Las propiedades extensionales fueron evaluadas mediante un reómetro de orificio, el principio de funcionamiento de este reómetro de orificio consiste en calcular la viscosidad extensional como una función de la velocidad del flujo y la caída de presión del fluido que pasa a través de un orificio pequeño.

Esta investigación demostró que el “misting” puede ser generado por dos diferentes mecanismos: el rompimiento de las películas a la salida del “nip” y el efecto rocío, debido a la entrada de aire dentro del “nip”. Diversas observaciones mostraron que el rocío aparece cuando se tiene un “gap” deformable (como un rodillo sintético), y se manejan altas velocidades con una carga mínima. La entrada de aire al sistema se puede evitar aplicando cargas mayores de presión.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción General

El primer tratamiento de superficies por medio del recubrimiento fue realizado mediante brochas. El producto final fue un tapiz recubierto con un incremento en sus propiedades ópticas, tales como el brillo y los patrones de calidad de impresión del mismo. La velocidad de esta máquina es alrededor de 120 m/min, una de sus principales desventajas es que las brochas se desgastan rápidamente; consecuentemente fue posteriormente remplazada, apareciendo en su lugar el recubrimiento por medio de soplado, el cual tuvo un incremento en la velocidad de proceso 120 m/ min. a 300 m/ min.

En 1935 se introdujo el recubrimiento por medio de rodillos, este ha sido usado durante muchos años para el recubrimiento de una gran variedad de materiales. El recubrimiento por medio de rodillo fue desarrollado para depositar una película o un adhesivo a la superficie del papel para enlazar las fibras y es actualmente uno de los más utilizados.

En la actualidad el recubrimiento por rodillos es una de las técnicas mas utilizadas en numerosos procesos de producción, tales como recubrimiento de papel, cinta magnética, cinta adhesiva y película fotográfica, debido a las altas velocidades que puede alcanzar este método.

En la década de los cincuenta apareció un nuevo método de recubrimiento de superficies el cual involucra la aplicación de una cantidad importante de un fluido sobre una lámina, de la cual se procede a quitar el exceso por medio de una cuchilla o rodillo que controla el espesor de la película a aplicar. Con este método se ha obtenido velocidades de hasta 2500 m/ min. Pero debido a las fuerzas centrífugas, la lámina a recubrir esta sujeta a elevados esfuerzos de tensión y la tendencia a que esta se fracture trae como consecuencia tiempos muertos en las líneas de procesos.

En los últimos años la industria del recubrimiento ha ido evolucionando debido a la necesidad de disminuir los tiempos muertos e incrementar la velocidad del proceso. Uno de los métodos más modernos para el recubriendo de superficies es el MFC (metered film coater) o *Maquina de rodillos*. Este equipo consiste de un rodillo de transferencia y un rodillo de soporte (figura 1). Los rodillos rotan a la misma velocidad, el sustrato se alimenta al nip de transferencia (sección interfacial entre el rodillo de soporte y el rodillo de transferencia) y levanta una capa de fluido que previamente se ha depositado sobre el rodillo de transferencia. La cantidad de fluido sobre el rodillo de transferencia se controla por un rodillo o por una cuchilla la cual se mueve en sentido contrario al rodillo de transferencia, pero a mucho mas baja velocidad.

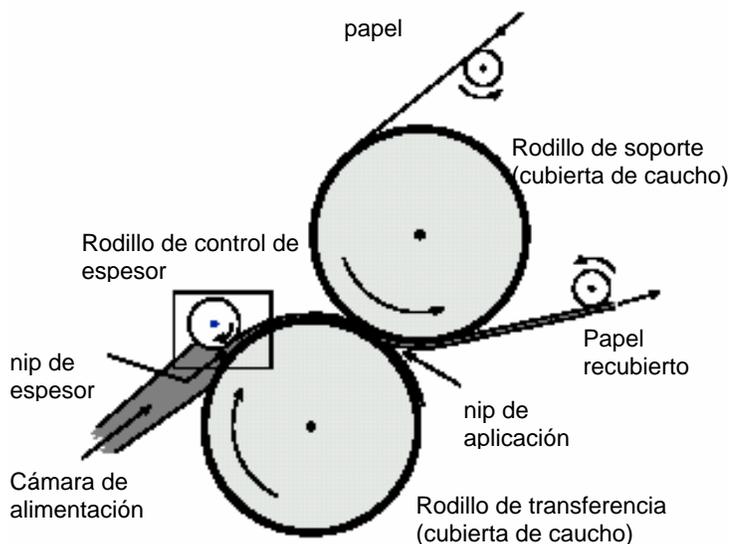


Figura 1. MFC. Máquina de recubrimiento por rodillos.

A la salida del nip (figura 1) se forman películas de fluido las cuales al aumentar la velocidad del rodillo se transforman en múltiples capas de fluido a lo largo de los rodillos y conforme aumenta la velocidad se va disminuyendo el espesor de dichas capas y comienzan a romperse formando pequeños filamentos, los cuales a su vez se desintegran creando pequeñas gotas que rebotan hacia las dos superficies divergentes, las cuales son lanzadas hacia la salida del nip este mecanismo se denomina “misting”. Por lo que si se requiere una superficie con un acabado liso la velocidad del proceso puede verse limitada debido a la inestabilidad del proceso. En el caso de fluidos Newtonianos, la estabilidad de la serie de películas o capas que se forman a la salida del nip es determinada por relación entre las fuerzas capilares y las fuerzas viscosas cerca de la superficie libre. El comportamiento de los fluidos no-Newtonianos (fluido Newtoniano más polímero) es diferente por lo que la naturaleza del flujo cerca de la superficie libre cambia drásticamente, pudiéndose presentar inestabilidades a velocidades de mucho menor magnitud que en caso de los fluidos Newtonianos. Cuando las fuerzas capilares son mucho más importantes que las viscosas la cantidad de “misting” se incrementa.

1.2 Defectos

El proceso de recubrimiento por rodillos esta sujeto a muchos fenómenos que pueden accionar gran variedad de defectos. Una clasificación general de los defectos físicos realizado por Gutoff y Cohen 1995 (1) es la siguiente:

Defectos continuos

- Estriado: es la formación de líneas de flujo a través de la lámina que se recubre.
- Bandas: es la apariencia uniforme de una banda de diferente cobertura.
- Cascada: es un disturbio periódico en la película con un patrón muy suave.

Defectos discretos

- Piel de naranja: es un acabado rugoso en la superficie seca el cual esta relacionado con la tensión superficial de los fluidos.
- Jaspeado: es una irregularidad que puede ser muy marcada o apenas apreciable.
- Burbujas: son consecuencia de la entrada de aire en el recubrimiento

Otros dos fenómenos que no son considerados como defectos físicos son el “misting” y el “spitting”. Como se definió anteriormente el “misting” es el efecto de rocío a la salida del “nip” y el “splitting” es una salida de mayor cantidad de fluido, generado por las mismas causas que el “misting”.

1.3 Preparación de los fluidos

La preparación de los fluidos debe de encaminarse de tal manera que se puedan obtener las propiedades mecánicas, ópticas y de impresión deseadas para recubrir el papel. Existen diversas metodologías que pueden ser utilizadas dependiendo entre otros factores del tipo de papel y del método de recubrimiento. Una preparación típica consiste de tres ingredientes básicos: pigmentos, agua y aglutinante.

En recubrimiento por rodillos, el fluido presenta diversos comportamientos de tipo reológico tales como tixotropía, pseudoplasticidad, aumento de la viscosidad, dilatancia y viscoelasticidad. Por lo que la caracterización de las propiedades reológicas es necesaria para simular el flujo del proceso. Los fluidos son sometidos a muy altas velocidades de corte y de extensión, estas velocidades de deformación o corte son extremadamente de corta duración (alrededor de 1 ms). Después de un rápido cambio en la razón de corte el fluido necesita algo de tiempo para alcanzar su estado estable. Lo cual algunas veces no es posible especialmente cuando se opera a altas velocidades, lo que favorece la formación de misting.

Finalmente, el fluido es presionado sobre el sustrato y el agua emigra de la solución al papel dejando heterogeneidades en el fluido, lo cual induce cambios en las propiedades reológicas. Sin embargo las propiedades de deshidratación también juegan un papel importante durante el proceso de recubrimiento.

1.4 Objetivo general

Como se mencionó uno de los problemas mas recurrentes en el recubrimiento por rodillos es el denominado “misting” ocasionando problemas como imperfecciones en el recubrimiento debido a que se adhieren gotas del fluido al substrato, otro de los problemas mas graves que ocasiona este mismo fenómeno es el incremento de tiempos muertos debido a paros de la maquinaria para su debida limpieza por lo que el objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento reológico de los fluidos viscoelásticos en comparación con los fluidos Newtonianos y no- Newtonianos en el flujo cerca de la superficie libre con el fin de entender el mecanismo del “misting”, su relación con fluidos viscoelásticos y con el conocimiento de estas propiedades manipular las mismas a nuestra conveniencia para evitar o retardar la presencia de este fenómeno, otro de los objetivos es llevarlo a un nivel de aplicación industrial para esto se realizará un estudio del efecto que tiene la velocidad de rotación de los rodillos y la carga aplicado sobre los mismos y se complementara con los resultados reológicos (viscosidad de corte, densidad, modulo elástico y viscoso, viscosidad extencional) obtenidos.

Modulo elástico y viscoso = Modulo complejo o dinámico

$$E^* = E' + jE''$$

Elástico Viscoso

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1 Recubrimiento por rodillos

Banks y Mill (2) llevaron a cabo uno de los primeros estudios del flujo de líquido entre dos rodillos. Ellos reportaron observaciones directas de la formación de cavidades en películas líquidas. Los experimentos fueron llevados a cabo siguiendo un patrón de velocidades. A velocidades moderadas se pudo observar la formación de burbujas, al ir incrementando la velocidad estas burbujas empezaban a crecer formando cavidades que finalmente se rompían debido a la caída de presión del líquido.

La forma de la película a la salida del “nip” es un reflejo de su comportamiento reológico en el recubrimiento por rodillos. Un análisis de este fenómeno mediante simulación computacional revela que la película tiene una forma simétrica la cual se genera debido a una estructura doble de remolino. Como se muestra en la figura 2.1, estas estructuras se encogen y tienden a desaparecer cuando se incrementa el número de capilaridad.

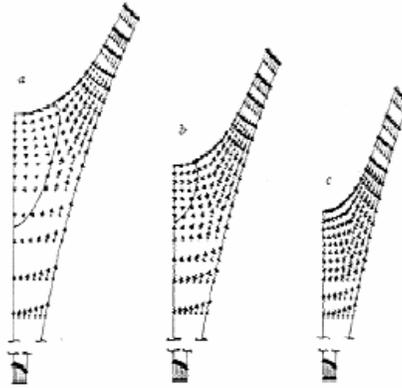


Figura 2.1 Efecto del Numero de capilaridad (Ca) en el flujo
a) 0.1 b) 0.2 c) 0.5

Un fenómeno similar fue observada por Tanguy et al (4), mediante un análisis numérico de recubrimiento por inmersión, ellos encontraron el desplazamiento de la superficie libre entre iteraciones consecutivas, este comportamiento se observa claramente cuando la red es repentinamente acelerada. La figura y posición del punto de estancamiento de la superficie depende estrechamente de las propiedades del fluido así como de la velocidad.

Gaskell et al (5) desarrollaron tres modelos matemáticos para describir la morfología de los meniscos que se forman en el recubrimiento por rodillos rígidos en los cuales se desarrolla un flujo bidimensional y estable de un fluido Newtoniano en la zona del nip entre los dos rodillos.

El método de elementos finitos revela una estructura “doble remolino” cuyo espesor depende de la velocidad del rodillo y la constante del gradiente de presión, las cuales fueron calculadas mediante el modelo de cero flujo.

Estas estructuras fueron observadas por Gaskell et al (6), quien caracterizo una técnica experimental para la visualización de flujo mediante un dado de inyección y análisis de imágenes de partículas. Para realizar esto estableció los siguientes parámetros:

La razón de flujo no-dimensional dada por:

$$\lambda = \frac{H_i}{2H_0}$$

Donde H_i es el espesor de la película en la entrada y $2H_0$ es el ancho mínimo del “nip”.

La velocidad del rodillo (S) es calculada de la siguiente forma:

$$S = \frac{U_1}{U_2}$$

Donde U_1 y U_2 son las velocidades de rotación del rodillo superior e inferior respectivamente. El radio efectivo del rodillo $R = 2(R_1^{-1} + R_2^{-1})^{-1}$ y finalmente el numero de capilaridad (Ca) el cual representa el efecto de las fuerzas viscosas y la tensión superficial actuando a través de una interfase entre un líquido y otra superficie inmisible.

Mediante la inyección de un líquido teñido en la película fue posible visualizar la trayectoria de las líneas de flujo en el “nip”. La figura 2.2 muestra una secuencia de la trayectoria del flujo. Se puede observar que el flujo que entra (parte inferior lado izquierdo) viaja a lo largo del rodillo hasta el menisco inferior y el resto del fluido gira y cambia su trayectoria en sentido contrario a la inicial moviéndose entre la estructura de “doble remolino” formada entre los rodillos y vuelve a girar una vez mas dirigiéndose hacia el menisco superior.

Con la intención de observar los detalles dentro de estas estructuras de “doble remolino” se utilizaron esferas huecas de vidrio con un diámetro de 8 μm , la trayectoria de estas esferas fue monitoreada a través del líquido. Un

analizador de partículas de este mismo flujo revela la existencia de dos sub-remolinos en cada uno de los remolinos ver figura 2.3.

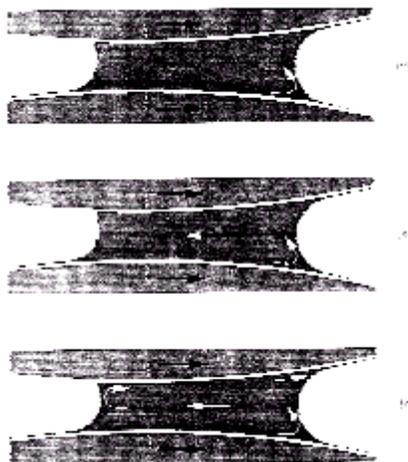


Figura 2.2 Las flechas muestran la trayectoria que sigue el fluido observándose claramente una doble trayectoria.

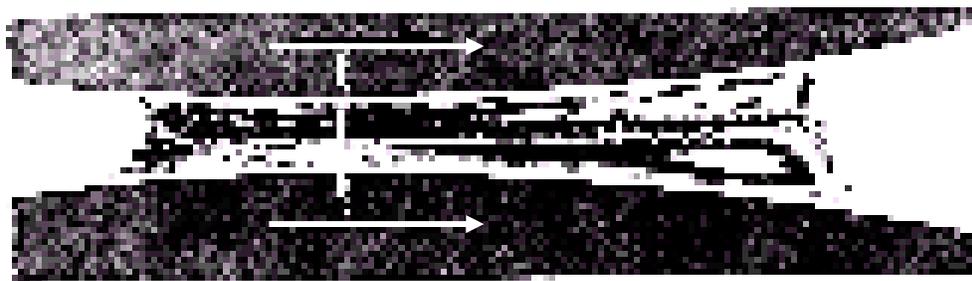


Figura 2.3 La línea punteada muestra el mínimo espacio libre entre los rodillos. Gaskell et al, (6)

2.2 Intervalo de distancia entre rodillos deformables

Coyle (6), (7) llevó a cabo un análisis unidimensional del proceso de recubrimiento por rodillos con un intervalo de distancia deformable. Él estudió el comportamiento de las fuerzas involucradas en el flujo entre rodillos deformables y obtuvo una correlación teórica para el espesor del recubrimiento. La validez de esta correlación fue comprobada experimentalmente por Cohu y Magnin(8) en un estudio en el cual se determinó que el módulo elástico de los cauchos en cilindros son dependientes del tiempo. Coyle (6), (7) propuso un modelo elastohidrodinámico aplicado a pequeñas deformaciones para predecir el perfil de presión entre los rodillos.

Carvalho y Scriven (9) y Carvalho (10) analizaron el efecto de la distancia entre rodillos deformables. Ellos confirmaron los resultados obtenidos por Coyle con un modelo unidimensional para describir la deformación del rodillo. Ellos también propusieron un modelo Hookeano bidimensional para predecir el perfil del rodillo y la distribución de presión con ambas distancias entre rodillos positivas y negativas cuando el rodillo es altamente deformado.

Carvalho y Scriven describieron el flujo entre un rodillo rígido y uno deformable. Ellos determinaron que la curvatura del menisco R_m gradualmente cambia de una curvatura constante a una película plana

2.3 Formación de películas múltiples a la salida del “nip”.

La formación de películas a la salida del “nip” es un fenómeno muy complejo dependiente de muchos factores tales como la velocidad del rodillo el espacio entre rodillos, la reología y propiedades de los fluidos etc. Un completo entendimiento de este mecanismo es la llave para establecer estrategias que reduzcan problemas tales como el “misting” y la formación de piel de naranja.

La formación de estas películas tiene lugar a pequeñas distancias de la salida del “nip” como un resultado de la acción de bombeo del fluido, el cual es alimentado en direcciones separadas por la divergencia de la superficie de los rodillos. Durante el proceso, el fluido es sometido a fuerzas de tensión y de compresión las cuales son equivalentes a fuerzas positivas y negativas de presión respectivamente.

El perfil de presión creado por estas fuerzas se caracteriza por tener dos picos uno positivo y uno negativo, el primero se encuentra poco antes de entrar a la parte en la que los rodillos se tocan debido a que la presión y la velocidad ejercida sobre el fluido va incrementando conforme este avanza hacia la salida del “nip” pero poco antes de llegar al área donde los rodillos se tocan, el fluido lleva una velocidad mayor que la de los rodillos, por lo que estos empiezan a ejercer una desaceleración sobre el fluido y por lo tanto la presión empieza a disminuir conforme el fluido sale de esta zona. En esta región se puede observar la contribución de Poiseuille la cual es generada por el campo de presión inducido por la geometría convergente/ divergente. Esta deja un perfil parabólico de presiones con una velocidad máxima de $1.5U$ (Coyle) (6).

Esta claro que la presión aumenta desde cero, a la entrada pasa por un máximo y después disminuye hasta cero a la salida, lo cual define el ancho del “nip”. A la salida del “nip” se puede observar un diferencial de presión negativo formándose una serie de películas las cuales según la magnitud de la presión subatmosférica tienden a crecer formando cavidades.

Reglat et Tanguy (12) determinaron que tanto la velocidad del rodillo como la viscosidad del fluido tienen un gran impacto en el valor de presión subatmosférica alcanzada.

MacPhee (13) propuso que la aparición del fenómeno denominado “misting” consta de la aparición primaria de tres fenómenos recurrentes consecutivos uno del otro dependiendo de la velocidad del rodillo (figura 2.4)

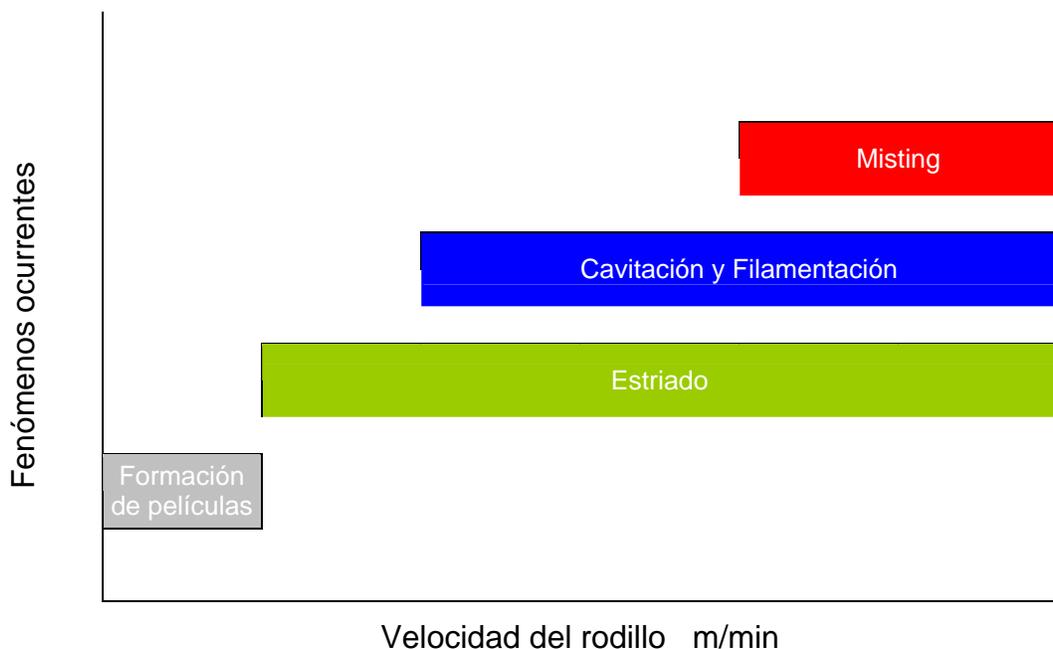


Figura 2.4 Cambio en el carácter de las películas a la salida del nip vs. Velocidad (Mc Phee 14a)

Se ha demostrado que la formación de películas a la salida del “nip” depende además de la velocidad de los rodillos de muchos otros factores tales

como la reología del fluido, la distancia entre los rodillos, la dureza de la superficie del rodillo etc. Cuando usamos un rodillo con una cubierta flexible y suave, el estriado puede reducirse o retardarse.

Es evidente que a reducidas velocidades la película que sale de los rodillos tiene una apariencia lisa y no presenta filamentación figura 2.5a. Cuando se incrementa la velocidad del rodillo la cavitación y la filamentación empieza a hacerse presente figura 2.5b. Este fenómeno se crea debido a la presión subatmosférica a la salida del “nip”. Cuando esta presión alcanza ciertos valores se forman cavidades cerradas de fluido. La formación de estas cavidades depende básicamente de la velocidad del fluido, la viscosidad, el espesor de la película y el diámetro del rodillo. A medida que las superficies de los rodillos divergen, estas cavidades empiezan a interconectarse formando filamentos de líquido entre las dos superficies y finalmente se rompen formando lo que se denomina piel de naranja. (MacPhee) (13)

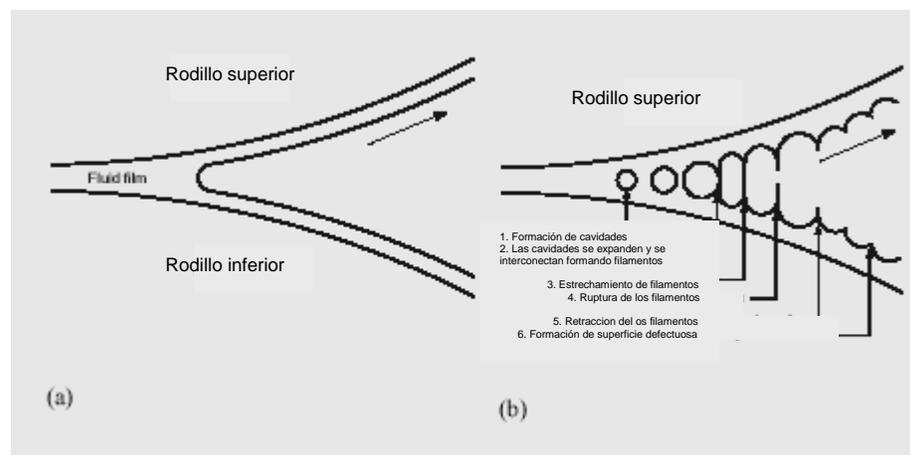


Figura 2.5 (a) Superficie lisa (b) Formación de cavitación y filamentos

2.4 Misting

Roper et al (14) estudiaron experimentalmente el efecto de los fluidos, el sustrato a recubrir y las variables de operación de la máquina que afectan el fenómeno denominado piel de naranja. Para evaluar el grado de “piel de naranja” se utilizó la impresión de este fenómeno sobre papel. Cuando se comparó la evaluación visual ellos encontraron que el fenómeno denominado “piel de naranja” es un defecto bidimensional que requiere un análisis de imágenes sofisticado para una correcta correlación entre los parámetros de la imagen y el rango de visualización.

El efecto del papel base también fue estudiado y se encontró que cuando el papel es previamente calandrado este tiene un efecto positivo en la reducción del “misting” y la formación de la piel de naranja (figura 2.6).

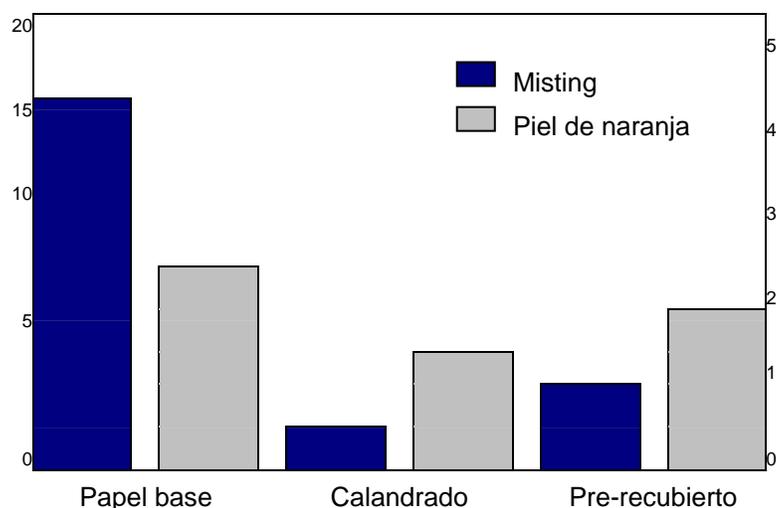


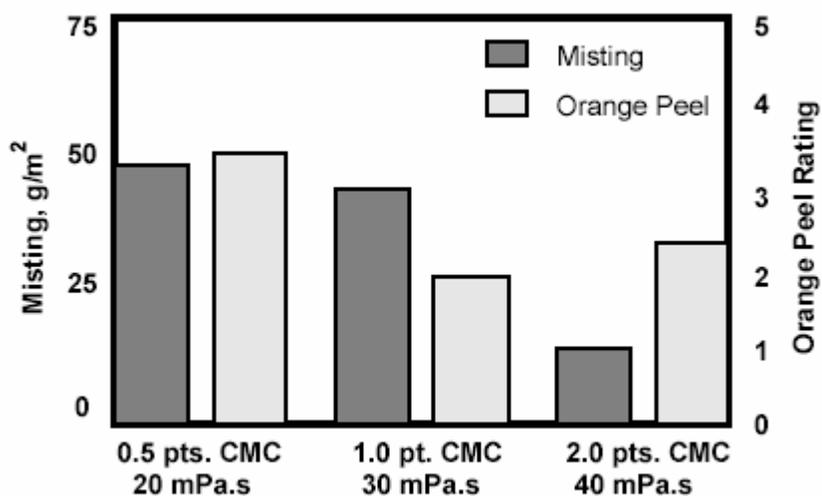
Figura 2.6 Efecto del papel base en la formación de la piel de naranja y el efecto del misting

Roper et al (15) evaluaron el grado de “misting” en una máquina recubridora por rodillos. Para lograr lo anterior se utilizó una cámara de alta velocidad. La cantidad de “misting” fue evaluada mediante imágenes de video a

una velocidad de 1200 y 1500 m/min usando un papel base calandrado y no calandrado. Los resultados de este estudio mostraron que el papel calandrado ofrecía menor cantidad de “misting” comparado con los otros.

Por otra parte a medida que el contenido de sólidos, en la película recubridora se incrementa, la viscosidad también va en aumento hasta cierto límite llamado factor de empaquetamiento crítico. A mayor cantidad de sólidos además se disminuye la elasticidad y se evita el “misting” a la salida del nip. (Triantafillopoulos y Smith) (16).

El espesante en las soluciones tiene un rol significativo. La figura 2.7 muestra el efecto del nivel del CMC en la formación del orange peel. Cuando la viscosidad se incrementa, la razón de eyección de gotas disminuye debido a las fuerzas viscosas y a la energía de cohesión del recubrimiento. Por lo que el “misting” se reduce pero la piel de naranja presenta un incremento significativo. (Grön et al) (17)



2.7 Efecto del nivel de CMC en la formación del misting y del orange peel
(Roper et al)

La elección del enlazante y del espesante puede jugar un papel importante en el control de la piel de naranja debido a que ellos impactan directamente en la retención de agua del recubrimiento y consecuentemente afectan el fenómeno del “misting”. Roper et al (18) estudiaron la relación entre dos diferentes espesantes y el fenómeno del misting. Se demostró que la CMC (carboximetilcelulosa) disminuye la viscosidad de corte y la elasticidad. Como resultado de esto la cantidad de “misting” se redujo a altas velocidades.

La figura 2.8 es un reograma que muestra los resultados obtenidos a partir de un experimento de corte en un fluido sometido a altas velocidades de corte. Las fluidos recubridores son primero sometidas a una razón de corte de 1s^{-1} durante 5 segundos seguida por una razón de corte de 5000s^{-1} y finalmente regresan a la velocidad de corte menor. En este experimento se utilizaron dos diferentes espesantes. Los fluidos con menor concentración de espesante recuperan su viscosidad mucho mas rápido y casi recuperan su viscosidad original.

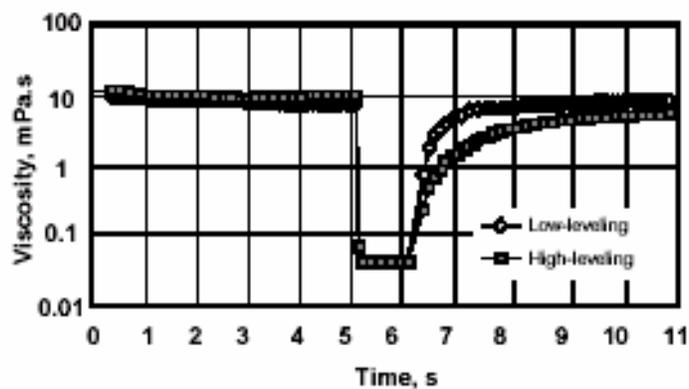


Figura 2.8 Experimento de corte, Roper et al, (15).

Los resultados de los experimentos donde se utilizaron dos diferentes espesantes mostraron que concentraciones elevadas de espesante disminuye la cantidad de piel de naranja. Basado en estos resultados ellos encontraron que bajo ciertas condiciones existe una positiva correlación entre el “misting” y la formación de la piel de naranja. Lo cual significa que los factores que reducen el “misting” también parecen reducir el grado de aparición de la piel de naranja.

Es importante tomar en cuenta la influencia de los componentes que intervienen sobre los efectos de la película que se forma a la salida del nip. La elección de los pigmentos depende de las propiedades finales requeridas del sustrato a recubrir. Se ha demostrado que las mezclas que contienen cierto grado de arcilla disminuyen el efecto del misting comparadas con las que contienen carbonato de calcio. (Reimers et al, (19), Drage y Hiorns, (20) y Grön et al, (21)). Por ejemplo, el látex es el principal ligante que impacta la resistencia. El látex es una buena opción especialmente cuando se trabaja a altas velocidades debido a que este incrementa la razón de deshidratación sin un incremento significativo de la viscosidad.

Otro factor que se debe considerar en el “misting” es el peso del fluido. Se ha encontrado que cuando el peso de los fluidos incrementa puede crear un dramático crecimiento de la cantidad de “misting”. (Salminen et al) (22).

La composición de los fluidos es también un factor importante en la relajación de la red de sustrato a alta velocidad (punto en el que el sustrato pasa libremente si adherirse a ninguno de los dos rodillos). Se ha demostrado que el punto donde la red, se relaja depende de los vectores de tensión creados por la tensión de la red la penetración de la salsa en el papel y los esfuerzos internos de los recubrimientos (Grön et al) (17). Incrementando la velocidad de la máquina se incrementa la distancia entre el “nip” y el punto donde la lamina de papel se relaja. Cuando se incrementa la velocidad de la máquina el tiempo de residencia de la lámina en el “nip” disminuye; debido a que se crea una acumulación de fluido en ambos rodillos se incrementa la cantidad de “misting”,

además el papel tiende a adherirse mucho más a la superficie del rodillo de soporte. Figura 2.9

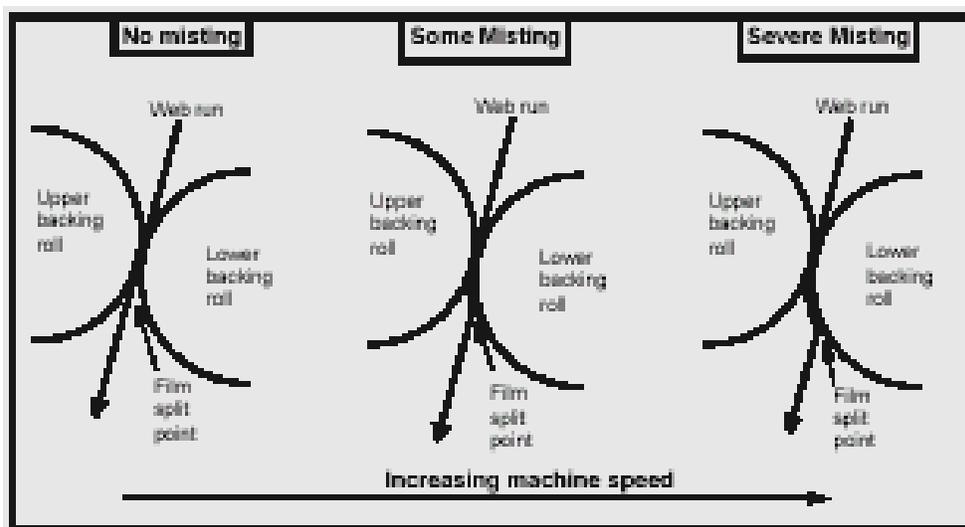


Figura 2.9. Adhesión del recubrimiento a la superficie del rodillo dependiendo del “misting” así como de la velocidad de la máquina. Grön et al (18)

Una alternativa para calcular la cantidad de misting es mediante el radio de transferencia, este valor puede describir la cantidad de fluido transferido al papel. La siguiente ecuación define este parámetro:

$$\text{Radio de Transferencia: } \frac{CW}{0.01Xm}$$

Donde: $CW = \text{peso del fluido en g/m}^2$

$X = \text{contenido de sólidos en \%}$

$m = \text{cantidad de película recubierta en g/ m}^2$

Como se muestra en la figura 2.10 un radio de transferencia entre 0.3 y 0.4 incrementa el valor resultante de “misting”.

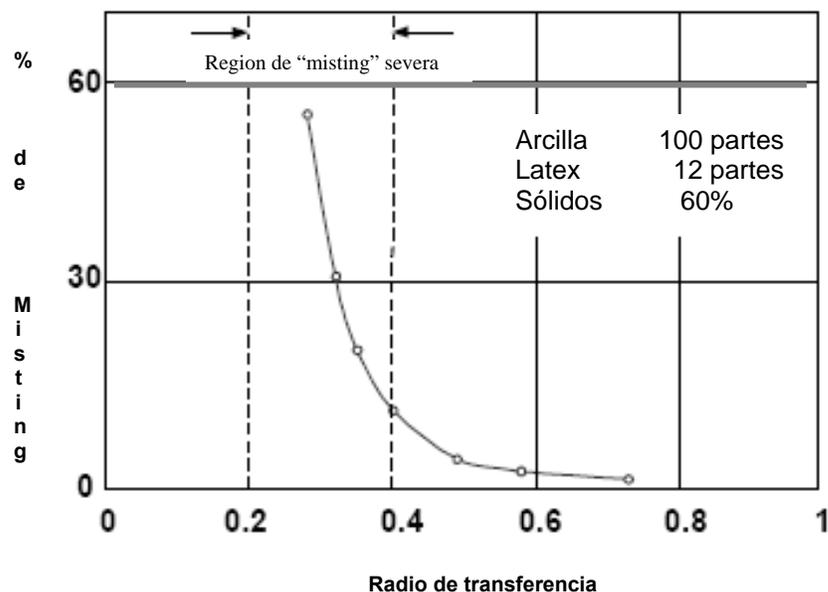


Figura 2.10. Misting en función del velocidad de transferencia a 1950 m/min Grön et al (18).

Finalmente el control del “misting” no es solo importante en el recubrimiento de papel. Algunos polímeros son utilizados para controlar el efecto del “misting”, estos pueden tener poco o nada de efecto en lo que se refiere a la tensión superficial del polímero. El mecanismo de antimistinging ha sido relacionado con las propiedades reológicas del fluido en especial con la viscoelasticidad. A bajas viscosidades la velocidad de ignición es ligeramente afectada pero la dependencia crece a medida que la viscosidad se incrementa. En 1987 se encontró al keroseno como un agente “antimistinging” en términos de su reología, fricción y sus propiedades de transferencia de calor. El aditivo fue diseñado para inhibir la formación de pequeñas gotas de keroseno cuando una masa de combustible es sometida a un torrente rápido de aire el cual es benéfico en caso de una ruptura del tanque de gasolina como ejemplo en una

emergencia de aterrizaje. Como resultado la flamabilidad causada por el “misting” es reducida.

Casi todas las máquinas en operación requieren que sus herramientas de corte sean lubricadas y enfriadas con el fin de reducir la fricción con el metal a cortar y de esta manera reducir un desgaste rápido de la herramienta de corte. Uno de los fluidos mas utilizados con este propósito es el aceite mineral de corte. El mist o rocío y los olores emanados de estos fluidos pueden ser causados o agravados por lo factores químicos y físicos. Algunas sustancias tales como el polisobutileno (PIB) han sido utilizadas como aditivos antimisting en aceites minerales. Ha sido demostrado que estas soluciones incrementan el tamaño promedio de la gota (arriba del 200%) relativo al aceite de mineral puro.

2.5 Reología de suspensiones y de los fluidos

Los fluidos utilizados para el recubrimiento de sustratos son suspensiones concentradas a partir de agua, pigmentos, espesantes, ligantes y otros aditivos. Ellos son aplicados a la superficie del sustrato para mejorar sus propiedades ópticas y de impresión mediante el uso de varios métodos de recubrimiento.

Para aplicaciones a alta velocidad Triantafillopoulos y Smith, (16) sugirieron mantener el módulo elástico (G') lo mas alto posible y el modulo viscoso (G'') lo mas bajo posible, lo cual se puede obtener mediante el incremento del contenido de sólidos y guardando un nivel de ligante mínimo. Aunque esto incrementa la razón de retención de agua, se enfatiza mas la atención al tipo de sustrato que se recubrirá. Un sustrato con un alto nivel de absorción permitirá la formación de filamentos alongados, lo cual dejará un patrón permanente sobre el sustrato y algunas gotas de rocío podrán ser depositadas sobre la superficie recubierta. Esto puede ser controlado mediante el uso de papel poco absorbente e incrementando la retención de agua. Como

sea, la elasticidad de la suspensión debe reducirse para evitar cualquier patrón permanente de recubrimiento.

2.6 Reología de corte

Las propiedades reológicas de corte de suspensiones concentradas y de las salsas recubridoras han sido ampliamente estudiadas por Carreau y Lavoie, (24) Page et al, (25) Yziquiel et al, (26). Una curva típica de viscosidad de suspensiones exhibe un comportamiento donde a mayor velocidad de corte la viscosidad disminuye siguiendo al modelo de la ley de la potencia a velocidades de corte relativamente bajas. Después a medida que la velocidad de corte se incrementa las suspensiones alcanzan un valor crítico y a partir de este punto se observa una viscosidad aparentemente constante a altas velocidades de corte (η_{∞}) para suspensiones de baja concentración. Las suspensiones altamente concentradas exhiben un comportamiento diferente. Las partículas tienden a chocar creando estructuras de corte inducidas, las cuales conllevan a un comportamiento de dilatación de la suspensión a altas velocidades de corte.

Yziquiel et al, 1999 (26) utilizaron la ley de la potencia para describir la viscosidad de corte de los fluidos sometidas a elevadas velocidades de corte:

$$\eta = m |\dot{\gamma}|^{n-1} + \eta_{\infty}$$

Roper y Attal, (27) midieron la viscosidad de las salsas a razones de 10^{-1} a 10^6 s^{-1} mediante el uso de reómetros. Ellos observaron que a medida que la velocidad se incrementa, la viscosidad de las salsas disminuye seguida por la dilatación del fluido la cual es más pronunciada a medida que el contenido y el tamaño de las partículas se incrementan. A elevadas velocidades de corte se obtiene una disminución de la viscosidad lo cual puede ser debido a la disipación viscosa. La curva de flujo fue calculada con los siguientes cinco parámetros usando una extensión del modelo de Cross:

$$\eta = \mu$$

$$\mu = \frac{1000}{1 + k_1 \gamma^n} + \mu_\infty + \frac{k_2 \gamma}{(k_3 + \gamma)^2}$$

O'Brien y Mackay, (28) reportaron que una suspensión concentrada primero exhibe disminución de la viscosidad a medida que la velocidad de corte incrementa pero esto es a velocidades de corte bajas (10^{-1} s^{-1}).

Carreau y Lavoie, (24) examinaron el comportamiento de las salsas con un contenido de sólidos entre 45 a 65 % de peso con un látex **SBR** como ligante, Carboxymetil celulosa (CMC) de bajo peso molecular como espesante y un agente dispersante. Cuando ellos pararon repentinamente la prueba y la reinicializaron algunos segundos mas tarde a la misma velocidad de corte se observó un incremento de la viscosidad debido a la estructura. Una tendencia diferente se observó a velocidades de corte altas. La viscosidad de corte fue disminuyendo lentamente con el tiempo. Después deteniendo y reinicializando la prueba se observó una lenta disminución de la viscosidad.

En pruebas de corte en el modo dinámico Yziquel et al, (26) observaron una viscoelasticidad lineal para medidas en estado oscilatorio con una pequeña amplitud la cual puede relacionarse con el comportamiento de un sólido. Ellos encontraron que el módulo elástico es una constante arriba de la deformación crítica y arriba del valor crítico el módulo elástico disminuye con la deformación y el comportamiento viscoelástico llega a ser no-lineal. Carreau y Lavoie, (24) determinaron que las propiedades viscoelásticas lineales son controladas por la fuerte interacción de las partículas responsables del comportamiento de la suspensión como un sólido y el mecanismo responsable del flujo, y eventualmente alineamiento de las partículas. Page et al, (25) llevaron a cabo pruebas en estado oscilatorio con fluidos recubridores industriales. Ellos

observaron una disminución constante del módulo elástico para amplitudes de oscilación pequeña.

El modulo de perdida de los fluidos que contienen Carboxymetil celulosa como espesante muestran valores altos del modulo elástico a medida que la deformación se incrementa. Este fenómeno previamente observado por Yziquel et al, (26) ha sido relacionado con un cambio en la microestructura del flujo inducido. Si la velocidad de deformación es repentinamente incrementada el modulo de pérdida tiende a disminuir.

2.7 Reología Extensional

La viscosidad extensional es una de las propiedades mas importante que afectan el fenómeno del misting, por lo que muchos estudios se han enfocado al análisis de las propiedades extensionales.

Della Vale et al, (29) determinaron las propiedades extensionales del kaolín delaminado con un contenido de sólidos de 50-65% de peso mediante el uso de un reómetro de orificio a velocidades de 10^3 - 10^4 s⁻¹. Ellos encontraron una razón de Trouton entre 12-16 para suspensiones hechas con kaolín disperso en una solución acuosa de polietilenglicol.

Page et al, (25) estudiaron las propiedades extensionales de ciertos fluidos hechos a base de kaolín y tres diferentes espesantes: CMC y dos polímeros asociativos. En este trabajo se midió la viscosidad extensional de las suspensiones con un contenido de sólidos de 65.5% en peso a una velocidad

de deformación de 10^3 - 10^5 s⁻¹. Bajo estas condiciones el encontró una razón de Trouton de magnitud mayor a 100.

CAPÍTULO 3

EQUIPO Y METODOLOGÍA

3.1 Máquina de rodillos.

La máquina usada en las pruebas de laboratorio consiste básicamente de tres partes: el rodillo de transferencia, el rodillo de soporte y el sistema de alimentación, además de un sensor piezoeléctrico el cual se encuentra montado en el rodillo de soporte. La figura 3.1 muestra una vista general de esta maquina de rodillos. Ambos rodillos tienen un diámetro de 150 mm. y una longitud de 150mm. El rodillo de transferencia esta rodeado por una cubierta de caucho cuyo espesor es de 9.5 mm. y con una dureza de 63 P&J.

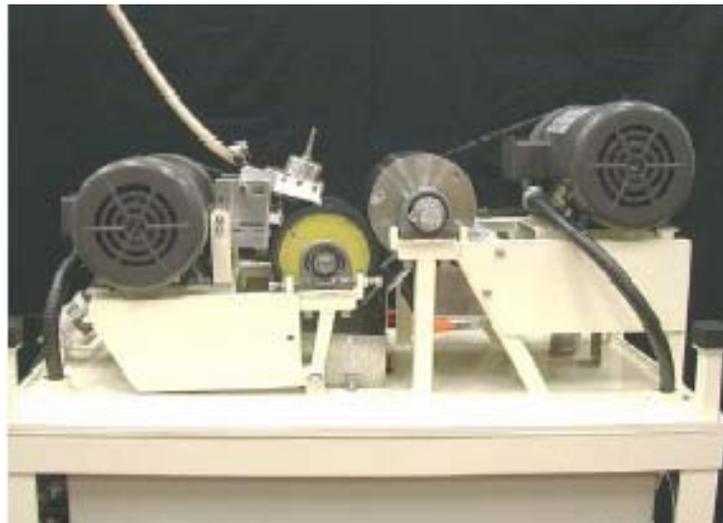


Figura 3.1 Maquina de rodillos

Según especificaciones del diseño se encontró que este es el mínimo espesor recomendado por el proveedor para evitar cualquier interacción con la

coraza rígida. La superficie del rodillo de soporte es de cromo plateado con una rugosidad promedio de $3 \mu\text{m}$, esto con la finalidad de facilitar la limpieza del mismo. Ambos rodillos giran hacia adentro, y están soportados por la bancada y alineados por la misma, el movimiento de los rodillos es posible debido a una banda que mueve la flecha de los rodillos, la cual es accionada por un motor eléctrico con una potencia de 746W (1hp), cuya velocidad es controlada por un sistema de corriente alterna el cual puede sensar los cambios de frecuencia recibidos de una señal de alimentación de un codificador de velocidad montado en cada uno de los rodillos.

La velocidad que puede manejar el sistema es de 0-1600 m /min, el sistema varia las pendientes de aceleración y desaceleración con el fin de evitar una sobrecarga del motor principalmente cuando se trabaja a altas velocidades. Ambos rodillos tienen una cuchilla montada sobre la superficie de los mismos para quitar el residuo o exceso de fluido, antes de entrar al “nip”. La carga aplicada a cada rodillo puede variar de 2 a 4 kN/m usando un cilindro neumático colocado en una estructura rígida sobre la cual el rodillo de transferencia es soportado. El sistema de alimentación consta de un deposito de fluido cuya capacidad es de 5 L, este fluido es movido por acción de la aplicación de presión de aire cuya magnitud es de 60 psi pasando a través de una válvula la cual regula el gasto que será alimentado, posteriormente el fluido viaja a través de una manguera hasta llegar a otro dispositivo el cual controla el ángulo de aplicación y el espesor de la película que se aplicará.

3.2 Transductor de presión

La distribución de presión dentro del “nip” se mide mediante un sensor de presión dinámico cuyo diámetro es de 2.5 mm, y se encuentra montado sobre el rodillo de soporte (figura 3.2), la membrana del sensor fue cuidadosamente montada y pulida a la superficie del rodillo para evitar efectos de intrusión, Cada vez que el rodillo de soporte da una vuelta, el sensor registra dos perfiles de presión diferentes, uno es debido a la cuchilla que barre el fluido en exceso y el otro es el perfil de presión ejercido por el fluido en el “nip” la manera en que se diferencian uno del otro es porque el primero muestra un patrón de menor magnitud debido a que este solo registra la presión que ejerce la cuchilla y no la presión hidrodinámica del fluido como lo es en el otro perfil.

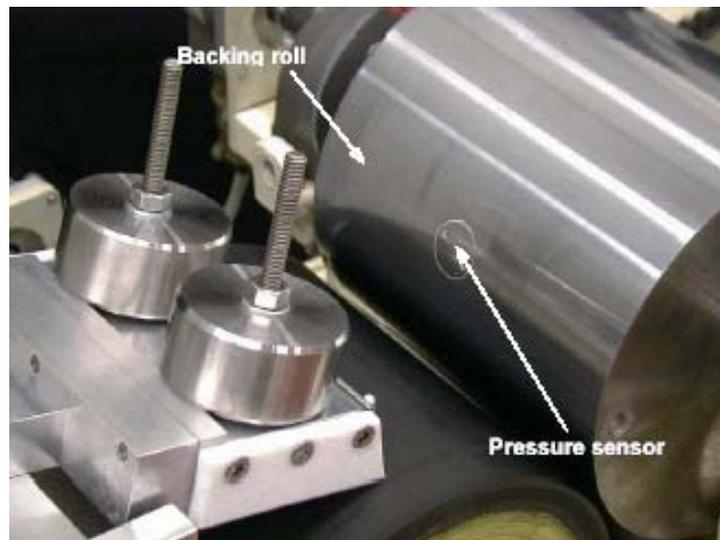


Figura 3.2 Sensor de presión

El sensor de presión construye los gráficos mediante la captación de la variación de presión ejercida sobre el mismo la cual es convertida en una variación medida en mV, y la frecuencia con la que son emitidos estos pulsos construye los gráficos de presión, esta información, es posteriormente capturada por una computadora mediante un anillo que consta de cuatro circuitos conectados a una tarjeta de adquisición de datos; la señal que viene del sensor es encaminada a través de la flecha hueca del cilindro de soporte hasta llegar a un adaptador el cual se encuentra conectado al anillo y crea una conexión anillo-rotor (figura 3.3).

Circuitos:	4
Capacidad de corriente por circuito:	500 mA
Alcance de RPM	12000
Máximo pico de ruido:	1 Ω

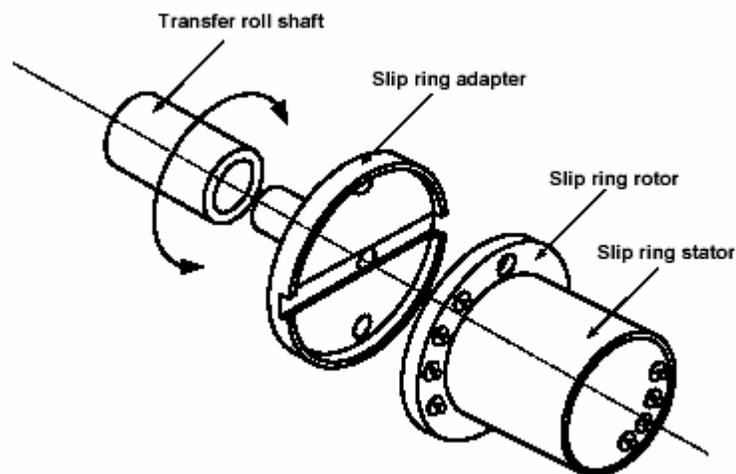


Figura 3.3 Montaje del anillo recolector

3.3 Reómetro de orificio

Las propiedades extensionales de las suspensiones, fluidos Newtonianos, no- Newtonianos y fluidos viscoelásticos fueron determinadas por medio de un reómetro de orificio, en donde la viscosidad extensional es función de la razón de flujo y la caída de presión del fluido pasando a través de un orificio pequeño.

El reómetro de orificio usado para este trabajo consta de dos contenedores con un diámetro de 76.2 mm y 1.097 m de longitud cada uno y un sistema de bombeo, además cuenta con una serie de válvulas que permiten o restringen el paso del flujo en cierta dirección; cada contenedor está conectado a un pistón hidráulico lo suficientemente largo para simular condiciones de flujo estables, un plato de orificio se encuentra montado entre los contenedores y la caída de presión es medida mediante un transductor de presión diferencial mediante pequeños orificios maquinados en el plato de orificio. La caída de presión puede ser medida en tres diferentes rangos: 0-70 kPa, 0-345 kPa y de 0-1380 kPa. La velocidad del pistón es determinada por un transductor LVDT. Toda la instrumentación es conectada a una tarjeta de adquisición de datos y así, la caída de presión es constantemente leída, creando el sistema dos archivos, uno con el promedio de los valores y otro con la información total.

El principio de operación de este dispositivo consiste en hacer pasar el fluido de un cilindro a otro, a través de un plato de orificio cuyo diámetro (D) es de 127 mm cuyo espesor (e) es de 12.7 mm con un pequeño orificio (d) con un rango de 0.6 mm a 4.79 mm con una sección convergente y una divergente de 45° (figura 3.4). El fluido es bombeado del recipiente lleno al vacío y después es bombeado en dirección opuesta. Por tal propósito, cada contenedor es conectado a un pistón hidráulico lo suficientemente largo para crear un flujo completamente desarrollado y así poder investigar los efectos de entrada al contenedor.

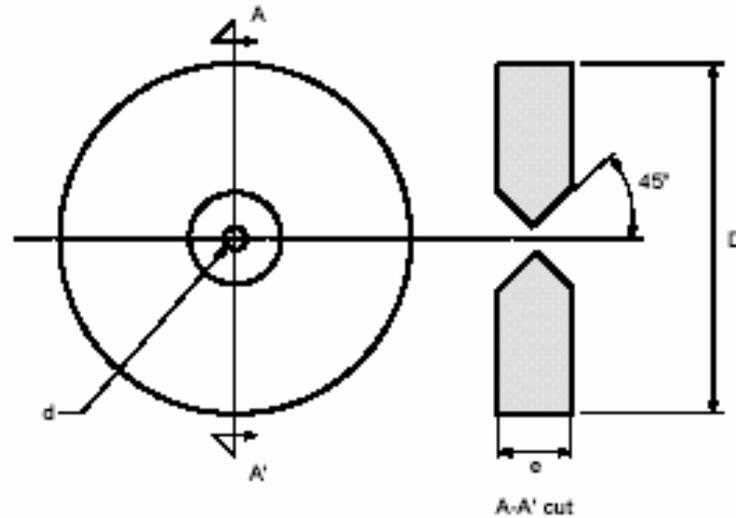


Figura 3.4 Plato de orificio

El sistema hidráulico fue cuidadosamente diseñado para sostener flujos muy estables. Este consiste básicamente de un pistón para cada contenedor con un movimiento de 0.86 m, cuya velocidad es controlada por tres diferentes bombas. La bomba # 1 es controlada por un motor AC conectada a un controlador de voltaje variable pudiéndose obtener una velocidad entre 0.5mm/s y 3mm/s. Por otro lado las bombas #2 y #3 son manejadas por un motor, y la velocidad del pistón es de 5 mm/s y 10 mm/s respectivamente. Una serie de válvulas opera con una, con dos o con las tres bombas por lo que se puede manejar un amplio rango de gasto. La velocidad de cada pistón es continuamente registrada mediante un transductor de posición LVDT.

El reómetro de orificio puede ser manejado manual o automáticamente desde una computadora y toda la información obtenida de la caída de presión en el plato de orificio se puede visualizar directamente de la pantalla de una computadora como un archivo ASCII (figura 3.5).

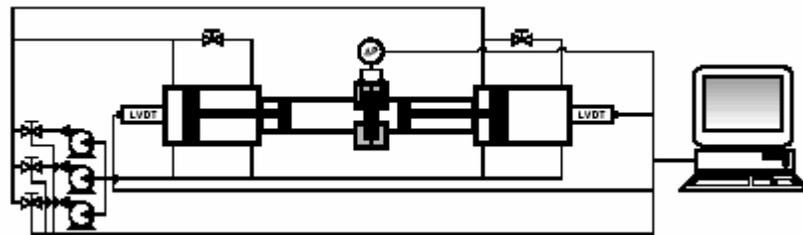


Figura 3.5 Esquema del Reómetro de orificio.

3.4 Obtención de imágenes

Las imágenes a la salida del “nip” fueron capturadas mediante una cámara fotográfica (Sensi Cam QE) cuya velocidad de adquisición de imágenes es de 1ms – 1000s por imagen. Las imágenes capturadas son enviadas a la memoria RAM de una computadora para su posterior análisis.

3.5 Tensión superficial

La resistencia del fluido a ser deformado fue medida por medio del FTA 200 el cual cuenta con un analizador de imágenes, estas imágenes son almacenadas para un análisis posterior. .

El FTÅ 200 (figura 3.6.1) cuenta con una bomba la cual contiene el fluido a ser analizado este es inyectado a través de la misma hasta formar una pequeña gota esférica (figura 3.6.2) la cual es almacenada en la memoria de la computadora para ser analizada automáticamente por medio de la ecuación Young-Laplace, la cual demuestra que la presión en el interior de una superficie esférica es siempre mayor que en el exterior, que la diferencia de presión se incrementa cuando disminuye el radio de dicha superficie, y que se hace cero cuando la superficie es plana (radio infinito).

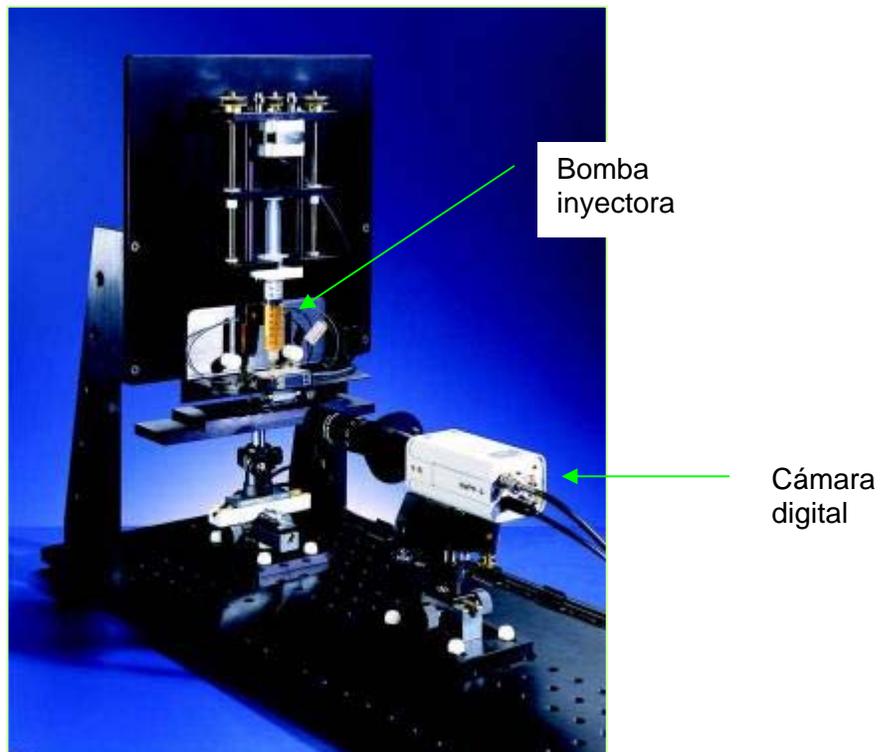


Figura 3.6.1 FTÅ 200



Figura 3.6.2 PEG 30% Tensión superficial 53.2 mN/m

3.6 Fluidos

En la tabla 1 se muestra la composición utilizada en este trabajo para cada fluido así como sus propiedades. Cada fluido antes de ser pasado por la máquina recubridora de rodillos estuvo en reposo durante 24 hrs. con la finalidad de eliminar las burbujas almacenadas en el mismo durante su preparación. Todos los experimentos fueron llevados a cabo a una temperatura de 24° C.

Tabla.- 1 Composición y propiedades físicas de los fluidos modelo

Ingredientes	Fluidos						
	PEG	CMC (No-New)	No-New (1)	No-New (2)	VE (1)	VE (2)	Susp
Polyethylen glycol*	30.0		33.0	28.00	20.0	30.0	
Finnfix 700*		3.5	1.25	2.30			0.16
keltrol RD*					0.23	0.23	
Nuclay*							54.8
Propiedades físicas							
Densidad kg/m ³	1070	1000	1020	1040.00	1005	1070	1520
Tensión superficial mN/m	53.15	52.01	43.03	35.33	50.76	50.11	25.10

* Cantidades expresadas en % en peso

- No-New (No- Newtoniano): Fluido que se comporta de acuerdo a la ley de la potencia
- VE (1) y VE(2) (Viscoelasticos) Fluidos caracterizados por tener un modulo elastico mayor que el de corte

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los fluidos

Las propiedades reológicas de cada fluido en estado estable y en estado dinámico fueron medidas con un reómetro modelo AR 2000 usando un arreglo de cilindros concéntricos. La tasa de deformación de operación para el estado estable se estableció entre 0.01-2500 s⁻¹ y para el estado dinámico el rango que se fijó fue de 0 – 10 @ 1 Hz. cuya finalidad de dicha prueba en estado dinámico es la de calcular el módulo elástico y viscoso de cada fluido y determinar así si se trata de un fluido puramente viscoso o de un viscoelástico.

Como se puede observar en los gráficos de viscosidad vs. velocidad de corte en el estado estable se puede notar que los fluidos newtonianos a velocidades de corte pequeñas ($< 10^0$) exhiben un comportamiento no-newtoniano, pero arriba de ese valor la viscosidad permanece constante (figura 4.1.1) lo cual significa una tendencia viscosa, para los fluidos no-newtonianos se observa viscosidades altas a velocidades de corte pequeñas las cual van disminuyendo conforme se incrementa la velocidad de la prueba de acuerdo a la Ley de la potencia, las suspensiones presentan un comportamiento similar a los fluidos no-newtonianos la diferencia de estas radica en que la caída de la viscosidad con respecto a la velocidad de corte presenta una pendiente un poco más pronunciada, los fluidos viscoelásticos tienden a disminuir su viscosidad

con un comportamiento o una pendiente mas suave siguiendo el patrón de la ley de la potencia alcanzando a velocidades de corte elevadas una viscosidad constante.

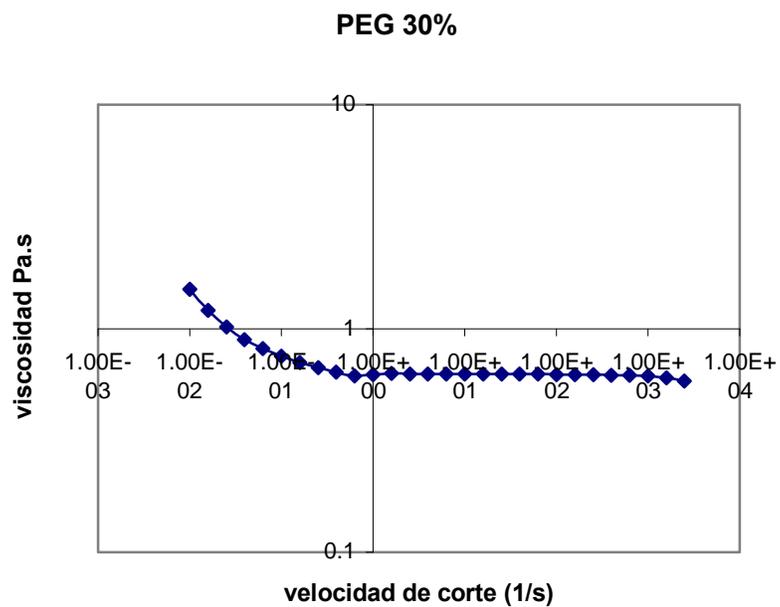


Figura 4.1.1 Fluido Newtoniano

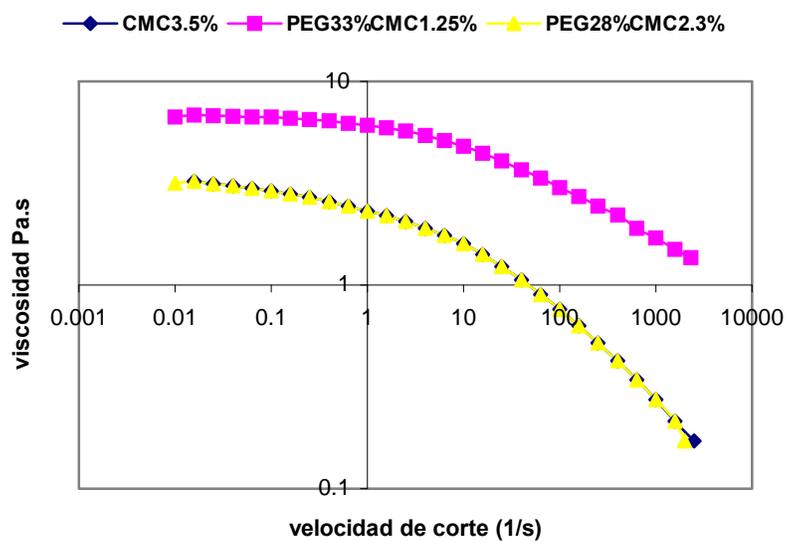


Figura 4.1.2 Fluidos No-Newtonianos

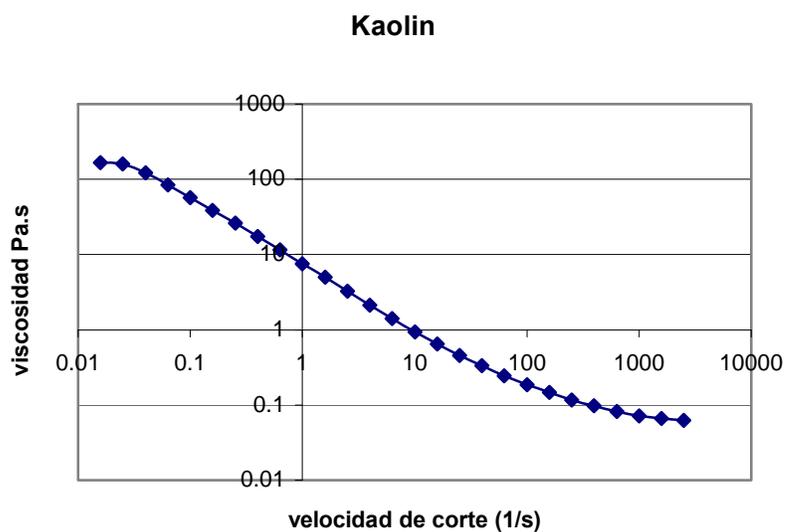


Figura 4.1.3 Suspensiones

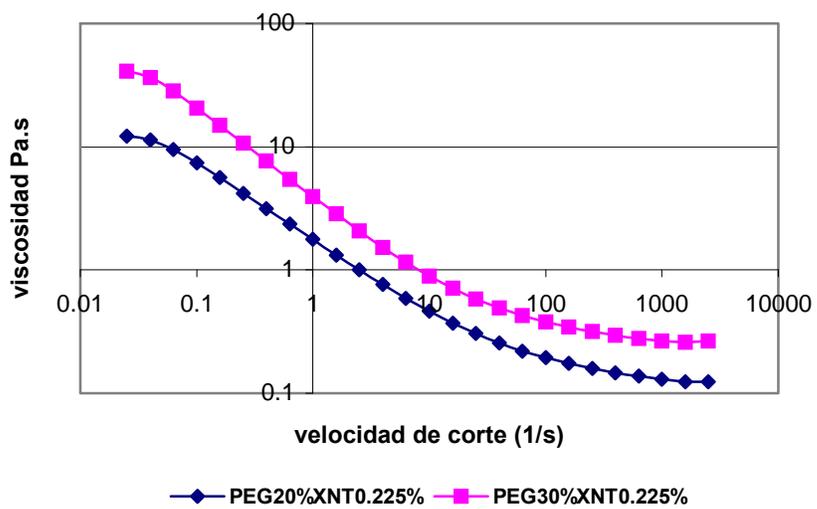


Figura 4.1.4 Fluidos viscoelásticos

En el estado oscilatorio o dinámico el módulo se expresa en forma de un número complejo $G^* = G' + iG''$, en donde la parte real, G' , es el módulo elástico y la parte imaginaria, G'' , es el módulo viscoso. Para los fluidos Newtonianos se observa que el módulo viscoso es el que rige el comportamiento del fluido manteniéndose a un nivel muy bajo del módulo elástico, casi despreciable, y desapareciendo por completo conforme aumenta la velocidad de la prueba. Para los fluidos No-newtonianos se puede observar una mayor participación del módulo elástico pero la importancia del módulo viscoso sigue siendo muchísimo mayor que la del módulo elástico. Para la suspensión se observa un módulo elástico que permanece en varios órdenes de magnitud mayor al módulo viscoso en un amplio intervalo de deformación. Para los fluidos viscoelásticos se observa un comportamiento similar al de la suspensión, primero se presenta un módulo elástico mayor en varias magnitudes al módulo viscoso y después desciende cuando aumenta la deformación con una mayor rapidez que el módulo viscoso.

El fenómeno de la viscoelasticidad se refiere al comportamiento que tienen los polímeros al momento de aplicarles una carga, estos tienden a deformarse en grandes cantidades y volver a su longitud original sin sufrir ninguna deformación teniendo como resultado un comportamiento elástico de tipo entrópico, si el polímero sufrió una verdadera deformación plástica después de la aplicación de una carga, este tenderá a incrementar su viscosidad teniendo un comportamiento viscoso de ahí el término de viscoelasticidad.

De lo discutido anteriormente se puede concluir que los fluidos viscoelásticos pueden trabajar a velocidades mayores que el resto de los fluidos estudiados sin presentar el fenómeno del *misting* en su desarrollo debido a que según el tipo de comportamiento reológico que presentan la elasticidad del fluido viscoelástico es mayor en un intervalo de velocidades de corte superiores, dando como resultado una disminución de la relación de la viscosidad de corte y la elasticidad del fluido.

Los siguientes gráficos muestran el módulo elástico y viscoso como una función de la amplitud de deformación a 1 Hz.

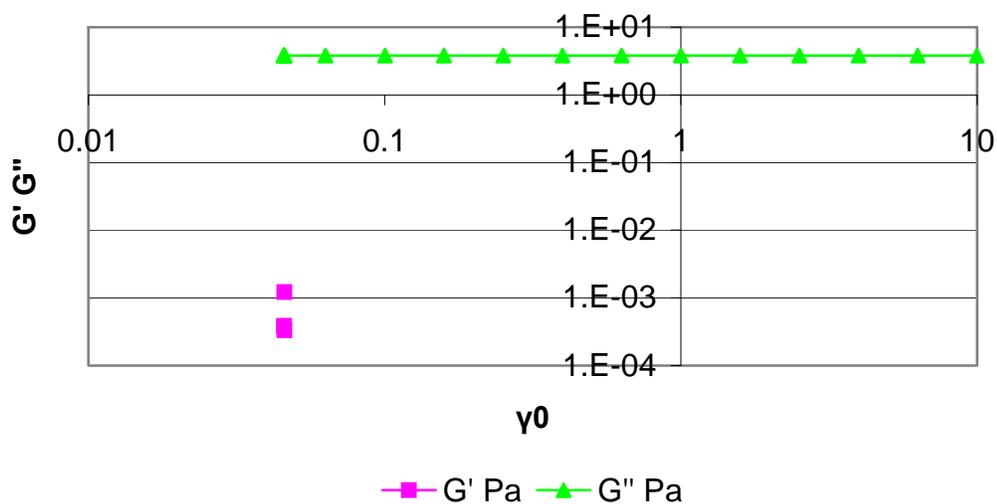


Figura 4.1.5 Fluido Newtoniano

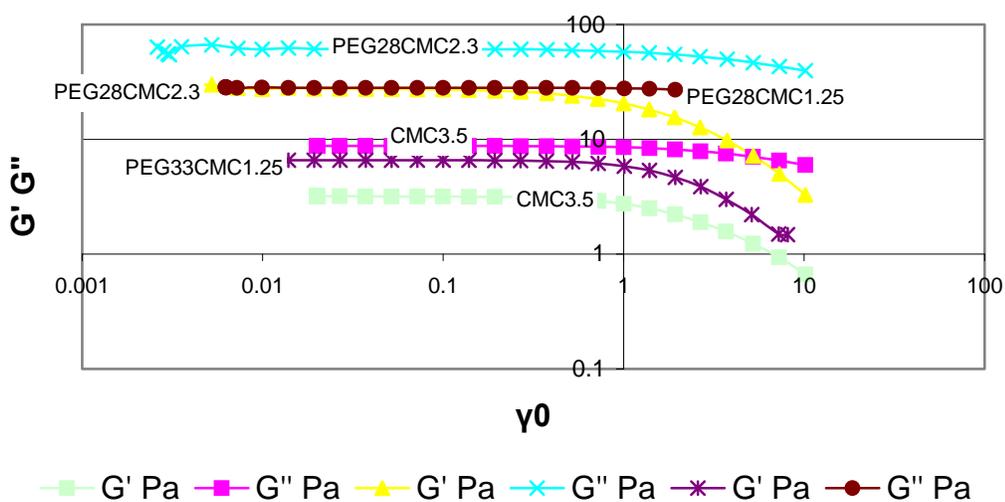
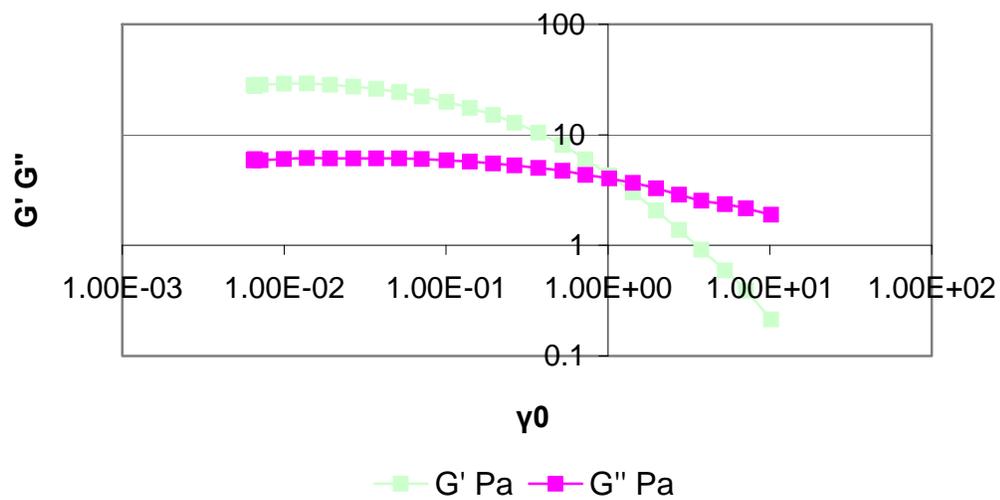


Figura 4.1.6 Fluidos No-Newtonianos**Figura 4.1.7 Suspensión (kaolín)**

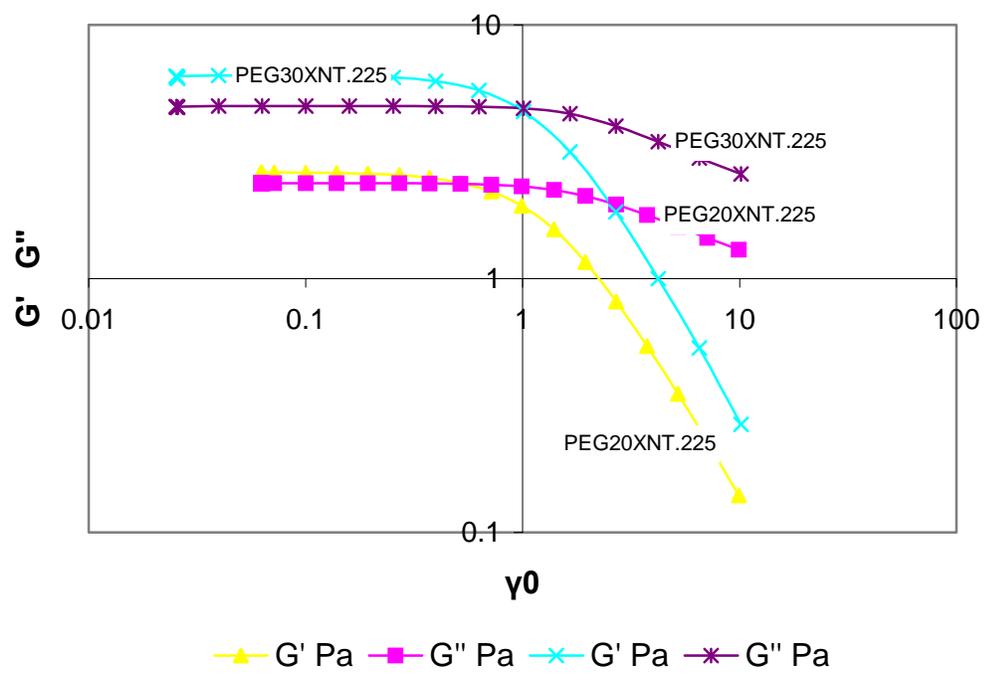


Figura 4.1.8 Fluidos viscoelásticos

4.2 Perfiles de presión

Actualmente en la industria del recubrimiento se observa, que uno de los rodillos, regularmente el rodillo de aplicación esta cubierto en su superficie por un elastómero con la finalidad de evitar el desgaste de ambos rodillos, maltratar el substrato y poder aplicar mayores cargas de presión sobre los rodillos, funcionando este mismo como un amortiguador, esta presión genera un “gap” negativo permitiendo así la generación de películas de mucho menor espesor. (Figura 4.2.1).

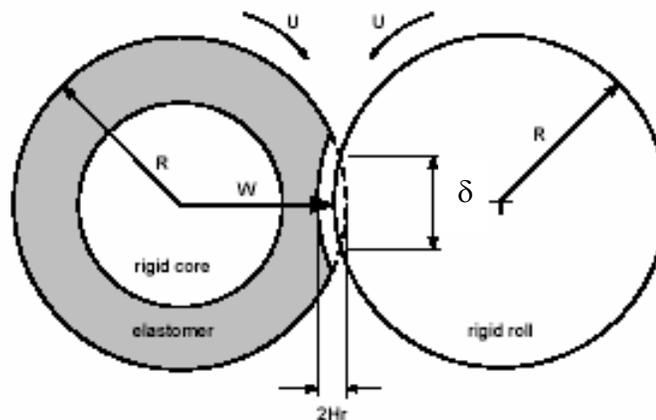


Figura 4.2.1 Representación del gap negativo generado entre los rodillos ($2Hr$).

Como consecuencia de un “gap” negativo presente entre los dos rodillos el fenómeno del “misting” se incrementa debido a que se genera una mayor presión negativa a la salida del “nip”. Para analizar este fenómeno con mayor precisión se hizo pasar por individual a través de una maquina recubridora por rodillos siete fluidos, cada uno con propiedades reológicas diferentes con la finalidad de comparar su comportamiento a la salida del nip. La variación de la presión adimensional PL/H_rE vs la posición adimensional x/R se muestra en las

figuras 4.2.2 a 4.2.5 para varios valores de número de Elasticidad, definiéndose este como sigue:

$$E_s = \frac{\eta_E UL}{ER^2}$$

Donde:

U es la velocidad del rodillo

L es el espesor de la cubierta de caucho del rodillo de transferencia

E es el módulo de Young

R es el radio del rodillo

η_E es la viscosidad extensional a su correspondiente razón de deformación determinada por

$$\dot{\varepsilon} = \left[\frac{U}{H_r} \right]$$

H_r es el ancho del “nip” calculado con la siguiente expresión (Coghu y Magnin 1997):

$$H_r = R - \sqrt{R^2 - \left[\frac{\delta}{2} \right]^2}$$

Donde δ es la longitud del “nip” determinada mediante el análisis de imagen aplicando una carga W de 3 a 4 kN/m y el ancho correspondiente al nip fue de 170 μm a 215 μm respectivamente.

Conforme el fluido avanza desde la salida del tanque hasta la salida del “nip”, este experimenta varias situaciones de corte y elongación ya que al pasar a través de la cuchilla que controla el espesor esta imprime un esfuerzo de corte sobre el fluido, después pasa a través del nip en donde experimenta esfuerzos de corte y elongación a la salida y entrada del “nip”.

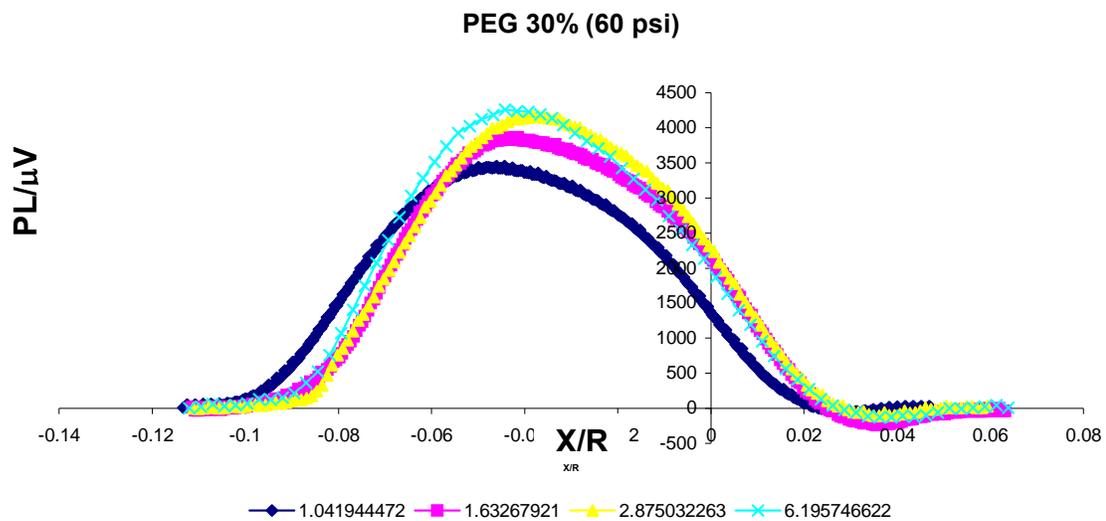
En el caso de los fluidos Newtonianos (PEG) se observa que la altura del pico aumenta cuando la velocidad del rodillo se incrementa hasta llegar a un máximo para después caer y tomar valores negativos. Este mismo patrón es observado para el área de presión negativa solo que la altura del pico incrementa en dirección negativa. En la figura (4.2.2a) a un número de elasticidad de 1.0 (250 m/min) la profundidad del pico de presión subatmosférica disminuye debido a la entrada de aire al nip. La magnitud de la velocidad a la que aparece este fenómeno depende de la carga aplicada entre rodillos ya que esta aparece a menores magnitudes conforme la carga disminuye. En el apéndice 1 tabla 2 se puede observar que a medida que se incrementa la carga entre los rodillos la presión sub-atmosférica disminuye con una mayor acentuación.

Para el caso de los fluidos no-Newtonianos se puede observar que para las mismas velocidades manejadas que en el resto de los fluidos el número de elasticidad (E_s) es mayor y esto es debido a que la viscosidad extensional de este fluido es superior (figura 4.2.3), además se puede añadir que la entrada de aire aparece a un E_s mayor correspondiente a una velocidad de 500 m/min. Bajo estas condiciones el fluido es sometido a una gran deformación localizada en la región no lineal, por lo que los efectos elásticos son despreciables y por consecuencia es posible la aparición del fenómeno denominado misting en esta zona. En el nip de transferencia, el fluido es sometido a una razón de deformación $\dot{\epsilon}$ de $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ correspondiente a una viscosidad de alrededor de 1 Pa.s. Aunque esta viscosidad puede ser considerada muy baja con respecto a la velocidad de corte las fuerzas debidas a la tensión superficial son mucho más pequeñas que las viscosas por lo que la formación de películas a la salida del nip es el único mecanismo responsable del rompimiento de los filamentos.

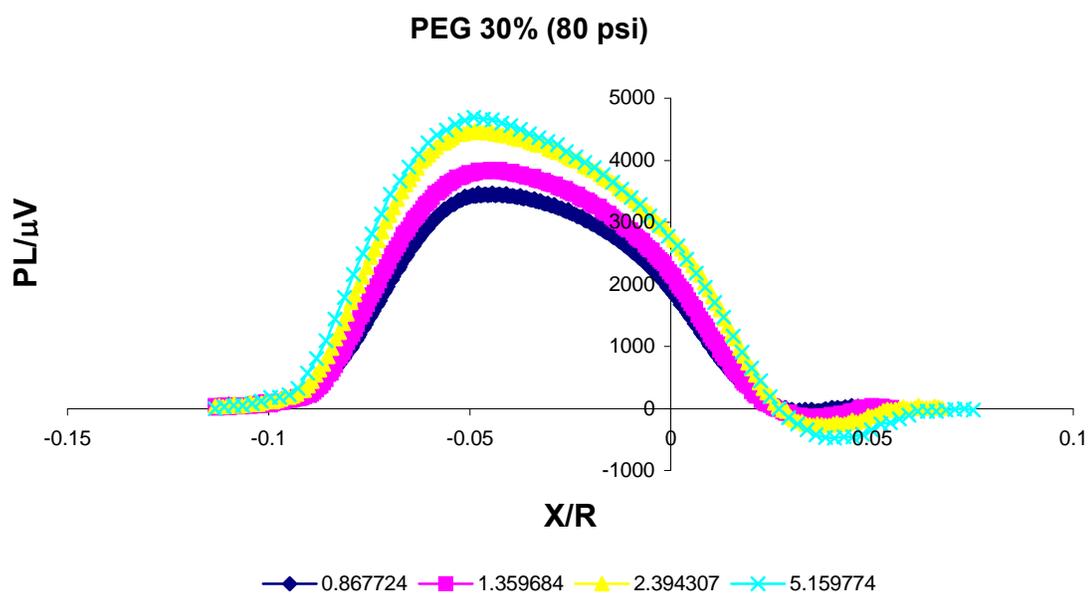
Los fluidos viscoelásticos (figura 4.2.5) continúan con la misma tendencia, esto significa que a velocidades altas de los rodillos la altura de los picos incrementa y la profundidad de los valles disminuye esto se puede observar en la tabla 2, los fluidos viscoelásticos VE desarrollan presiones sub-atmosféricas menores a bajas velocidades de los rodillos. La altura del pico se incrementa mucho más rápido cuando se incrementa la velocidad del rodillo como un resultado del tan conocido desarrollo del esfuerzo normal originado cuando el sustrato es sometido a altos esfuerzos de corte en la cuchilla que controla el espesor de la película. La misma tendencia se observa en la región negativa de la distribución de presión. La profundidad del valle disminuye en comparación con los otros fluidos a una proporción mayor conforme se incrementa la velocidad de los rodillos especialmente cuando se usan cargas pequeñas. Se debe resaltar el efecto de la elasticidad sobre las propiedades extensionales. Aunque los fluidos viscoelásticos exhiben una disminución de la viscosidad extensional conforme incrementa la velocidad de corte, esta viscosidad disminuye mucho más lento que el resto de los fluidos lo que a altas velocidades las fuerzas extensionales siguen teniendo una participación importante y no se consideran despreciables. A la misma E_s que la de los fluidos no-Newtonianos el filamento puede ser enormemente alargado, como consecuencia de esto el misting es retardado.

En el caso de las suspensiones (figura 4.2.4), la velocidad de los rodillos no parece afectar fuertemente los picos de presión. Cuando se utiliza una carga mínima W , un incremento del 8% y un decremento del 207% en la altura y la profundidad del pico es observada respectivamente, cuando la velocidad de los rodillos incrementa de 100 m/min a 500 m/min. Cuando la carga W incrementa (4kN/m) la altura del pico 16% pero la profundidad del valle disminuye 83% para la misma velocidad del rodillo. Para un número de elasticidad E_s mayor correspondiente a la velocidad máxima del rodillo, la viscosidad de la suspensión se incrementa y como resultado de esto los filamentos se vuelen

rígidos y las gotas del “misting” aparecen después del rompimiento de los mismos.

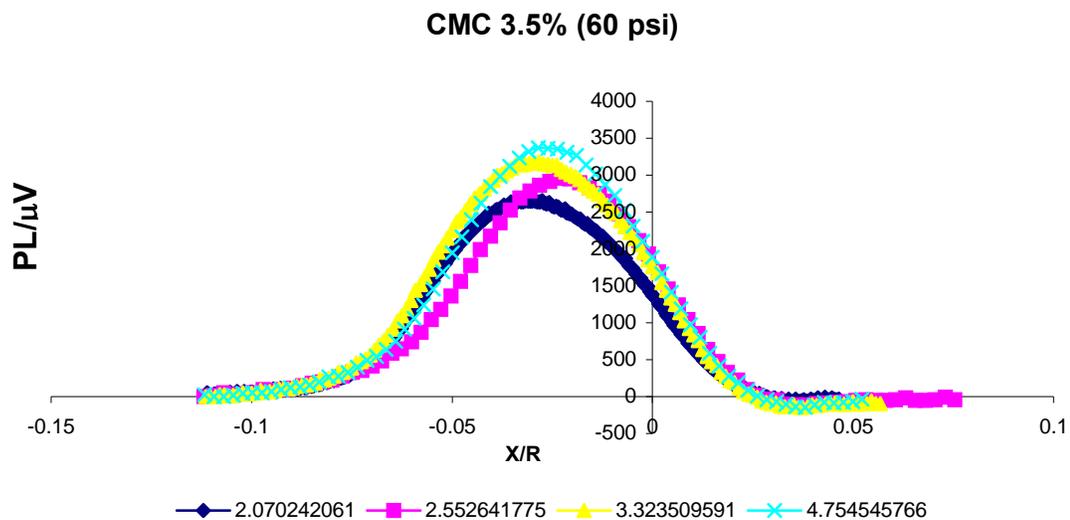


a)

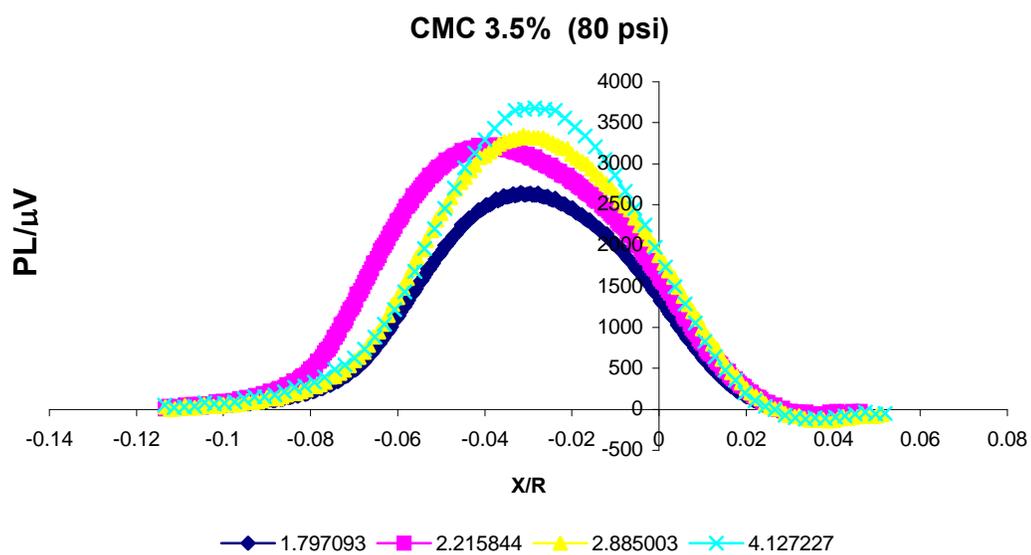


b)

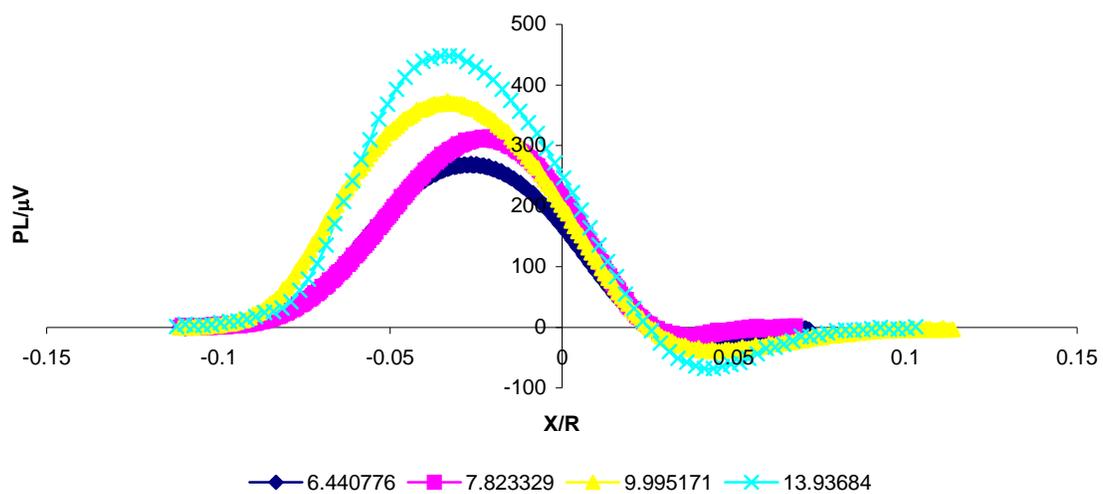
Figura 4.2.2 Fluido Newtoniano. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente



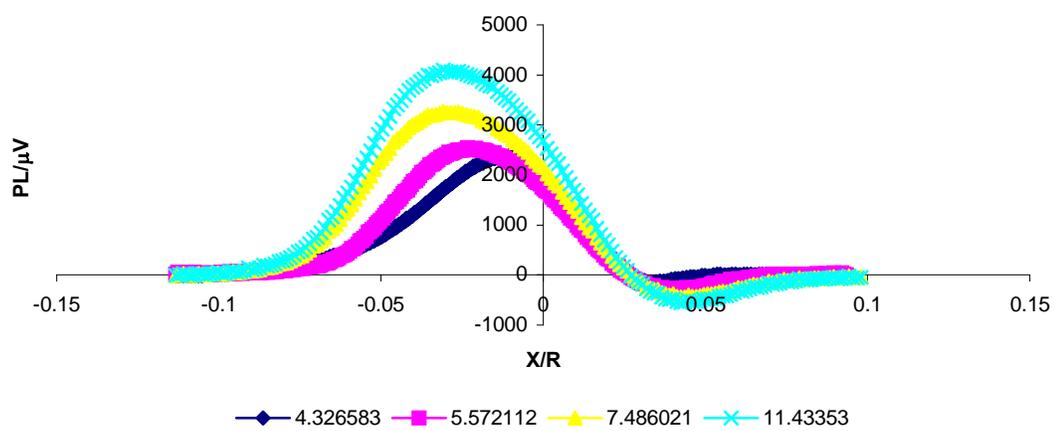
a)



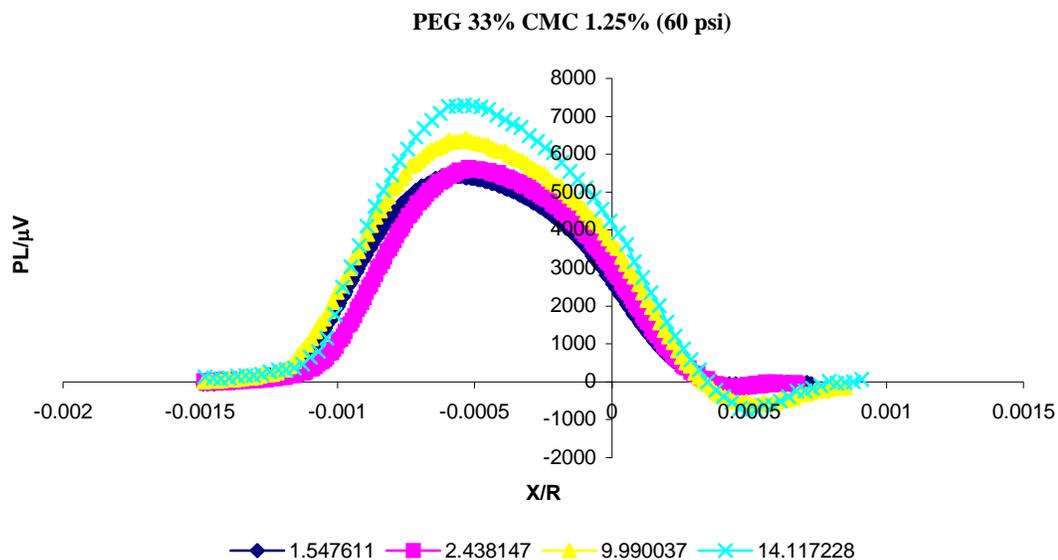
b)

PEG 28% CMC 2.3% (60 psi)

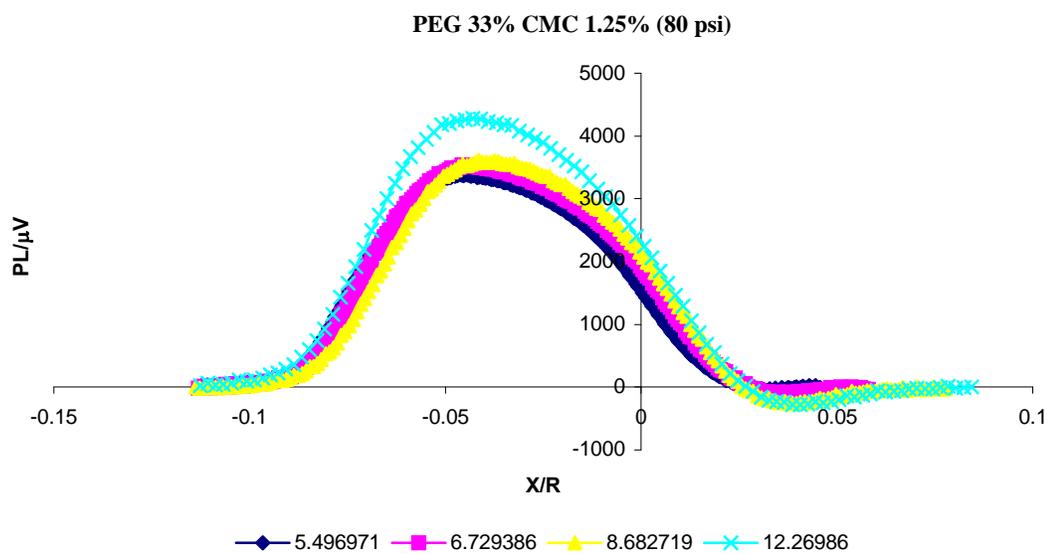
c)

PEG 28% CMC 2.3% (80 psi)

d)

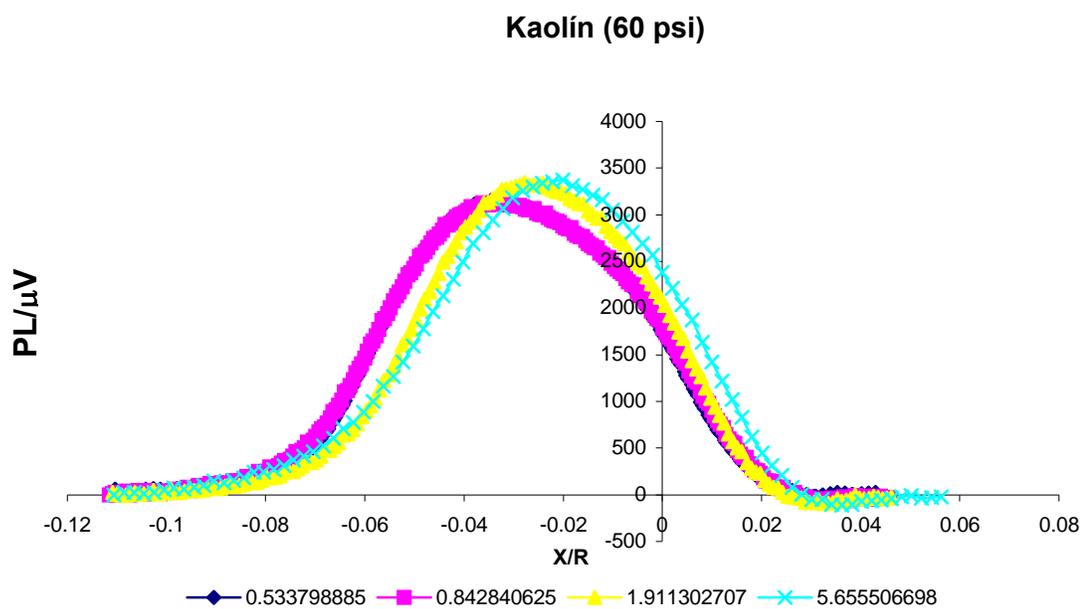


e)

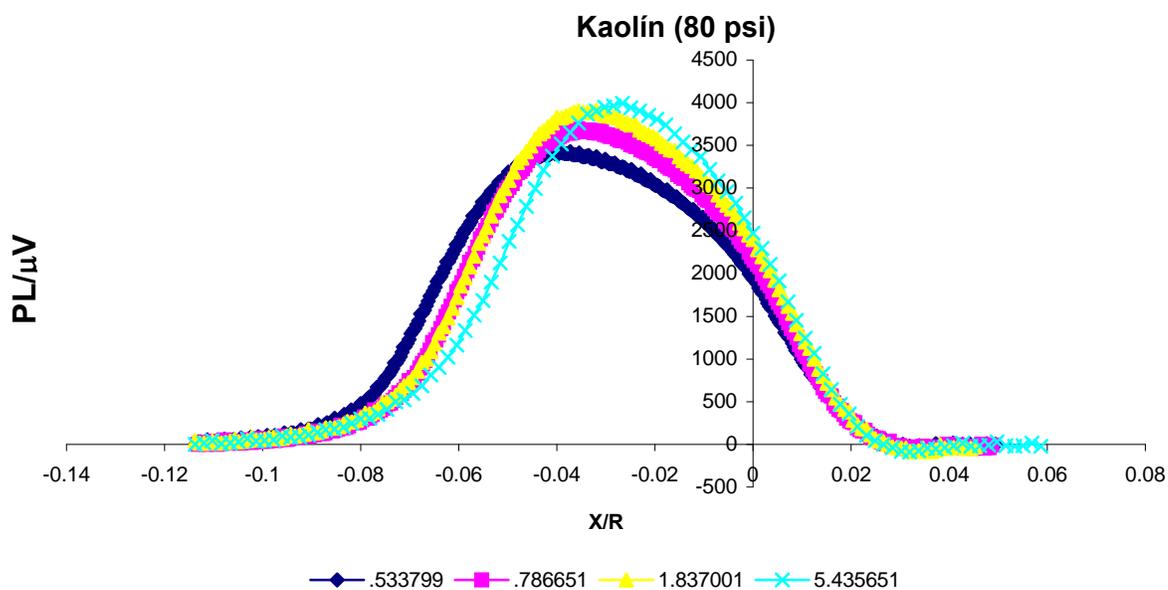


f)

Figura 4.2.3 Fluidos no-Newtonianos. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

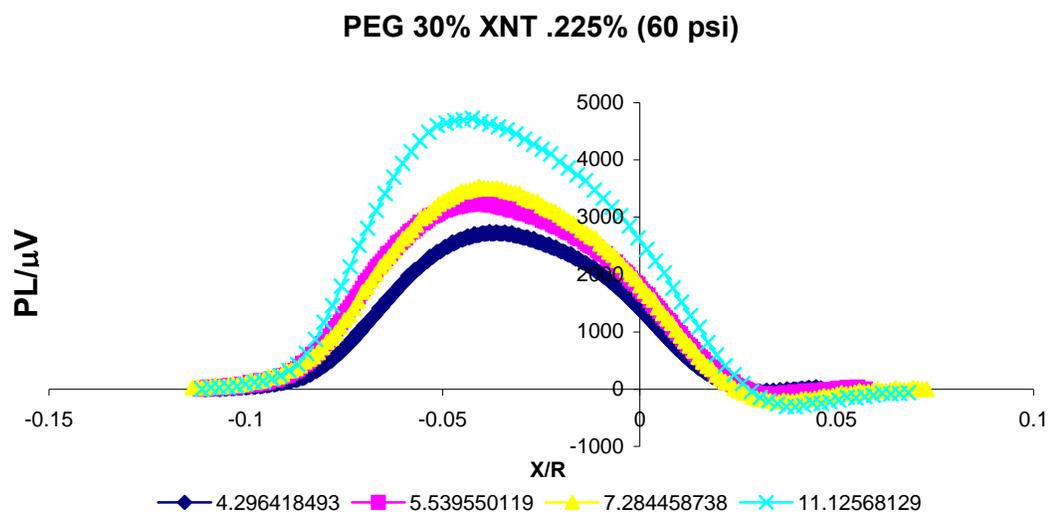


a)

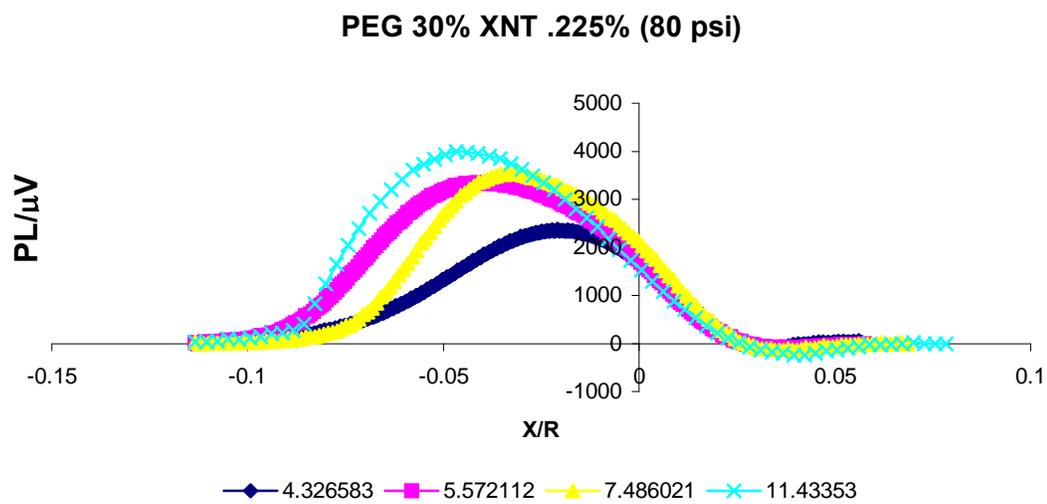


b)

Figura 4.2.4 Suspensión. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente



a)



b)

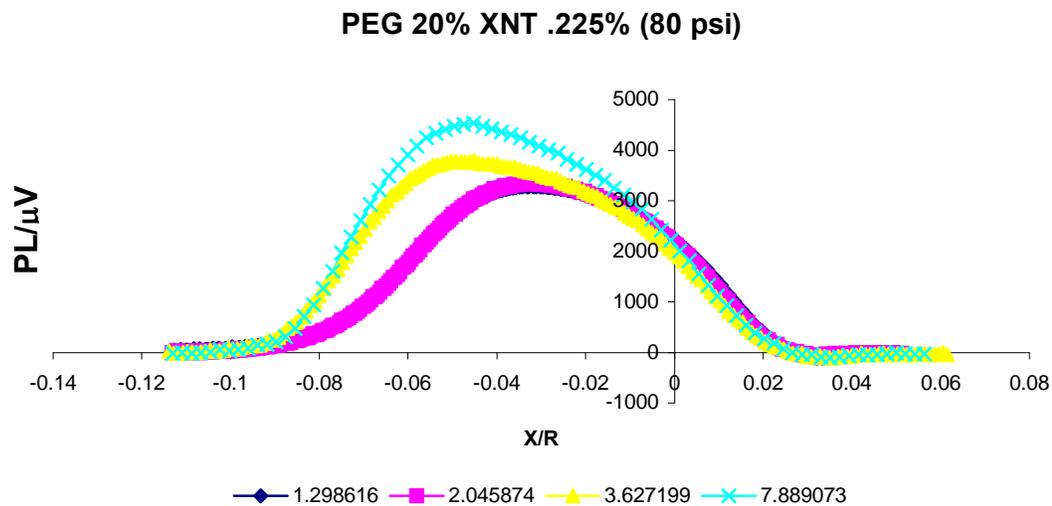
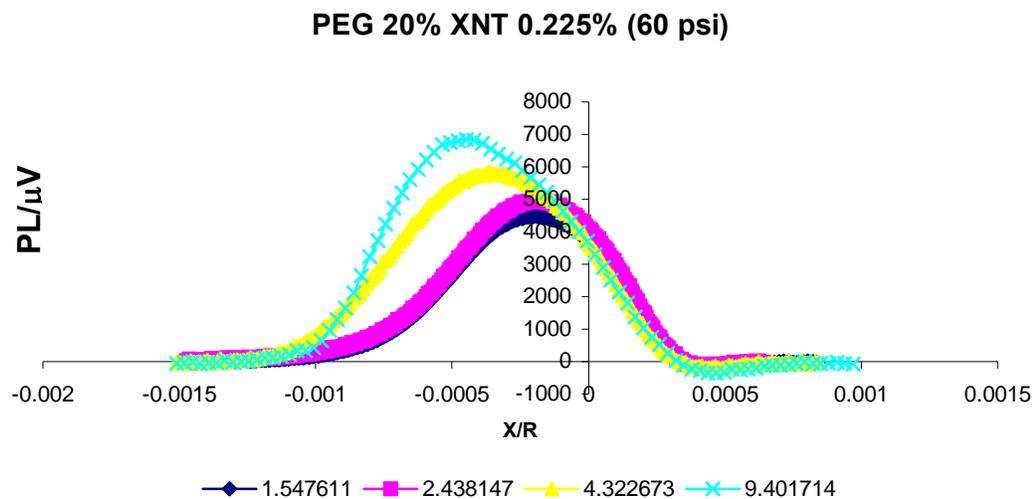


Figura 4.2.5 Fluidos Viscoelásticos. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

4.3 Viscosidad extensional

Para calcular la viscosidad extensional se utilizo el reómetro de orificio cuyo principio de operación fue previamente descrito en el capítulo 3. El reómetro fue calibrado en términos del número de Euler versus el número de Reynolds con fluidos Newtonianos, número adimensional que se define más adelante. Esta curva de calibración fue utilizada para calcular la viscosidad extensional.

La razón de deformación fue calculada según la metodología propuesta por Carreau (31) la razón de deformación efectiva es definida como la raíz cuadrada de la segunda invariante del tensor de la velocidad de deformación.

$$\overline{\dot{\gamma}} = \sqrt{3\dot{\varepsilon}} \quad (\text{ecuación 4.1})$$

Donde:

$\dot{\varepsilon}$ = razón extensional promedio y esta definida por:

$$\dot{\varepsilon} = k_s \left(\frac{32 Q}{\pi d_0^3} \right) \quad (\text{ecuación 4.2})$$

donde k_s es la constante de proporcionalidad de Metzner-Otto. De acuerdo con Della Valle et al, (29) determinada por simulación numérica usando fluidos, pseudoplásticos se obtuvo una $k_s=2.1$, por lo que razón efectiva de deformación es igual a:

$$\overline{\dot{\gamma}} = 29.10 \left[\frac{V_0}{d_0} \right]$$

$$d_0 \quad (\text{ecuación 4.3})$$

Donde:

V_0 = velocidad del fluido en el orificio

La viscosidad extensional aparente fue determinada a partir de la expresión de la curva de calibración en el régimen laminar ($Re < 20$).

$$Eu = \frac{38}{Re} \quad (\text{ecuación 4.4})$$

Donde el número de Euler y Reynolds son definidos como:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho v_0} \quad (\text{ecuación 4.5})$$

$$Re = \frac{\rho v_0 d_0}{\eta}$$

De las ecuaciones 4.4 y 4.5, despejando η y usando la razón teórica de Trouton $\eta_E = 3\eta$ se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad extensional:

$$\eta_E = 3 \left(\frac{\Delta P d_0}{19 v_0} \right) \quad (\text{ecuación 4.6})$$

Donde:

ΔP = caída de presión

v_0 = velocidad en el orificio

d_0 = diámetro del orificio

Como fue propuesto por Ascanio et al, (30), una aproximación de la razón de Trouton puede obtenerse mediante:

$$Tr = 3 \left(\frac{Eu}{38} \right) Re \quad (\text{ecuación 4.7})$$

Donde Eu es el numero experimental de Euler y Re es el numero de Reynolds determinado por:

$$Re = \frac{\rho v_0 d_0}{\eta_\infty} \quad (\text{ecuación 4.8})$$

Donde η_∞ es la viscosidad a una elevada deformación de corte.

La aparente viscosidad extensional calculada con la ecuación 4.6 a partir de los datos obtenidos del reómetro de orificio para el caso del fluido Newtoniano es graficada, en escala log-log (figura 4.3.1) como una función de la velocidad de corte (razón de deformación efectiva). Este fluido exhibe una viscosidad extensional inicial muy pequeña la cual se incrementa de manera lineal con la velocidad de corte. Para el caso de un fluido no-Newtoniano (figura 4.3.2) se tiene que la viscosidad extensional disminuye conforme incrementa la velocidad de corte siendo muchísimo mayor la viscosidad extensional de los fluidos no-Newtoniano al inicio de la prueba que la del fluido Newtoniano. En el caso de la suspensión (figura 4.3.3) exhibe una disminución de la viscosidad

extensional hasta una razón de corte de $6.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ después de este punto experimenta un incremento en la viscosidad extensional. En los fluidos viscoelásticos se observa que el fluido con menor módulo elástico figura 4.3.4a tiene la tendencia a disminuir su viscosidad a menores velocidades de corte en comparación con el otro fluido viscoelástico pero hasta cierta velocidad crítica de ahí la viscosidad tiende a incrementar pero no lo suficiente para evitar la aparición del fenómeno denominado “misting” a reducidas velocidades, el otro fluido viscoelástico figura 4.3.4b debido a que tiene un módulo elástico mayor el fenómeno denominado “misting” se presenta a velocidades mayores con respecto al otro..

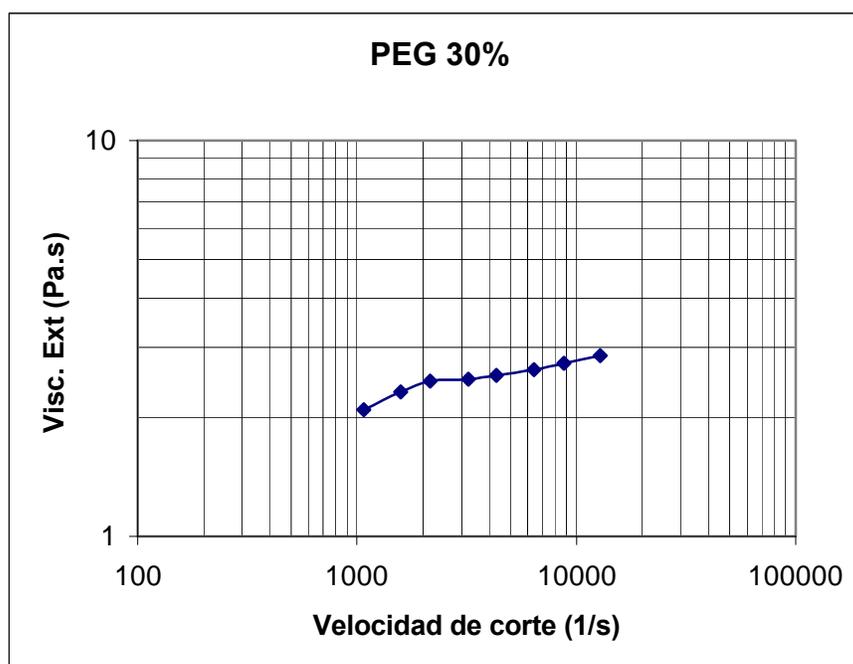
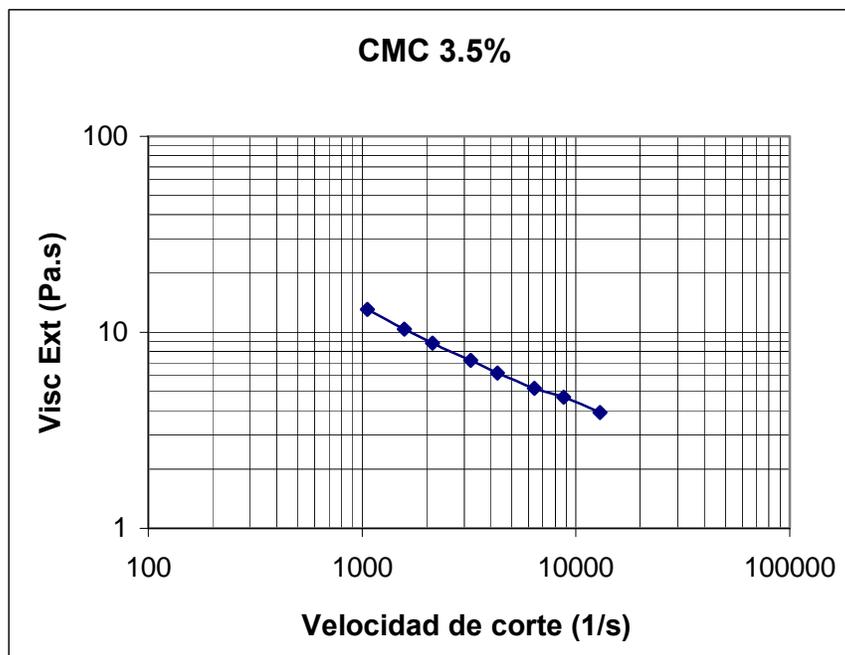
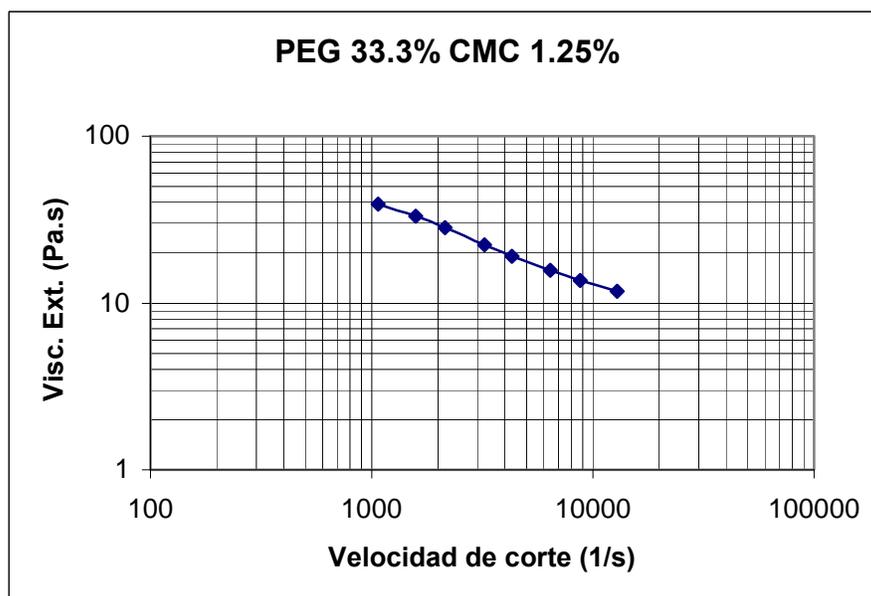


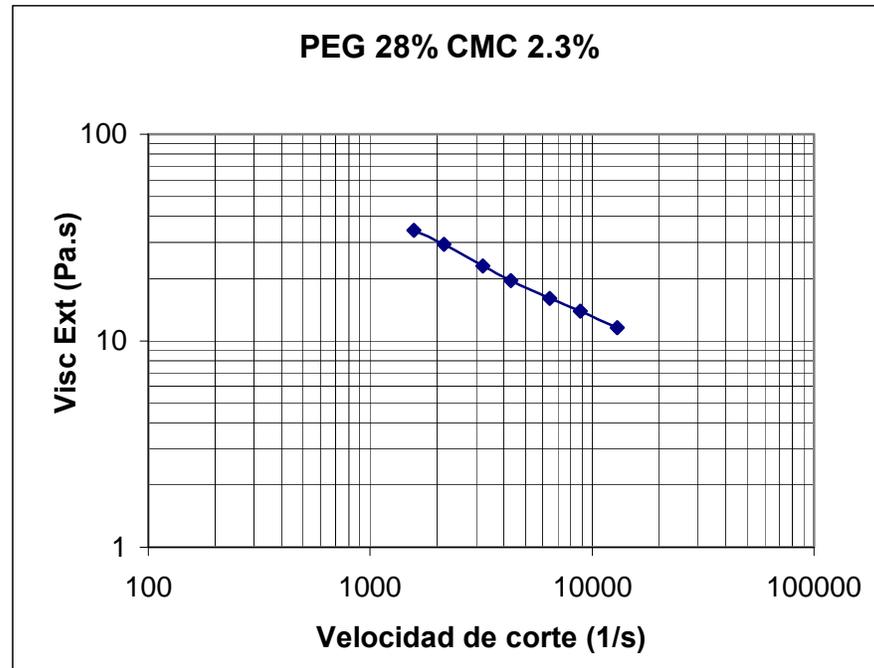
Figura 4.3.1 Fluido Newtoniano



a)



b)



c)

Figura 4.3.2 Fluidos no-Newtonianos

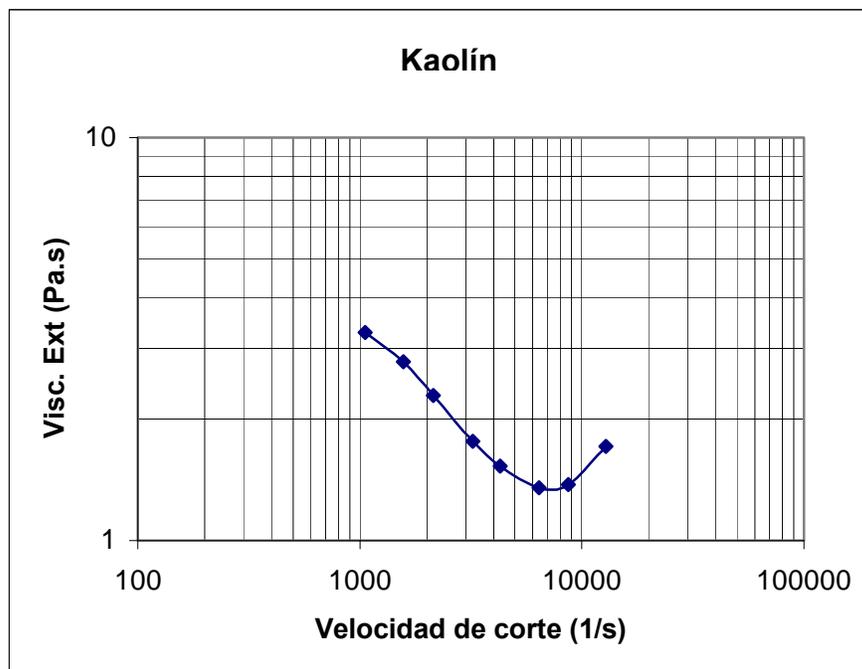
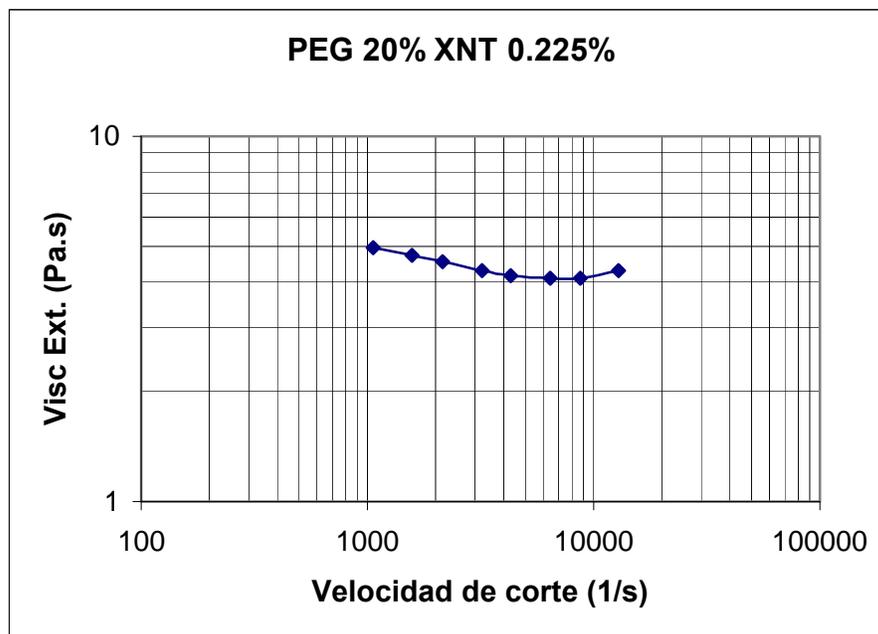
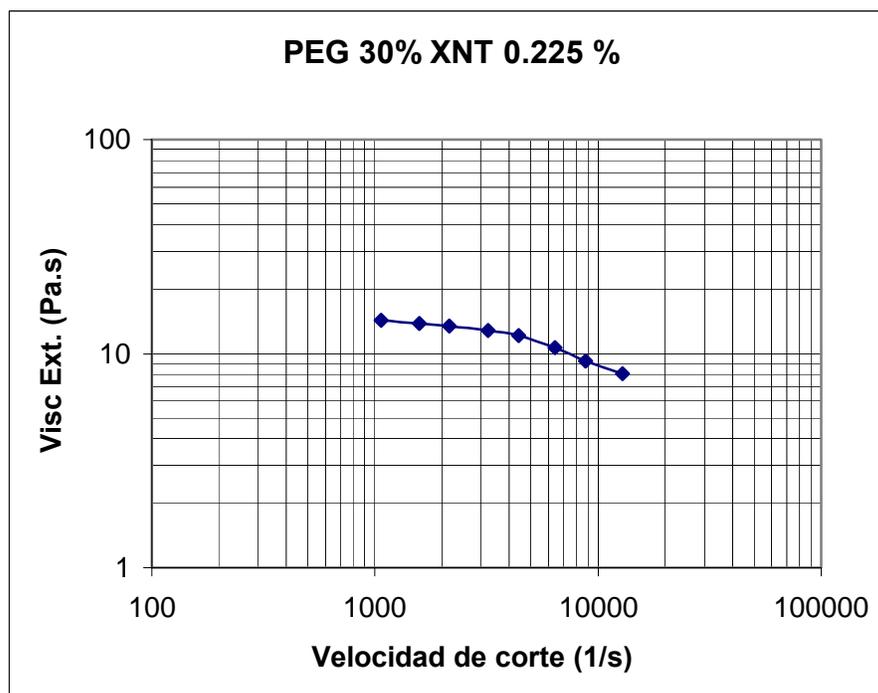


Figura 4.3.3 Suspensión



a)



b)

Figura 4.3.4 Fluidos Viscoelásticos

Finalmente es interesante comparar la razón entre la viscosidad extensional y la viscosidad de corte usando la razón de Trouton, Tr , como una función de la razón efectiva de deformación. La figura 4.3.5 muestra una razón de Trouton en el rango de 3.5 a 4.8 esto indica que la viscosidad extensional es mas de tres veces la viscosidad de corte cuando los fluidos Newtonianos son altamente deformados. Un efecto opuesto es observado para los fluidos que contienen CMC (figura 4.3.6) esto significa que la razón de Trouton tiende a disminuir como un efecto del incremento de la razón de deformación efectiva. El mismo comportamiento es observado para los fluidos viscoelásticos (figura 4.3.7) en los cuales la razón de Trouton disminuye desde 55 a 31 a medida que la razón de deformación efectiva incrementa. Como es esperado para las suspensiones concentradas (figura 4.3.8) a razón de Trouton primero disminuye desde 52 a 21 a una deformación superior de 6500 s^{-1} y para razones de deformaciones mas altas la razón de Trouton se incrementa hasta 27.

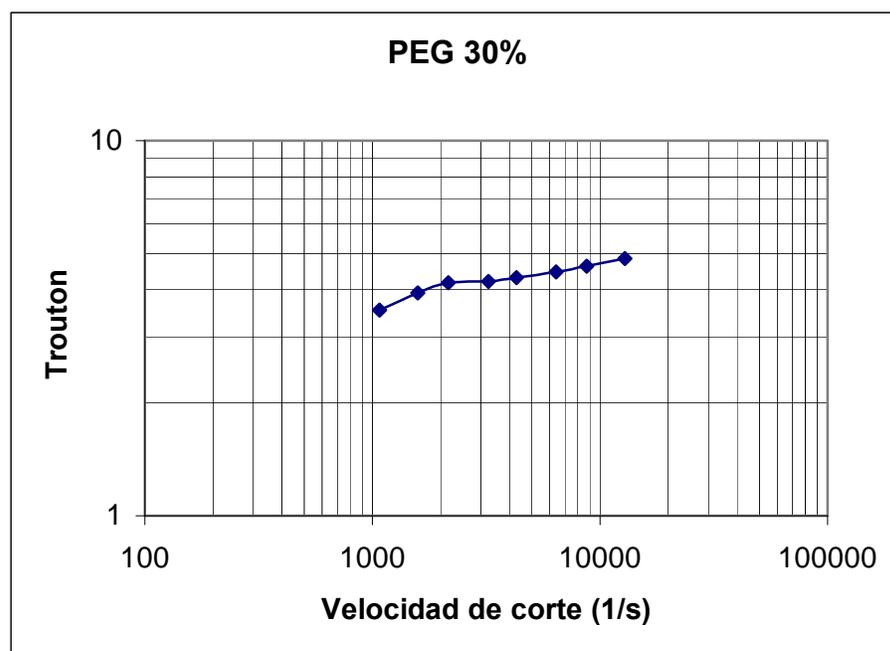
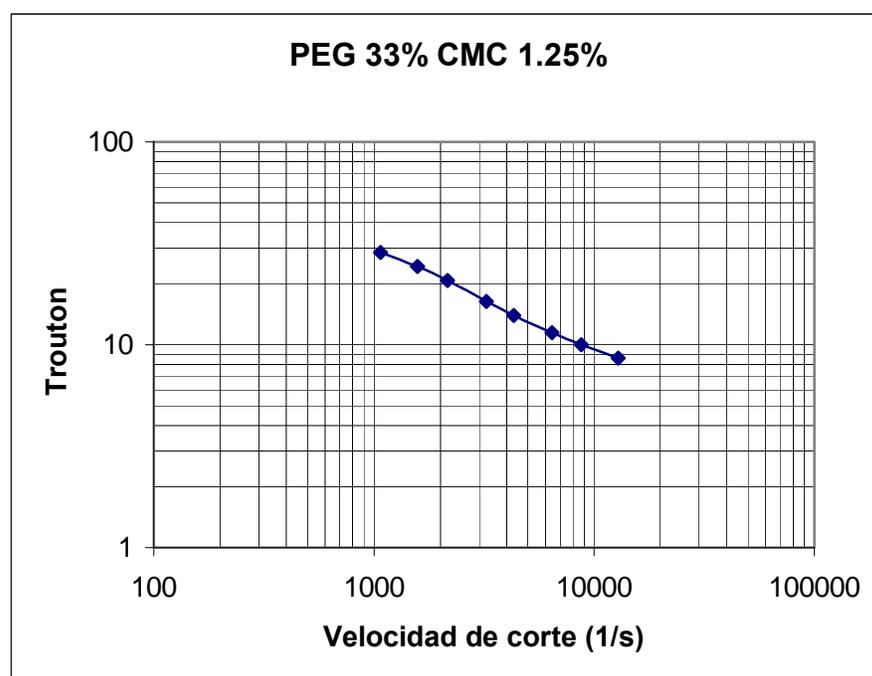
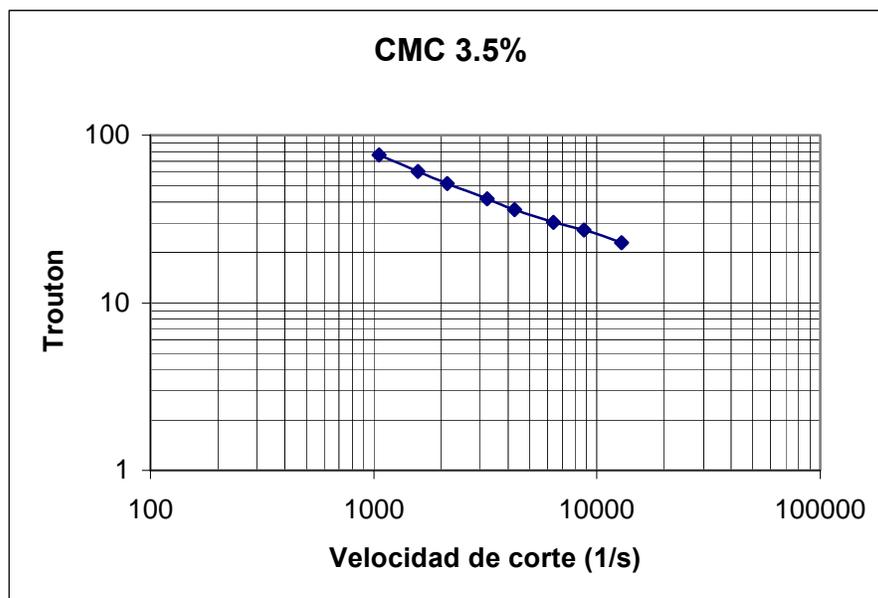


Figura 4.3.5 Fluido Newtoniano



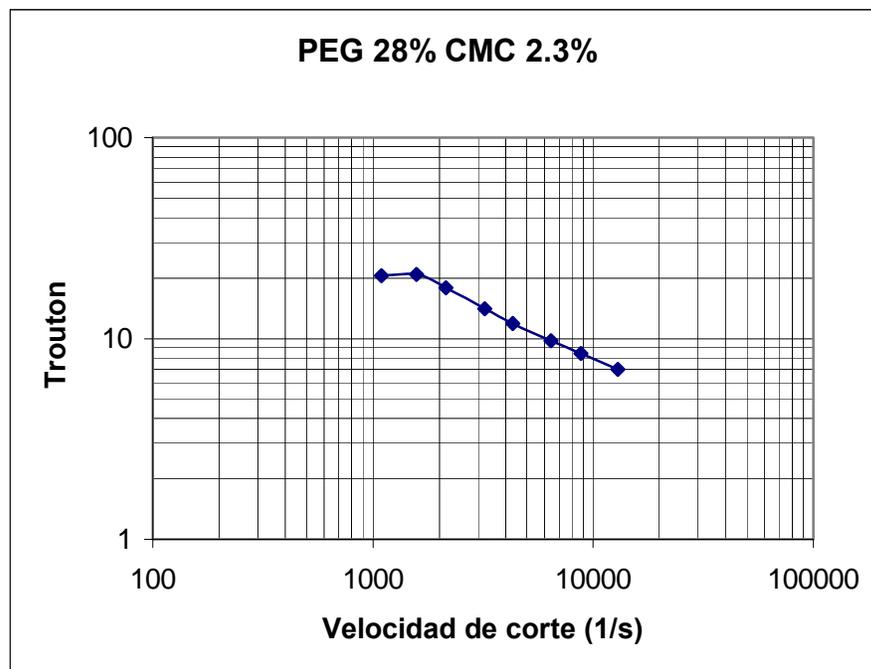
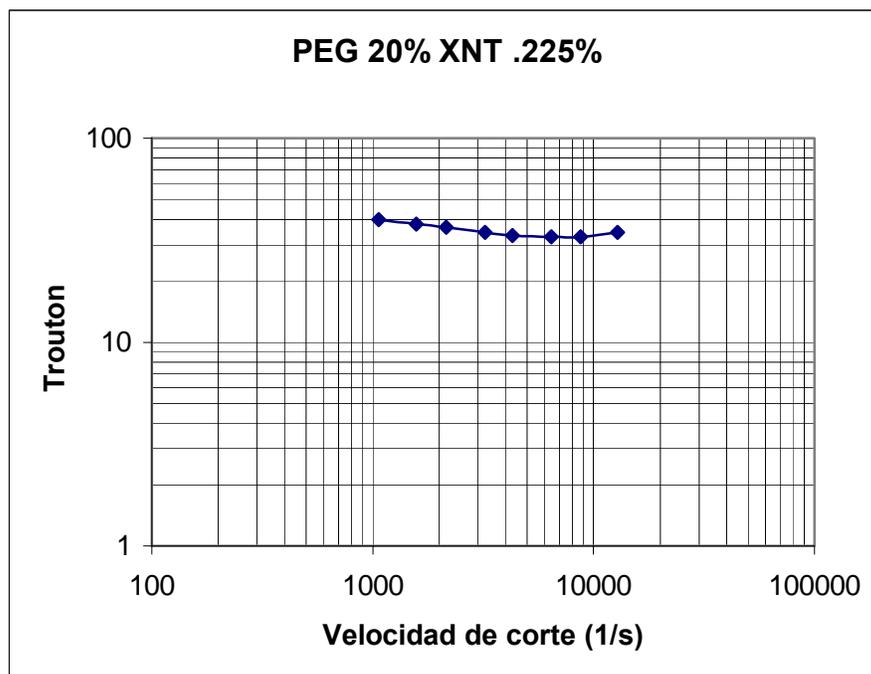


Figura 4.3.6



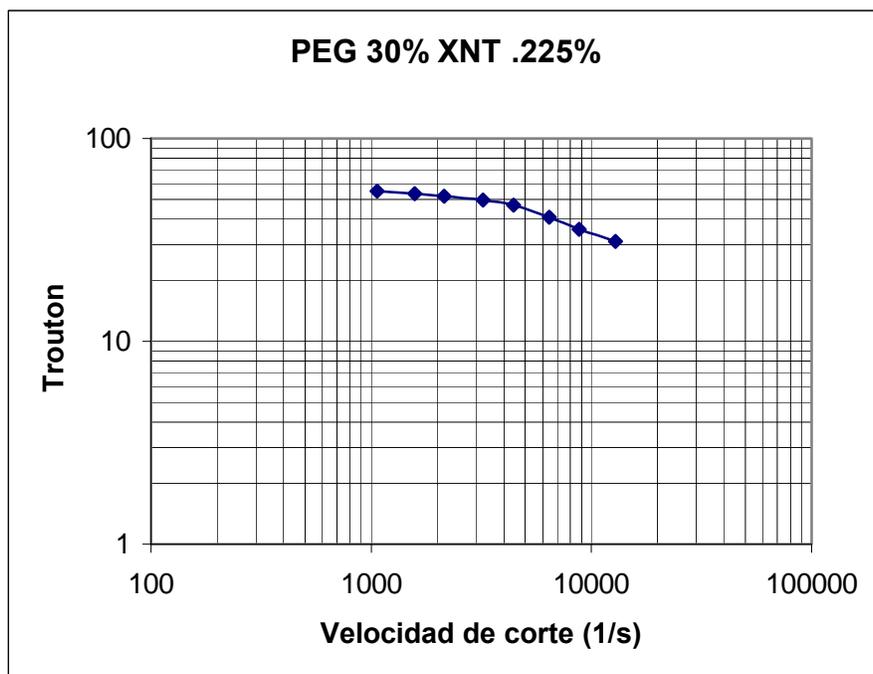


Figura 4.3.7

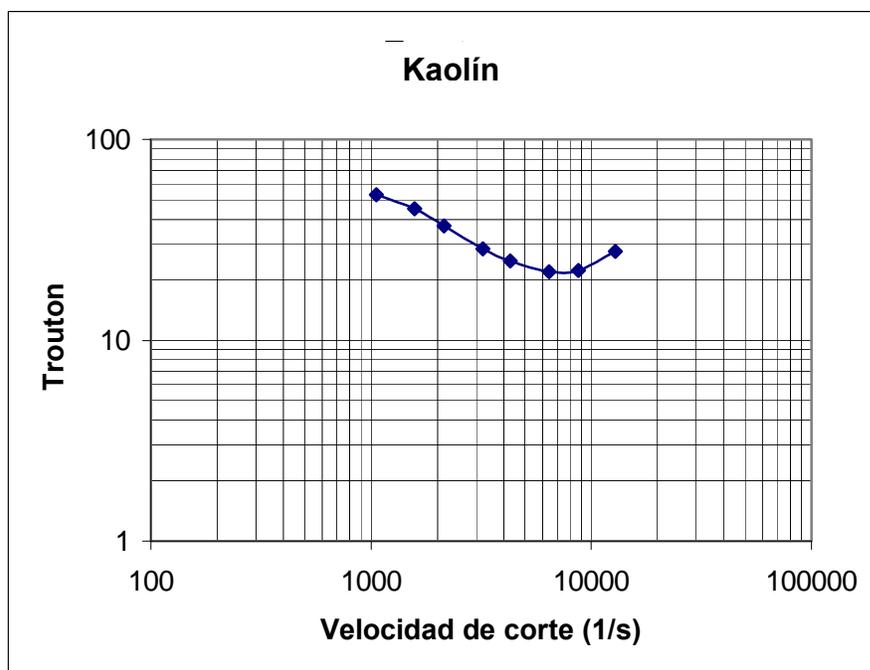


Figura 4.3.8

4.4 Análisis de imágenes

En los fluidos Newtonianos se puede observar (figura 4.1.1) a reducidas velocidades que en las septas (películas) que se forman a la salida del nip empiezan a desarrollarse filamentos en el extremo inferior de las septas, y conforme incrementa la velocidad de los rodillos los filamentos comienzan a desarrollarse cada vez mas cerca a la salida del “nip”, presentando una gran cantidad de misting en comparación con el resto de los fluidos. En el caso de los fluidos Newtonianos se puede observar que a reducidas velocidades se empieza a manifestar el fenómeno del “misting” el cual comienza hacerse mas agudo conforme incrementa la velocidad. Relacionando este fenómeno con el número de capilaridad (ecuación 4.9) se puede decir que a un valor de capilaridad mayor corresponde una cantidad mayor de “misting”

En el caso de los fluidos que contienen CMC figura 4.4.2 a reducidas velocidades se forman septas de un espesor muy grueso que no dan lugar a la formación de filamentos pero conforme se incrementa la velocidad de los rodillos se observa que estas septas empiezan a adelgazarse dando lugar a la aparición de filamentos y aunque este fluido tiene un comportamiento parecido al de los fluidos Newtonianos, el fenómeno del “misting” es retardado ya que además de depender del numero de Capilaridad también se ve afectado por la viscosidad extensional la cual es mayor para estos fluidos.

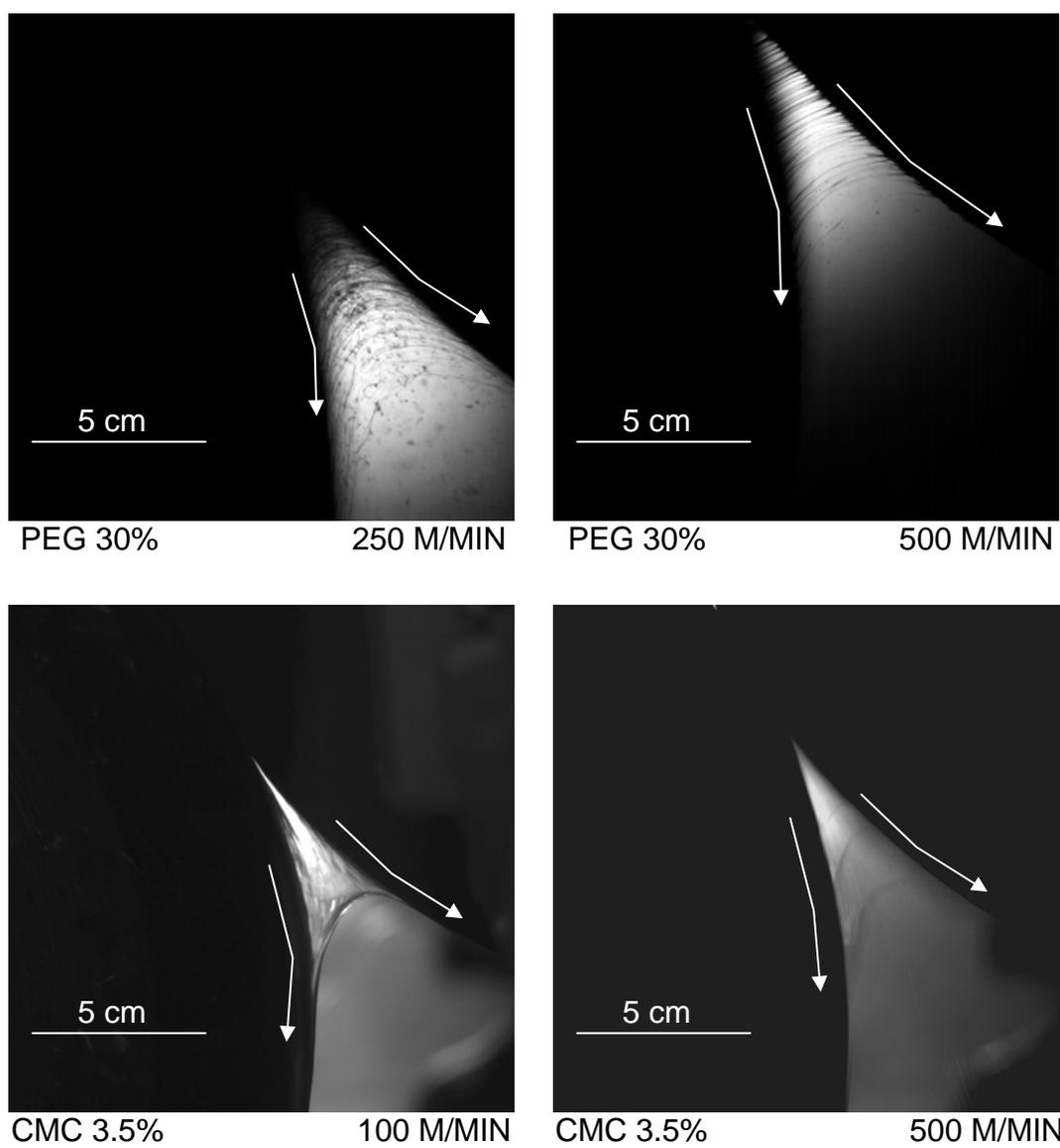
$$Ca_E = \frac{\eta_E U}{\sigma} \quad (\text{ecuación 4.9})$$

El comportamiento de los fluidos viscoelásticos es un poco diferente la figura 4.4.4 muestra un pequeño menisco extendido desde el nip a un Ca_E de 360 y a medida que la velocidad del rodillo incrementa el menisco se vuelve mas largo. A un Ca_E máximo se observa que los filamentos tienen una forma de “c” además son altamente alongados y no hay eyección de gotas a los

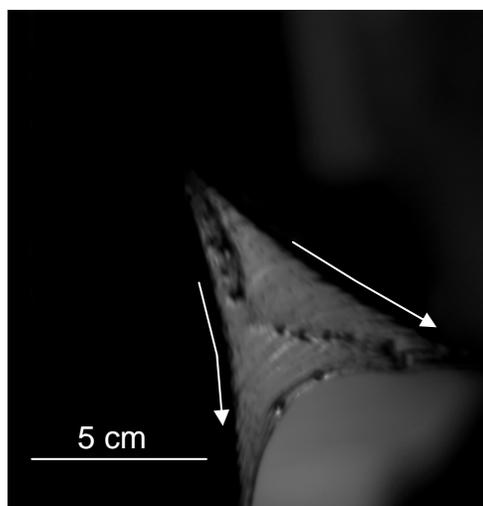
alrededores en la región analizada. Este efecto puede ser atribuido a las componentes de las fuerzas elásticas y viscosas, las cuales son mucho más grandes que el número de capilaridad.

Finalmente en las suspensiones un menisco largo es formado a reducidos número de capilaridad como se muestra en la figura 4.4.3. Para un número de capilaridad de 320, el cual corresponde a una velocidad de 500 m/min del rodillo los meniscos o películas son formadas cerca del nip formándose filamentos y estos son alargados y las primeras gotas de misting aparecen. Como se muestra en la tabla 2, la profundidad mas pequeña del valle corresponde a la suspensión, el cual nos lleva a pensar que no solo las condiciones hidrodinámicas afectan el fenómeno del misting, también se puede atribuir este fenómeno a las propiedades reológicas del fluido.

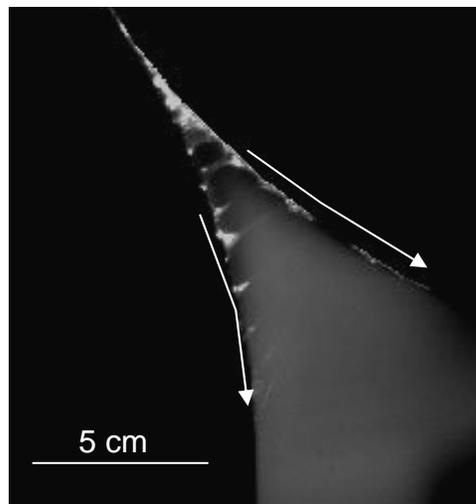
Figura 4.4.1 Foto fluido Newtoniano



a)

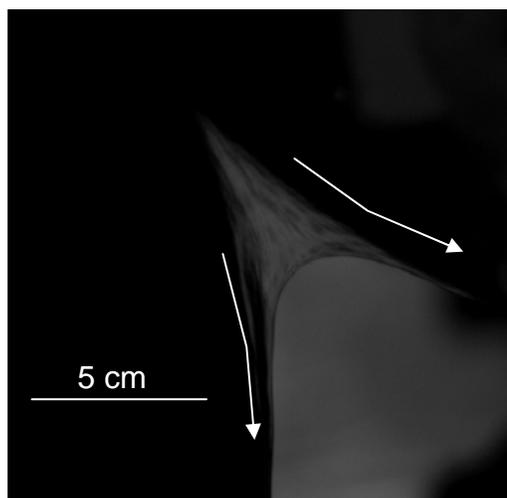


28PEG 2.3CMC 50 M/MIN

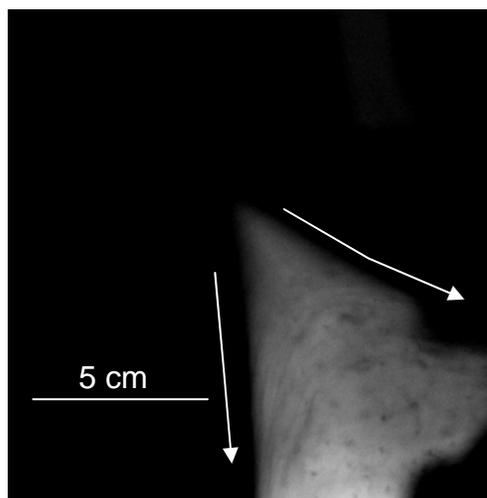


28PEG 2.3CMC 250 M/MIN

b)



33PEG 1.25CMC 100 M/MIN



33PEG 1.25CMC 500 M/MIN

c)

Figura 4.4.2 Foto Fluido no-Newtoniano

f

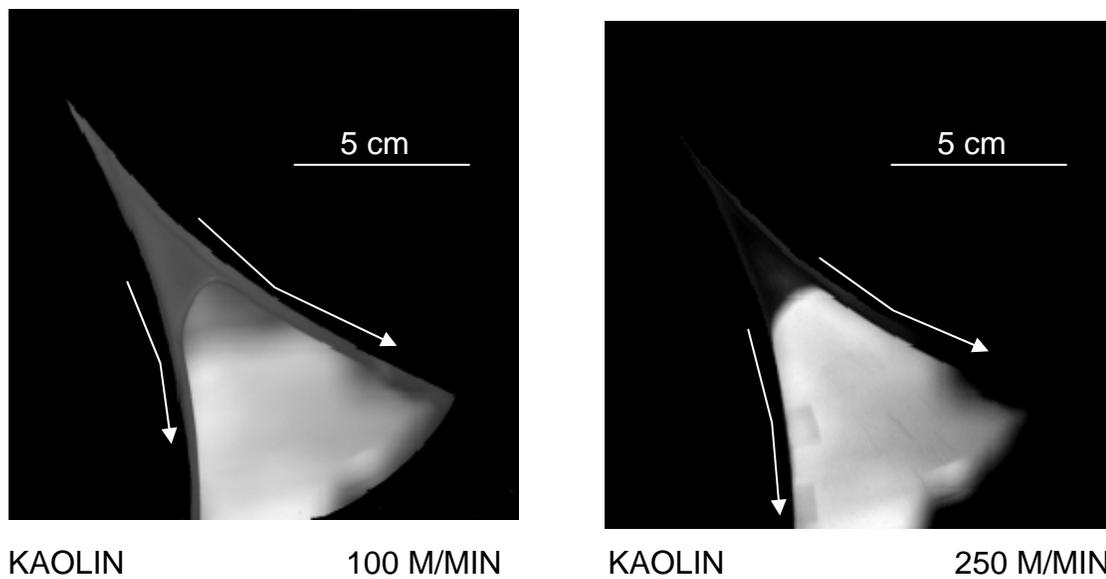
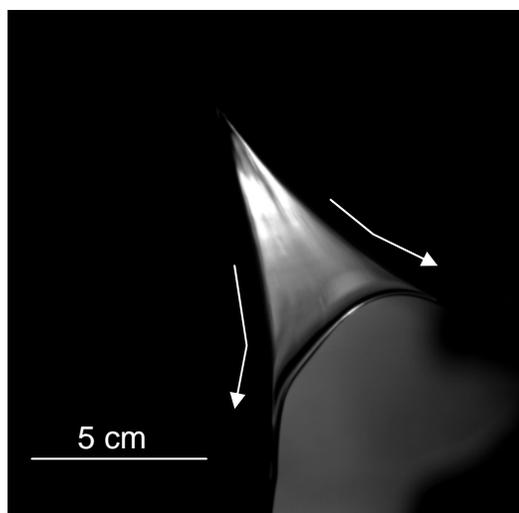
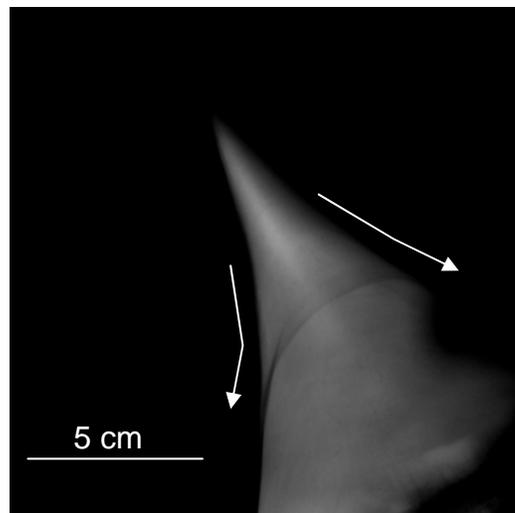


Figura 4.4.3 Foto Suspensión (kaolín)



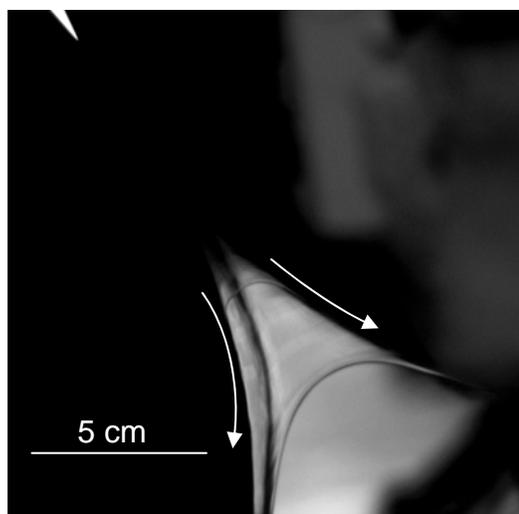
20 PEG .225 XNT

100 M/MIN



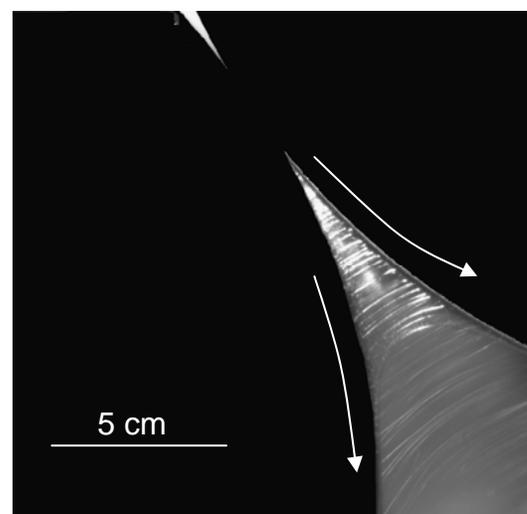
20 PEG .225 XNT

500 M/MIN



30 PEG .225 XNT

150 M/MIN



30 PEG .225 XNT

500 M/MIN

Figura 4.4.4 Foto Fluido viscoelástico

Fluido	100 m/min		150 m/min		250 m/min		500 m/min	
	max	min	max	min	max	min	max	min
PEG	3450.08	-50.98	3855.00	-152.95	4169.56	-104.80	4254.54	-130.29
CMC	2676.79	-59.48	2957.21	-116.13	3180.99	-150.12	3367.94	-144.46
No-New (1)	4528.76	-175.37	5003.30	-170.21	5838.90	-201.16	6839.56	-355.91
No-New (2)	2733.45	-59.48	3246.14	-113.30	3506.74	-212.44	4685.10	-286.09
VE (1)	4528.75	-175.37	5003.29	-170.21	5838.90	-201.16	6839.56	-355.91
VE (2)	2739.11	-59.48	3257.47	-116.13	3506.74	-220.94	4727.58	-308.75
SUSP	3115.66	-36.82	3147.00	-42.48	3342.45	-93.47	3373.61	-113.30

(a)

Fluido	100 m/min		150 m/min		250 m/min		500 m/min	
	max	min	max	min	max	min	max	min
PEG	3455.75	-59.48	3860.81	-235.10	4472.65	-274.76	4690.76	-475.87
CMC	2574.82	-82.14	3223.48	-82.14	3350.94	-141.63	3682.36	-116.13
No-New (1)	3413.27	-65.15	3543.56	-124.63	3614.38	-257.77	4277.21	-283.26
No-New (2)	2385.04	-172.79	2540.83	-297.42	3277.30	-439.05	4096.63	-548.81
VE (1)	3316.66	-110.91	3366.83	-73.94	3791.62	-103.51	4536.64	-108.27
VE (2)	2366.02	-110.90	3361.54	-100.34	3543.75	-145.23	3995.30	-248.22
SUSP	3427.42	-50.98	3693.69	-67.98	3891.97	-84.97	3993.94	-93.47

(b)

Tabla 2. Valores críticos de presión de los perfiles de presión adimensionales (a) $W = 3$ kN/m; (b) $W = 4$ kN/m.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Siete fluidos de diferentes composiciones fueron caracterizados reológicamente para determinar el efecto que tienen sus propiedades físicas sobre el fenómeno denominado “misting” (rocío)

Se determino el modulo elástico y viscoso de cada uno de los fluidos utilizando un reometro de cilindros concentricos modelo AR 2000, el modulo elástico de los fuidos viscoelasticos tiende a disminuir mas lento a velocidades mayores de corte con respecto al resto de los fluidos dandole a los fluidos viscoelasticos la ventaja de mantener un viscosidad de corte menor a mayores velocidades.

Ademas se utilizo un reometro de orificio para calcular la viscosidad extensional mostrando que al contrario del resto de los fluidos los viscoelasticos tienden a alargarse grandes cantidades y volver a su longitud original sin sufrir ninguna deformación.

Se hizo pasar los siete fluidos a través de una maquina recubridora de rodillos, la viscosidad extensional de los fluidos viscoelasticos al igual que los otros fluidos exhibe una disminución conforme incrementa la velocidad de corte pero a una velocidad mucho mas lenta lo que a altas velocidades las fuerzas extensionales siguen teniendo una participación importante y no se consideran despreciables.

La razon de Trouton es mayor para los fluidos viscoelasticos y al igual que el resto de los fluidos esta razon disminuye conforme la velocidad de corte aumenta debido a un incremento en la viscosidad de corte pero como en los fluidos viscoelasticos la razon de Trouton es mucho mayor que en el resto de los fluidos debido a una viscosidad extensional mayor, por lo que el fenómeno del “misting” se ve retardado.

Por ultimo cabe mencionar que debido a las superiores propiedades reológicas de los fluidos viscoelasticos (modulo elastico, viscosidad extensional, tension superficial) el fenómeno del misting aparece a mayores velocidades y presiones en comparación con otros fluidos.

Futuras investigaciones en este tema podrian enfocarse al desarrollo de un estudio numérico analizando el recubrimiento por rodillo a altas velocidades. Este estudio podria utilizarse para relacionar los efectos de la distribución de la presion y perfiles de velocidad sobre la ocurrencia del fenómeno “misting”

Referencias

1. Gutoff, E.B. and Cohen, E.D. (1995) Coating and Drying Defects, J. Wiley & Sons.
2. Banks, W.H. and Mill, C.C. (1954), Some observation on the behavior of liquids between rotating rollers, Proc.R.Soc.London Ser. A 223, pag.414-419
3. Coyle, D.J., Macosko, C.W. and Scriven, L.E. (1982). Computer simulation of nip flow in roll coating Computer Applications in Applied Science, ACS Symp. Series, pag 251-264
4. Tanguy, P; Fortin, M. Choplin, L. (1984) Finite element simulation of dip coating, I: Newtonian fluids, Int.J. for Num. Meth. In fluids, vol. 4, pag 441-457
5. GASKELL, P.H., SAVAGE, M.D. and SUMMERS, J.L. (1995). Modelling and analysis of meniscus roll coating, J. Fluid Mech. , 298, sep 95, pp. 113-137
6. GASKELL, P., INNES, G. and SAVAGE, M. (1998). Experimental investigation of meniscus roll coating, J. Fluid Mech., 355, pp. 17-44
7. COYLE, D.H. (1984). The Fluid Mechanics of Roll Coating : Steady Flows, Stability and Rheology, Ph.D thesis, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
8. COYLE, D. (1988). Forward roll coating with deformable rolls: A simple one-dimensional elastohydrodynamic model, Chemical Engineering Science, 43: 2673-2684.
9. COHU, O. and MAGNIN, A. (1997) Forward roll coating of Newtonian fluids with deformable rolls: An experimental investigation, Chemical Engineering Science*i*, 52:1339-1347.
10. CARVALHO, M.S. and SCRIVEN, L.E. (1994). Effect of deformable roll cover on roll coating, TAPPI J. , 77, pp. 201-208
11. CARVALHO, M.S. (1996). Roll coating flows in rigid and deformable gaps, Ph.D. thesis, University of Minnesota (Minneapolis MN, USA).

12. CARVALHO, M.S. and SCRIVEN, L.E. (1997). Deformable roll coating flows : steady state and linear perturbation analysis, *J. of Fluid Mechanics*, vol. 339, pp. 143-172
13. RÉGLAT, O. and TANGUY P.A., 1997, Experimental study of the flow in the metering nip of a metering-size press, *AIChE J* 43: 2911-2920.
14. MACPHEE, J. (1997a). A Unified View of the Film Splitting Process (part I), *Am. Ink. Maker*, 75, no. 1, pp. 44-49
14. MACPHEE, J. (1997b). A Unified View of the Film Splitting Process (part II), *Am. Ink. Maker*, 75, no. 2, pp. 51-56
15. ROPER, J.A. III, SALMINEN, P., URSCHELER, R., and BOUSFIELD, D.W. (1999). Studies of Orange Peel Formation in High-Speed Film Coating, *TAPPI J.*, 82, No. 1, pp. 231-238
16. ROPER, J.A. III, URSCHELER, R., BOUSFIELD, D.W., and SALMINEN, P. (1997). Observations and Proposed Mechanisms of Misting on High-Speed Metered Size Press Coaters, *TAPPI Coating Conference*, 1-14
17. TRIANTAFILLOPOULOS, N.G. and SMITH, M.K. (1998). Troubleshooting rheology problems in metered size press, *TAPPI Metered Size Press Forum*, pp. 13-35.
18. GRÖN, J., NIKULA, E. and SUNDE, H. (1998). Influence of coating composition on web release in high speed film transfer coating, *TAPPI J.*, 81, jan 98, pp. 216-225
19. ROPER, J.A. III, SALMINEN, P., URSCHELER, R. and MOORE, E. (1998). Optimization of Formulation Parameters to Reduce Misting and Orange Peel Formation on Metered Film Coaters, *TAPPI Metered Size Press Forum*, pp. 37-55
20. REIMERS, O. GANE, P.A.C., SPIELMANN, D., KOGLER, W. and KLEEMANN, S. (1998). Filmsplitting and misting on metering size presses –influence of coating formulations components, *52nd APPITA Annual General Conf.*, pp. 253-258

21. DRAGE, P. G., HIORNS, A.G., PARSONS, D.J. and COGGON, L. (1998). Factors governing print performance in offset printing of matte papers, TAPPI J. , vol. 81, no. 11, pp. 175-184
22. GRÖN, J., SUNDE, H., and NIKULA, E. (1996). Runnability Aspects in High Speed Film-Transfer Coating, TAPPI Metered Size Press Forum, pp. 21-50
23. SALMINEN, P., URSCHALER, R., ROPER III, J.A., and CHASE D. (1996). Optimizing the Coating Formulation to Reduce Misting in High-Speed Film Coating, TAPPI Metered Size Press Forum, pp. 51-55
24. CARREAU, P.J. and LAVOIE P.A. (1993). Rheology of coating colors : A rheologist point of view, Proc. 1993 TAPPI Advanced Coating Fund. Symp., 1.
25. PAGE, A., CARREAU, P.J., MOAN, M. and HEUZEY, M.C. (2002). Rheological behavior of coating colors: Influence of thickener and pigment. Submitted to Canadian Journal of Chemical Engineering.
26. YZIQUEL, F., MOAN, M., CARREAU, P.J. and TANGUY, P.A. (1999). Nonlinear viscoelastic behavior of paper coating colors. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 14, 37-47.
27. ROPER, J.A. III and ATTAL, J.F. (1993). Evaluations of coating high-speed runnability using pilot coater data, rheological measurements and computer modeling, TAPPI J., 76, No. 5, pp. 55-61.
28. O'BRIEN, V.T. and MACKAY, M.E. (2002). Shear and elongation flow properties of kaolin suspensions. Journal of Rheology, 46, 557-571.
29. DELLA VALLE, D., TANGUY, P.A. and CARREAU, P.J. (2000). Characterization of the extensional properties of complex fluids using an orifice flowmeter, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 94, 350-358.

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1.

Figura 1 MFC. Máquina de recubrimiento por rodillos

Capítulo 2.

Figura 2.1 Efecto del Numero de capilaridad (Ca) en el flujo a) 0.1 b) 0.2
c) 0.5

Figura 2.2 Las flechas muestran la trayectoria que sigue el fluido observándose claramente una doble trayectoria.

Figura 2.3 La línea punteada muestra el mínimo espacio libre entre los rodillos. Gaskell et al, (6)

Figura 2.4 Cambio en el carácter de las películas a la salida del nip vs. Velocidad (Mc Phee 14a)

Figura 2.5 (a) Superficie lisa (b) Formación de cavitación y filamentos

Figura 2.6 Efecto del papel base en la formación de la piel de naranja y el efecto del misting

Figura 2.7 Efecto del nivel de CMC en la formación del misting y del orange peel (Roper et al)

Figura 2.8 Experimento de corte, Roper et al, (15).

Figura 2.9 Adhesion del recubrimiento a la superficie del rodillo dependiendo del "misting" así como de la velocidad de la maquina. Grön et al (18)

Figura 2.10. Misting en función del velocidad de transferencia a 1950 m/min Grön et al (18).

Capítulo 3

Figura 3.1 Maquina de rodillos

Figura 3.2 Sensor de presión

Figura 3.3 Montaje del anillo recolector

Figura 3.4 Plato de orificio

- Figura 3.5 Esquema del Reómetro de orificio
Figura 3.6.1 FTÅ 200
Figura 3.6.2 PEG 30% Tensión superficial 53.2 mN/m

Capítulo 4

- Figura 4.1.1 Fluido Newtoniano
Figura 4.1.2 Fluidos No-Newtonianos
Figura 4.1.3 Suspensiones
Figura 4.1.4 Fluidos viscoelásticos
Figura 4.1.5 Fluido Newtoniano
Figura 4.1.6 Fluidos No-Newtonianos
Figura 4.1.7 Suspensión (kaolín)
Figura 4.1.8 Fluidos viscoelásticos
Figura 4.2.1 Representación del gap negativo generado entre los rodillos

Figura 4.2.2 Fluido Newtoniano. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

Figura 4.2.3 Fluidos no-Newtonianos. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

Figura 4.2.4 Suspensión. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

Figura 4.2.5 Fluidos Viscoelásticos. Las curvas pertenecen a número de elasticidad diferente

Figura 4.3.1 Fluido Newtoniano
Figura 4.3.2 Fluidos no-Newtonianos
Figura 4.3.3 Suspensión
Figura 4.3.4 Fluidos Viscoelásticos
Figura 4.4.1 Foto fluido Newtoniano
Figura 4.4.2 Foto Fluido no-Newtoniano
Figura 4.4.3 Foto Suspensión (kaolín)
Figura 4.4.4 Foto Fluido viscoelástico

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 3

Tabla.- 1 Composición y propiedades físicas de los fluidos modelo

Capítulo 4

Tabla.- 2 Valores críticos de los perfiles de presión adimensionales

