

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
POSTGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS Y DE
FORMULACIÓN SOBRE LA ESTABILIDAD DE ESPUMAS NO ACUOSAS”**

PRESENTADO POR:

Alexis José Cova Bonillo

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente
como requisito parcial para optar al título de
MAGISTER SCIENTIARUM EN INGENIERÍA QUÍMICA**

BARCELONA, MAYO DE 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
POSTGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS Y DE
FORMULACIÓN SOBRE LA ESTABILIDAD DE ESPUMAS NO ACUOSAS”**

Jurado Examinador

Prof. Shirley Marfisi (Dra.)
Tutor

Prof. Lucas Álvarez (Ph.D.)
Jurado Principal

Prof. Arturo Rodulfo (M.Sc.)
Jurado Principal

BARCELONA, MAYO DE 2009

ARTÍCULO 44

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los que de una u otra forma han colaborado para la culminación de este trabajo, explícitamente quisiera mencionar a:

- La profesora Shirley Marfisi, mi asesora, creadora de este trabajo e impulsora indudable;
- A mis colaboradores, José A. Danglad y Guillermo Linero, sin quienes no hubiese terminado nunca;
- A mi departamento, el mejor de la Universidad de Oriente;
- A Dios.

DEDICATORIA

A mi hijo, a mi esposa, a mis padres y mis hermanos

RESUMEN

Se evaluó el efecto de variables hidráulicas y de formulación en espumas no acuosas, esencialmente en mezclas al 20% de aceite de motor PDV SAE 80 y kerosén comercial. Para ello, se construyó un sistema basado en una columna de vidrio de 80 cm de altura, con control de temperatura. Se encontró que la mejor opción para la producción de las espumas fue con el surfactante SPAN 80, entre los evaluados. Se encontró que al incrementar la concentración del surfactante, aumenta la espumabilidad, pero disminuye la estabilidad de las espumas. Tanto la fracción de aceite como la temperatura, que afectan la viscosidad de las mezclas evaluadas, afectan la espumabilidad y la estabilidad de las espumas formadas de tal manera que a mayor viscosidad se consigue mayor estabilidad. Se encontró un efecto espumante de los alcoholes etanol, n-propanol, n-butanol, n-pentanol y n-octanol a flujos menores a 200 mL/min de N₂. A flujos mayores, se encontró el efecto contrario: la espumabilidad y la estabilidad de las espumas disminuyen con la longitud de la cadena hidrocarbonada del alcohol. No hubo efectos notables de la posición del grupo hidroxilo del alcohol en las espumas estudiadas. Se observó un efecto espumante en las partículas de cuarzo y de los asfaltenos agregados a las mezclas, probablemente debido a que estos sólidos se incorporan en la superficie de las burbujas formando una película que aumenta la viscosidad superficial y el módulo de elasticidad. Los resultados encontrados para los alcoholes y los asfaltenos fueron ajustados según la ecuación $H/H_0 = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$, donde la constante de decaimiento, α , está entre 0,7 y 0,9 para las espumas con alcoholes y se incrementa hasta 1,1 para las espumas con asfaltenos.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE DEL CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
ASPECTOS TEÓRICOS.....	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.2 Espumas.....	4
2.2.1 Formación de las espumas.....	4
2.2.2 Efecto Gibbs-Marangoni.....	5
2.2.3 Mecanismos de colapso de las espumas.....	5
2.2.4 Espumabilidad y estabilidad de las espumas.....	6
2.2.5 Medición de espumabilidad y estabilidad de espumas.....	7
2.2.6 Estabilización de espumas no acuosas con surfactantes.....	11
METODOLOGÍA.....	13
3.1 Diseño de un sistema para la medición de las etapas de vida de espumas no acuosas (formación y colapso), con control de temperatura, flujo y dispersión de gas.....	13
3.2 Preparación de espumas no acuosas a diferentes condiciones de flujo, variando la temperatura, naturaleza del aceite e hidrofiliicidad del surfactante.....	16
3.3 Evaluación de la acción antiespumante de alcoholes y de sólidos.....	22
3.3.1 Alcoholes.....	22
3.3.2 Partículas de cuarzo.....	25
3.3.3 Asfaltenos.....	28
3.3.4 Partículas de arena.....	31
RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32

4.1	Diseño de un sistema para la medición de las etapas de vida de espumas no acuosas (formación, maduración y colapso), con control de temperatura, flujo y dispersión de gas	32
4.2	Efecto de la relación gas/líquido, temperatura, naturaleza del aceite e hidrofiliidad del surfactante.....	33
4.2.1	Naturaleza del surfactante	33
4.2.2	Concentración del surfactante SPAN 80	36
4.2.3	Fracción de aceite en las mezclas	37
4.2.4	Temperatura.....	41
4.3	Evaluación de la acción antiespumante de alcoholes y de sólidos	42
4.3.1	Alcoholes	43
4.3.2	Cuarzo.....	48
4.3.3	Asfaltenos	50
4.3.4	Arena	53
4.4	Conclusiones	54
4.5	Recomendaciones	54
	BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas de diferentes surfactantes al 0,1 % v/v en función del caudal de gas.....	17
Tabla 3.2 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo de colapso	17
Tabla 3.3 Valores adimensionales de tiempo y altura para los ensayos con espumas en mezclas no acuosas.....	18
Tabla 3.4 Altura máxima de la espuma (Ho) para distintas concentraciones SPAN 80 en mezclas no acuosas en función del caudal de gas	19
Tabla 3.5 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas concentraciones de SPAN 80 en función del tiempo.....	19
Tabla 3.6 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas para distintas fracciones de aceite de motor PDV SAE función del caudal de gas.....	19
Tabla 3.7 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas fracciones de aceite de motor PDV SAE en función del tiempo	20
Tabla 3.8 Tensión superficial de los sistemas no acuosos.....	20
Tabla 3.9 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas temperaturas en función del tiempo	21
Tabla 3.10 Viscosidad cinemática de las mezclas usadas, sin aditivos.....	21
Tabla 3.11 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas para distintos alcoholes al 0,1% v/v en función del caudal de gas	22
Tabla 3.12 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas para los propanoles y los butanoles al 0,1% v/v en función del caudal de gas	22
Tabla 3.13 Altura máxima de la espuma (H) en mezclas no acuosas con n-Propanol y n-Octanol a diferentes temperaturas en función del caudal de gas.....	23
Tabla 3.14 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con diferentes alcoholes al 0,1% en función del tiempo	24
Tabla 3.15 Valores adimensionales de la altura de las espumas con diferentes alcoholes en sistemas no acuosos.....	24
Tabla 3.16 Altura máxima de la espuma (H) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes concentraciones en función del caudal de gas.....	25
Tabla 3.17 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes concentraciones en función del tiempo	26
Tabla 3.18 Valores adimensionales de la altura de espumas con diferentes concentraciones de cuarzo en sistemas no acuosos.	26
Tabla 3.19 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes temperaturas en función del caudal de gas	27

Tabla 3.20	Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas con 0,10% de cuarzo a diferentes temperaturas en función del tiempo.....	27
Tabla 3.21	Valores adimensionales de la temperatura en sistemas no acuosos con 0,1% de cuarzo	28
Tabla 3.22	Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas con asfaltenos a diferentes concentraciones en función del caudal de gas	28
Tabla 3.23	Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con asfaltenos a diferentes concentraciones en función del tiempo.	29
Tabla 3.24	Valores adimensionales de la concentración de asfaltenos en sistemas no acuosos	29
Tabla 3.25	Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas con 0,08% de asfaltenos a diferentes temperaturas en función del caudal de gas.....	30
Tabla 3.26	Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con 0,08% de asfaltenos a diferentes temperaturas en función del tiempo.....	30
Tabla 3.27	Valores adimensionales de la altura de espuma en sistemas no acuosos con 0,08% de asfaltenos	30
Tabla 3.28	Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con arena a al 0 y 0,001% en función del flujo de gas	31
Tabla 3.29	Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con arena al 0 y 0,08% en función del tiempo.	31
Tabla 4.1	Espumabilidad y tiempo medio de las espumas en función de la concentración del alcohol.	45
Tabla 4.2	Comparación de los valores de constante de decaimiento reportados con los de otros autores.....	46
Tabla 4.3	Espumabilidad y tiempo medio de las espumas acuosas e función de la concentración de cuarzo	49
Tabla 4.4	Espumabilidad y tiempo medio de las espumas acuosas en función de la concentración de asfaltenos	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Efecto Gibbs (a) y efecto Marangoni (b).	5
Figura 2.2 Método estático de Ross-Miles	1
Figura 2.3 Método dinámico de Bikerman.	8
Figura 2.4 Curva de estabilidad típica de espumas.	9
Figura 2.5 Etapas de colapso de una espuma en el método mixto.	1
Figura 2.6 Método de la variación de presión de Nishioka y Ross.	1
Figura 2.7 Orientación de las moléculas de surfactante en la interfase aire-hidrocarburo.	11
Figura 2.8 Esquemas de los surfactantes: a-SPAN 20; b-SPAN 80 y c-TWEEN 20.	12
Figura 3.1 Equipo de espumeo utilizado para realizar las mediciones de espumabilidad y estabilidad.	13
Figura 3.2 Fotografía de detalle de la parte baja de la columna: a) sistema con tela, b) sistema con inyección por la parte superior de la columna.	14
Figura 3.3 Detalle de la inyección del gas por medio de un difusor y (b) esquema del montaje análogo por la norma ASTM D982.	14
Figura 3.4 Detalle de la columna de espumeo y dimensiones del difusor.	15
Figura 3.5 Muestra del líquido a espumar en la columna.	16
Figura 3.6 Altura máxima de la espuma y tiempo de vida media para la mezcla no acuosa.	18
Figura 3.7 Valores de tensión superficial de los alcoholes puros.	23
Figura 4.1 Equipo usado para la evaluación de espumas no acuosas.	32
Figura 4.2 Altura máxima de la espuma (H_0) con diferentes surfactantes al 0,1 % v/v en función del caudal de gas.	33
Figura 4.3 Altura de la espuma (H) para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo.	34
Figura 4.4 Relación H/H_0 en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo.	35
Figura 4.5 Relación H/H_0 en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función de $\text{Log}(t/t_{1/2})$.	35
Figura 4.6 Altura máxima de la espuma (H) para distintas concentraciones SPAN 80 (30°C).	36
Figura 4.7 Colapso de las espumas de las mezclas para distintas concentraciones de SPAN 80.	37
Figura 4.8 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas fracciones de aceite de motor PDV SAE función del caudal de gas.	38
Figura 4.9 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas fracciones de aceite de motor PDV SAE en función del tiempo.	39
Figura 4.10 Tensión superficial en mezclas de aceite en kerosén en función de la fracción de aceite.	40
Figura 4.11 Tensión superficial en mezclas 20% de aceite en kerosén en función de la concentración del surfactante SPAN 80.	41

Figura 4.12 Viscosidad cinemática de diferentes mezclas aceite-kerosén en función de la temperatura.....	42
Figura 4.13 Altura de la espuma (H) para distintas temperaturas en función del tiempo	42
Figura 4.14 Altura máxima de la espuma (H ₀) para distintos alcoholes al 0,1% v/v en función del caudal de gas.....	43
Figura 4.15 Altura de la espuma (H) con diferentes alcoholes al 0,1% en función del tiempo	44
Figura 4.16 H/H ₀ vs. Log(t/t _{1/2}) para diferentes alcoholes al 0,1%	45
Figura 4.17 Efecto de la posición del grupo OH en el butanol en el colapso de espumas no acuosas en función del caudal de gas	46
Figura 4.18 Efecto de la posición del grupo OH en el propanol en el colapso de espumas no acuosas en función del caudal de gas	47
Figura 4.19 Altura de la espuma (H) a diferentes temperaturas en el colapso de espumas no acuosas con 0,1% de n-propanol y con 0,1% de n-octanol	47
Figura 4.20 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con diferentes concentraciones de cuarzo en función del caudal de gas	48
Figura 4.21 Efecto de la concentración de cuarzo en el colapso de espumas no acuosas	49
Figura 4.22 Estructuras moleculares de los asfaltenos.....	50
Figura 4.23 Efecto de los asfaltenos en la formación de espumas no acuosas en función del caudal de gas	51
Figura 4.24 Altura de la espuma (H) a diferentes concentraciones de asfaltenos en función del tiempo	51
Figura 4.25 Efecto de la concentración de asfaltenos en espumas no acuosas como H/H ₀ vs. Log(t/t _{1/2})	52
Figura 4.26 Altura de la espuma (H) a distintas temperaturas en función del tiempo	53
Figura 4.27 Efecto de la presencia de arena en el colapso de espumas no acuosas	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Las espumas son sistemas bifásicos en las cuales un gas está disperso en un medio continuo líquido y la relación gas/líquido es suficientemente alta (generalmente mayor a 90%). El gas disperso está atrapado en celdas denominadas burbujas, las cuales pueden ser esféricas o poliédricas según la relación volumétrica entre ambas fases [1]. La espuma es un sistema termodinámicamente no estable, ya que su formación implica un aumento de área interfacial, por lo que tiene un tiempo de vida finito. La determinación de ese tiempo de vida (llamado persistencia), así como la espumabilidad es crucial para algunos aspectos prácticos [2]. Por ejemplo, una espuma es indeseable en una torre de destilación, ya que su volumen provoca inundación y perturbaciones en el sistema de control. No obstante, en otros sistemas, la aparición deliberada de espumas y su persistencia son esenciales, como en el caso de la elaboración de productos de cuidado personal (espumas de afeitar) y sistemas contra incendio.

La comprensión de estos sistemas y de los factores que los afectan, tanto para inducir su formación como para impedirlos o romperlos, es absolutamente necesaria. De hecho, es mucho lo que se ha adelantado al respecto. Desde aspectos muy teóricos, pero poco prácticos [3], hasta aspectos esencialmente empíricos con aplicación práctica y de uso limitado. [4]

Sin embargo, la mayoría de los adelantos en investigación respecto a espumas se refieren a sistemas acuosos, es decir, con fase líquida a base de agua, aduciendo que para sistemas no acuosos, los fenómenos encontrados son los mismos [1]. Esto es cierto para varias de sus propiedades. No obstante, dado que la aparición de la espuma se debe a la presencia de material con propiedades interfaciales (como surfactantes), es evidente que deben existir diferencias. En el caso de las espumas acuosas, una molécula anfifílica puede ubicarse en la interfase y es muy fácil de comprender ese comportamiento ya que parte de la molécula es hidrófila (le gusta el agua) y la otra parte es hidrófoba (no le gusta el agua) y por tanto prefiere la fase gaseosa. Pero, en el caso de las espumas no acuosas, esta preferencia no es tan evidente, visto desde ese punto de vista. Entonces, es preciso entender lo que ocurre a nivel de interfase para explicar su comportamiento macroscópico.

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de espumas no acuosas por medio de un análisis de la espumabilidad, comportamiento y estabilidad de las espumas, usando un equipo basado en el método dinámico de Bikerman con modificaciones que permitió el control de temperatura, caudal de gas y su dispersión en el líquido a espumar. De igual forma, se evaluó el efecto de las variables de formulación como el balance hidrofílico/lipofílico o HLB (del inglés *Hidrofílic/Lipofílic Balance*), concentración y tipo de alcohol y el efecto antiespumante de partículas sólidas. Se encontró, una explicación teórica-racional a los fenómenos observados.

Por otra parte, la realización de este trabajo es parte de la nueva línea de investigación en fenómenos interfaciales y sistemas dispersos desarrollada por el laboratorio de sistemas dispersos y ambiente, SDA, del departamento de Ingeniería Química. Su aplicación está relacionada con la solución a un problema particular de la industria petrolera presentado por la formación de espuma en los sistemas de extracción y producción de petróleo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de las variables hidráulicas y de formulación en la espumabilidad y estabilidad de soluciones no acuosas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema para la medición de las etapas de vida de espumas no acuosas (formación y colapso), con control de temperatura, flujo y dispersión de gas.
2. Preparar espumas no acuosas a diferentes condiciones de flujo, variando la temperatura, naturaleza del aceite e hidrofiliidad del surfactante.
3. Evaluar la acción antiespumante de alcoholes y de sólidos.

CAPITULO 2

ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Antecedentes

Uno de los primeros trabajos sobre espumas en sistemas no acuosos fue el realizado por Ross [5], donde describió el efecto de variables relevantes en la estabilidad de la espuma de algunos crudos espumosos, como la velocidad de agitación y el volumen de la muestra. Observó que la espumabilidad y la estabilidad de los crudos eran fenómenos que se podrían tratar de manera “aislada” y que la espumabilidad dependía del método de formación de la espuma. Además, asoció tales parámetros a propiedades del líquido como la densidad y la viscosidad.

Iglesias y colaboradores [2] propusieron un método práctico, basado en el método dinámico de Bikerman, que permite estimar factores representativos de la espumabilidad y de la estabilidad. Tal método, establece que la relación de la altura de una espuma a su altura original (H/H_0) es una función lineal del logaritmo de la relación tiempo/tiempo medio ($t/t_{1/2}$). Posteriormente, Turner y colaboradores [4] desarrollaron un modelo para tal comportamiento, considerando la altura del líquido espumoso dentro de la ecuación. A pesar de ello, este método no ha sido aún explotado del todo y no se han hecho estudios extensos con sistemas no acuosos.

Schmidt [6] describió de manera más general los factores involucrados en la espumabilidad y estabilidad de sistemas no acuosos. Estableció que la espumabilidad no puede relacionarse con la disminución de la tensión interfacial, tal como en los sistemas acuosos. Por el contrario, está más relacionada con la viscosidad del líquido, o en todo caso con la viscosidad superficial.

Por otra parte, Bhakta y Ruckestein [3] trataron aspectos más teóricos, estableciendo modelos matemáticos para el drenaje, coalescencia y colapso, como un intento de simular cualquier sistema de espumas acuosas; previa determinación experimental de algunos parámetros claves. Relacionaron la estabilidad de las espumas con la magnitud relativa de presión capilar y presión de disyunción. Estos modelos predicen el comportamiento de espumas, lo cual es importante para algunas aplicaciones donde se forma intencionalmente la espuma o donde éstas son indeseables.

Otro aspecto importante de mencionar es el mecanismo de ruptura de una espuma. Denkov y colaboradores [7] estudiaron el efecto de gotas de aceites y partículas de diferentes naturalezas, y concluyeron que la ruptura de la película se debe a un proceso que ocurre en tres etapas, una de las cuales es la inserción de las gotas de aceite (o las partículas) a manera de puente y su eventual estiramiento en la superficie. También observaron que este fenómeno está influenciado por partículas adheridas a la superficie de dichas gotas. Lo anterior depende de algunos factores como el tamaño y distribución de gotas de aceite y de las partículas.

Zaki y colaboradores [8] realizaron un estudio sobre el efecto de la cantidad de asfaltenos y resinas, de la aromaticidad y de la viscosidad en el comportamiento de las espumas de crudos modelos a base de aceite mineral y tolueno. Demostraron que la espumabilidad y la estabilidad de las espumas de crudos están vinculadas con la concentración de resinas, de asfaltenos y con la relación entre éstas.

Belandria [9] estudió el efecto de diferentes partículas (sólidos finos como arcilla y arena de granulometría variable) en la espumabilidad y estabilidad de sistemas no acuosos con la intención de comprender el mecanismo de producción de crudos extrapesados por espumeo (en inglés *foamy solution gas drive*). Sin embargo, recomendó realizar nuevos trabajos orientados bajo los mismos lineamientos de investigación, pero con un estudio en forma factorial y sistemática de la influencia que todas las variables manejadas puedan tener sobre la espumabilidad y estabilidad de las espumas de aceites.

Anderez [10] estudió la influencia de surfactantes de diferentes estructuras moleculares y a varias concentraciones. En general, encontró que el surfactante que produjo mejor espumabilidad y mayor estabilidad de las espumas no acuosas, en todo el rango de concentración estudiado, fue el SPAN-20 (Monolaurato de Sorbitán) de HLB 8,6. Además, observó que este surfactante fue el único que disminuyó la tensión superficial de la parafina. También encontró que de los surfactantes de tipo no iónicos etoxilados (EO), el que produjo mejor espumabilidad y estabilidad fue el NFE-2,3 (nonil fenol 2,3 EO de HLB 6,3) y que la presencia de pequeñas cantidades de agua incrementó la espumabilidad y estabilidad de los sistemas de parafina.

Más recientemente, Alcalá [11] realizó pruebas sobre el efecto antiespumante de algunos productos en muestras de crudo, usando un equipo similar al usado en el presente trabajo. Entre otras cosas, mostró el efecto antiespumante del SPAN 20 y de los aceites de siliconas, a ciertas condiciones para los crudos estudiados.

2.2 Espumas

En el sentido más general, una espuma es una dispersión de un gas en una cantidad relativamente pequeña de líquido (o sólido). La fase gaseosa (fase dispersa) se esparce a lo largo de toda la fase líquida (fase continua) de manera que las burbujas de gas quedan separadas por finas películas de líquido llamadas *lamelas*, cuya estabilidad determina la estabilidad global de la espuma; además contienen agentes estabilizantes, por lo general surfactantes, llamados agentes espumantes. La concentración de la fase dispersa debe ser elevada (alrededor de 95% de gas), y también es llamada “calidad de la espuma”. Como en las emulsiones, el término “estabilidad” no es del todo correcto ya que las espumas son termodinámicamente inestables, por lo que en algún momento colapsan; es por eso que algunos autores prefieren hablar de “persistencia” [1]. Sin embargo, en este trabajo se habla de estabilidad para seguir con la nomenclatura más frecuentemente usada.

2.2.1 Formación de las espumas

La formación de una espuma se logra por introducción mecánica de un gas en un líquido; por ejemplo, inyectando gas debajo de la superficie del líquido, agitando el líquido, o por oclusión de un líquido que cae sobre otro, por generación química de gas en el líquido, o por desorción, es decir, por la liberación espontánea de un gas disuelto en el líquido durante un proceso de descompresión espontánea.

En todos estos casos se forman burbujas en el líquido y éstas suben hasta la superficie a una velocidad que depende de su tamaño, de la viscosidad del líquido y de la diferencia de densidades entre el líquido y el gas. La espuma se forma al acumularse las burbujas sin romperse, por lo cual es preciso que la velocidad de formación de las burbujas sea mayor a la

velocidad de colapso de las mismas. Además, se requiere la presencia de un surfactante que actúe como agente espumante y que se ubique en la interfase gas-líquido, provocando una disminución en la tensión superficial del líquido a espumar. El surfactante debe producir películas elásticas entre las burbujas de gas para la formación de una espuma persistente. Este aspecto está relacionado con el efecto combinado Gibbs-Marangoni. [1]

2.2.2 Efecto Gibbs-Marangoni

Como se mencionó, la presencia de surfactantes en la superficie de las burbujas está relacionada con dos efectos bien definidos. Cuando se estira la película líquida interburbuja, disminuye la concentración superficial de surfactante presente (Γ), haciendo que la tensión superficial aumente; esto ocasiona un diferencial de presión entre la película delgada y la interfase. Este gradiente de presión logra que el líquido se dirija hacia la película que se adelgaza, haciendo que se vuelva a engrosar y evitando su ruptura. A este fenómeno se le conoce como efecto Gibbs. Esto produce un desequilibrio que ocasiona una migración de moléculas surfactantes (desde las micelas) hacia la superficie de la burbuja de gas, lo que se conoce como efecto Marangoni; el cual sólo tiene importancia relevante en soluciones diluidas y en un cierto margen de concentraciones. Si la solución es muy diluida, la tensión superficial es muy similar a la del solvente puro, entonces la diferencia entre la tensión superficial del solvente puro y de equilibrio de la solución es pequeña. Esto permite que la espuma pueda resistir las interacciones térmicas y mecánicas a las que se someta [1]. Ambos efectos, combinados, proporcionan el mecanismo que permite la estabilización de las espumas, los cuales se muestran en la figura 2.1.

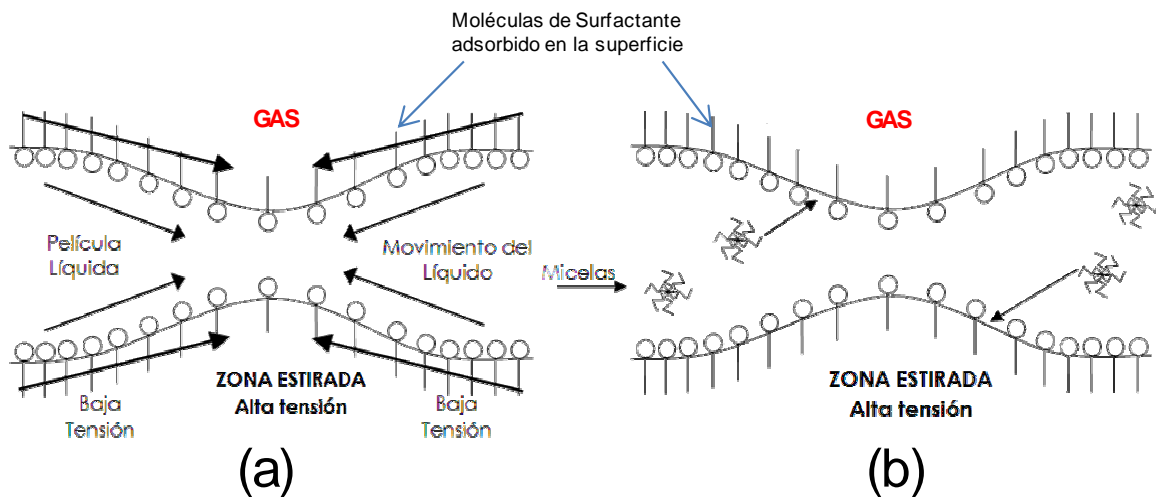


Figura 2.1 Efecto Gibbs (a) y efecto Marangoni (b). [1]

2.2.3 Mecanismos de colapso de las espumas

El decaimiento de una espuma al transcurrir el tiempo depende de su estructura, que puede ser de dos tipos: espumas esféricas, que poseen una alta fracción de líquido; y espumas

poliédricas, que poseen muy baja fracción de líquido y en las que las burbujas están separadas por películas de líquido planas.

La desintegración de las burbujas esféricas se debe esencialmente al drenaje gravitacional, a la difusión de gas entre burbujas y a la evaporación de las películas. La pérdida de líquido convierte a la espuma inicialmente esférica, en una espuma poliédrica y su desintegración ocurre entonces por succión capilar y rompimiento de películas [1, 3].

2.2.4 Espumabilidad y estabilidad de las espumas

La persistencia de una espuma está íntimamente ligada a dos conceptos que corresponden a la etapa de su formación (espumabilidad) y a la etapa de decaimiento o colapso (estabilidad).

2.2.4.1 Espumabilidad

Es la medida del máximo volumen de espuma producido al aplicar una cantidad de trabajo sobre la solución de surfactante, el cual depende de la tensión superficial de la solución; al parecer mientras menor es la tensión, mayor es el volumen de espuma obtenido en sistemas que emplean el mismo mecanismo de agitación [1].

Se puede decir entonces que la espumabilidad es la cantidad relativa de espuma producida y se basa en la medición de la altura máxima que alcanza la espuma en una columna. Corresponde a la etapa de formación de la espuma, en la cual las burbujas se acumulan y desplazan unas respecto a otras. Durante esta etapa inicial (que puede durar poco si se trata de un líquido de baja viscosidad), es el efecto de elasticidad Gibbs-Marangoni el que asegura la estabilidad y persistencia de la película interburbuja, y por lo tanto la existencia misma de la espuma (acuosa).

2.2.4.2 Estabilidad

La estabilidad de una espuma es el tiempo requerido para que ésta colapse completamente después de que cesa el flujo de gas, es decir, luego de retirar el mecanismo que ocasiona la formación de las burbujas.

Se refiere al envejecimiento de la espuma, durante el cual ocurren una serie de mecanismos de decaimiento de la espuma ya formada. Corresponde entonces a la persistencia de la espuma en el tiempo. La estabilidad depende de los fenómenos de decaimiento de la espuma y colapso de burbujas, y es la medida del tiempo en la cual la espuma persiste y de la velocidad con que disminuye su altura. [2]

Ya que las espumas poseen gran área interfacial, no son termodinámicamente estables, aunque se conoce que algunas existen en ausencia de perturbaciones externas, por largos períodos de tiempo y se denominan “espumas metaestables”. Las espumas no acuosas, como por ejemplo, las espumas de crudos, no muestran tendencia a formar estados metaestables sino que coalescen completamente (no necesariamente en forma rápida) al cesar el mecanismo que promueve la acción espumante (por ejemplo, inyección de gas). [2]

La espumabilidad y estabilidad de las espumas formadas a partir de soluciones acuosas dependen de varios factores: [1]

- Velocidad de adsorción del surfactante en la interface gas/líquido.
- Reología de la capa adsorbida.
- Difusión gaseosa entre burbujas.
- Tamaño de las burbujas.
- Tensión superficial.
- Viscosidad del líquido a espumar.
- Presencia de electrolitos.
- Condiciones de temperatura y presión

2.2.5 Medición de espumabilidad y estabilidad de espumas

Se han desarrollado varios métodos para la determinación de la estabilidad de las espumas a fin de resolver problemas específicos encontrados en la práctica. En todos ellos se crea deliberadamente una espuma y se mide, generalmente, la altura de la espuma formada y su evolución en el tiempo. Estos métodos pueden clasificarse en dos tipos: dinámicos y estáticos. Los métodos dinámicos se basan en la consecución de un equilibrio entre la formación y el colapso de la espuma. En los métodos estáticos la velocidad de formación es cero; una vez formada la espuma se estudia el colapso sin regeneración de la misma. Los primeros son aplicables a espumas evanescentes o de corto periodo de vida, mientras que los métodos estáticos son aplicables a espumas de alta estabilidad. A continuación se detallan los más importantes.

2.2.5.1 Método estático de Ross-Miles

En este método se deja caer el líquido espumante en un cilindro graduado que contiene una cierta cantidad del mismo líquido, como se muestra en la figura 2.2. Se mide la altura de la espuma formada y se observa su variación con respecto al tiempo. La altura de la espuma es una medida de la espumabilidad, y el tiempo que tarda en desaparecer es una medida de la estabilidad.

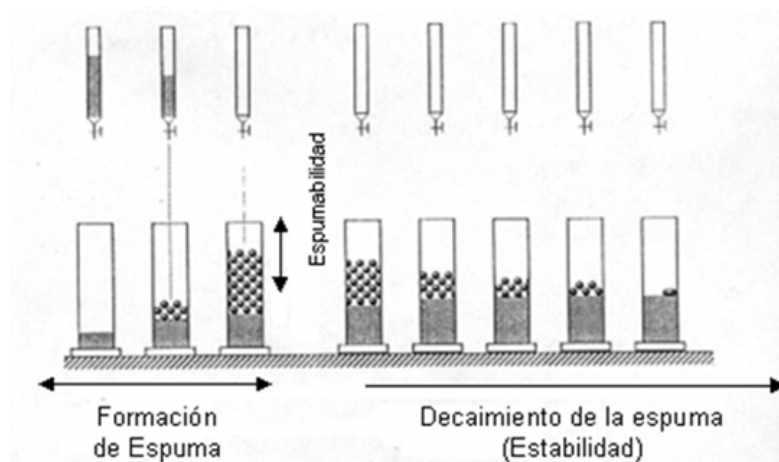


Figura 2.2 Método estático de Ross-Miles [1]

La espuma formada por este método es muy húmeda, por lo que inicialmente se produce abundante drenaje de líquido, y en consecuencia es necesario que transcurra un tiempo antes de que comience el colapso de la espuma.

Al transcurrir el tiempo, el líquido se desplaza hacia abajo por drenaje gravitacional; la parte superior de la espuma pierde líquido, por lo que toma una consistencia más seca. Posteriormente, la espuma localizada en la parte superior de la columna, comienza a colapsar y el proceso de decaimiento se produce de manera continua a partir de ese momento. La duración de este proceso indica la persistencia de la espuma. [5]

2.2.5.2 Método Dinámico de Bikerman

Este método consiste en alcanzar un equilibrio dinámico entre la formación y el decaimiento de una espuma ubicada en una columna cilíndrica, [1], como se muestra en la figura 2.3.

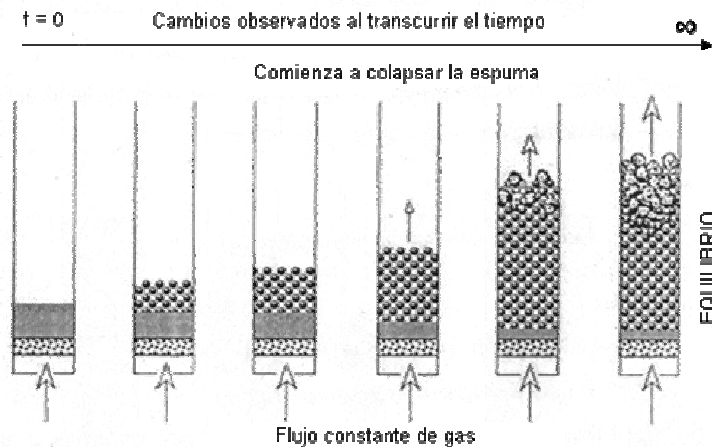


Figura 2.3 Método dinámico de Bikerman. [1]

En la parte inferior de la columna se coloca un vidrio sinterizado (u otro medio que permita la dispersión del gas), cuya función es generar las burbujas, luego se adiciona un cierto volumen de la solución a espumar y al fluir el gas, las burbujas quedan atrapadas en el líquido dando lugar a la formación de la espuma. Una vez formada, flota sobre el líquido y se acumula, formándose una columna alimentada por burbujas de gas provenientes del fondo del equipo. En la parte superior del mismo se produce el decaimiento de la espuma en forma más o menos rápida.

El sistema alcanza el equilibrio dinámico de Bikerman cuando la velocidad de generación de espuma iguala a su velocidad de decaimiento, y la espuma permanece constante. La altura de la espuma en el equilibrio depende tanto de la espumabilidad como de la estabilidad.

La proporción de volumen de espuma generado por un caudal de gas constante se denomina índice de espumabilidad [2, 3] y se define como:

$$\text{Índice de espumabilidad} = \frac{\text{Volumen de Espuma}}{\text{Flujo de gas}} \quad (\text{Ec.1})$$

Está expresado en unidades de tiempo y mide la tendencia de un líquido a formar espuma.

Una forma de medir la estabilidad de las espumas es graficando una curva de colapso (figura 2.4) en la que se observa el decaimiento de la espuma en el tiempo, y donde se determina el tiempo de vida media de la espuma por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de vida media} = \int \frac{H(t)}{H(0)} dt \quad (\text{Ec. 2})$$

$H(0)$: altura inicial de la espuma.

$H(t)$: altura de la espuma en un tiempo t .

t : tiempo.

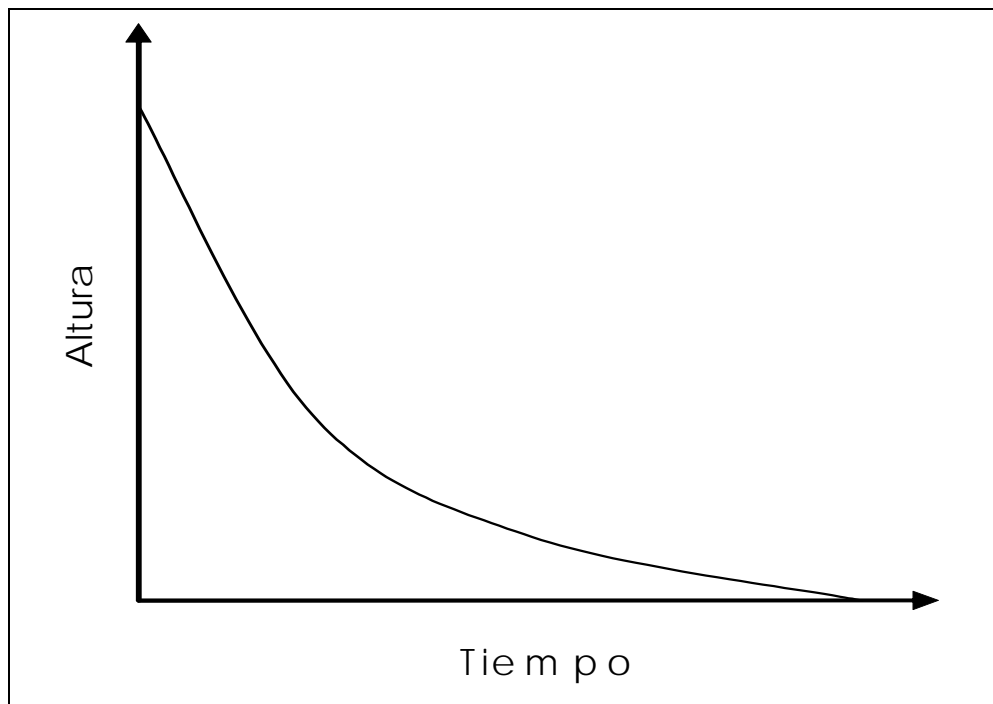


Figura 2.4 Curva de estabilidad típica de espumas.

2.2.5.3 Método mixto

En el método dinámico se obtiene una espuma cuyas características varían desde una espuma recién formada en el fondo de la columna, hasta una espuma cerca del colapso en la parte superior de la columna, figura 2.5. El estado de equilibrio alcanzado por medio de este método es aparentemente el punto óptimo de partida para medir la estabilidad de una espuma.

En el método mixto, propuesto por investigadores del Laboratorio FIRP [2] se emplea el método dinámico de Bikerman hasta alcanzar el equilibrio, luego se cierra la alimentación de gas y se mide la variación de la altura de la espuma con el tiempo mediante el método de Ross-Miles.

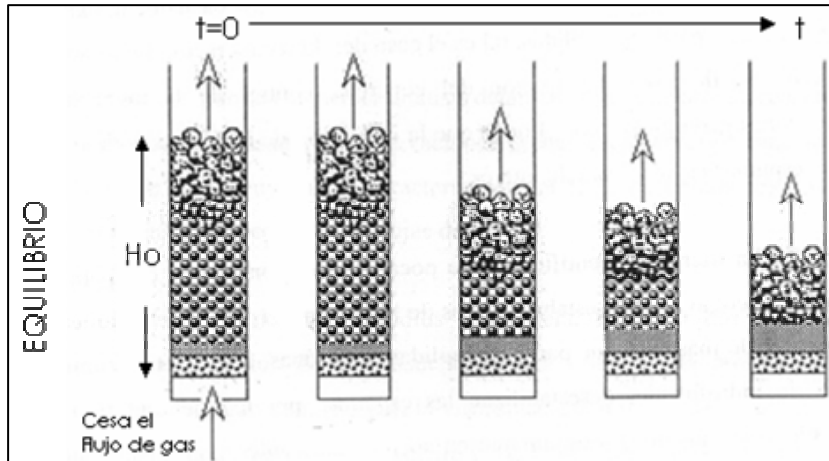


Figura 2.5 Etapas de colapso de una espuma en el método mixto. [1]

2.2.5.4 Método de Nishioka y Ross

Este método, desarrollado por Nishioka y Ross [2], se basa en la variación de presión según la ley de Laplace y mide en un espacio cerrado la diferencia de presión ocasionada por la ruptura de las burbujas que se rompen en la superficie de la espuma, incrementando la presión dentro del recipiente cerrado que la contiene.

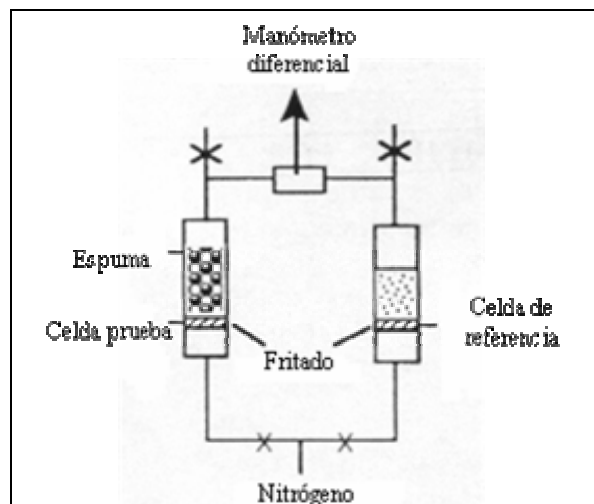


Figura 2.6 Método de la variación de presión de Nishioka y Ross. [2]

El aumento de presión está relacionado con el diámetro de las burbujas que se rompen, lo cual permitiría estimar el área superficial de la espuma, aportando un dato esencial para el manejo de la ecuación de estado. En la práctica, se emplea el aparato mostrado en la figura 2.6, en el cual se mide la diferencia de presión entre el gas ubicado por encima de la espuma, y el gas ubicado en una celda de referencia. Aunque en teoría el método es correcto, en la práctica es poco útil por la necesidad de un control riguroso de la temperatura.

2.2.6 Estabilización de espumas no acuosas con surfactantes

Las teorías sobre la estabilidad de espumas están fundamentalmente desarrolladas para explicar el comportamiento de espumas acuosas [1, 6]. El agua es un compuesto único ya que los puentes de hidrógeno hacen que un líquido de baja viscosidad posea una alta tensión superficial y elevado punto de ebullición, y la adición de surfactantes disminuye la tensión superficial. Por otra parte, la tensión superficial de los solventes no acuosos es relativamente baja, y se hace difícil reducirla aún más por medio de la adición de surfactantes.

Además, los medios acuosos son polares por lo que el surfactante se adsorbe por la parte hidrofílica (polar) a la película de agua y por la parte hidrófoba a la burbuja de aire, estabilizando la espuma por medio del efecto Gibbs-Marangoni. Sin embargo, en el caso de las espumas no acuosas, la fase líquida por lo general es apolar, así que la adsorción del surfactante entre las fases resulta incierta, lo que conduce a suponer que el efecto Gibbs-Marangoni no es el principal responsable de la estabilización de las espumas no acuosas.

Un surfactante soluble en un hidrocarburo no se adsorbe fuertemente en la interfase aire-hidrocarburo debido a que la tensión superficial del aceite es tan baja como la del surfactante y ésta no podría reducirla aún más, por lo que se cree que el surfactante se introduce en la película líquida como se muestra en la figura 2.7.

Existe evidencia de que la estabilización de las espumas no acuosas se debe a otros mecanismos, como por ejemplo el incremento en la viscosidad interfacial o plasticidad en la interfase gas-líquido. [6, 12]

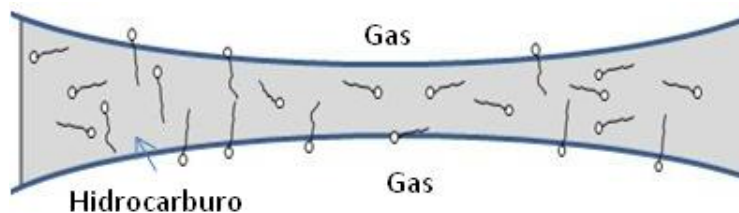


Figura 2.7 Orientación de las moléculas de surfactante en la interfase aire-hidrocarburo.

Sin embargo, se ha observado que algunos solutos como por ejemplo los polialquilfluorosiloxanos y los perfluoroalquilos, disminuyen considerablemente la tensión superficial del líquido no acuoso, incrementando la estabilidad de las espumas formadas a partir de este tipo de líquidos. En estos casos el efecto Marangoni cobra importancia debido a la disminución de la tensión superficial. [6]

Entre los surfactantes más usados para la producción de espumas, están los derivados del Sorbitán, entre ellos: SPAN 20 (8,6), SPAN 80 (4,3) y TWEEN 20 (16,7). La figura 2.8 muestra esquemas de éstos. Estas estructuras son promedios ya que los productos comerciales son mezclas complejas del mismo. En cualquier caso, puede relacionarse la hidrofiliidad de cada uno con la cantidad y distribución de átomos de oxígeno (en rojo) capaces de crear puentes de hidrógeno y por tanto asociarse con el agua. Por el contrario, las ramificaciones (átomos de carbono en gris) pueden, en este caso, relacionarse con la lipofilidad del mismo. Es entonces evidente que el más hidrofílico es el TWEEN 20 (Monooleato de Sorbitán etoxilado) y así lo sugiere su HLB de 16,7, por ello no se espera que actúe como buen formador de espuma. Es posible que el TWEEN 20 genere micelas en el seno del aceite y su movilidad en el mismo sea pobre.

Los SPAN se diferencian en la longitud de la cadena lipofílica. Nótese que el SPAN 80 (Monooleato de Sorbitán) es de cadena más larga que el SPAN 20 (Monolaurato de Sorbitán). Esto sugiere que una vez ubicado en la interface, la cohesión entre las cadenas de la molécula es mayor que en el caso del SPAN 20.

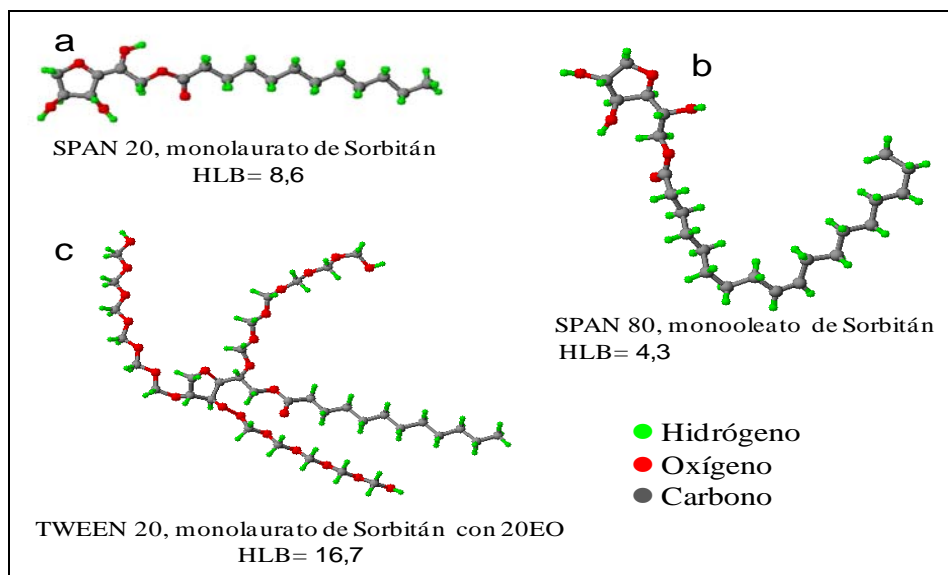


Figura 2.8 Esquemas de los surfactantes: a-SPAN 20; b-SPAN 80 y c-TWEEN 20.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Diseño de un sistema para la medición de las etapas de vida de espumas no acuosas (formación y colapso), con control de temperatura, flujo y dispersión de gas

Se diseñó y construyó un sistema de producción de espumas, basado en trabajos similares [9, 10]. El dispositivo permitió controlar la temperatura del líquido a espumar y el flujo del gas usado. Se utilizó nitrógeno como gas de formación, por similitud con los trabajos de referencia y la norma ASTM D892 [13]. El montaje final del sistema se muestra en la figura 3.1.

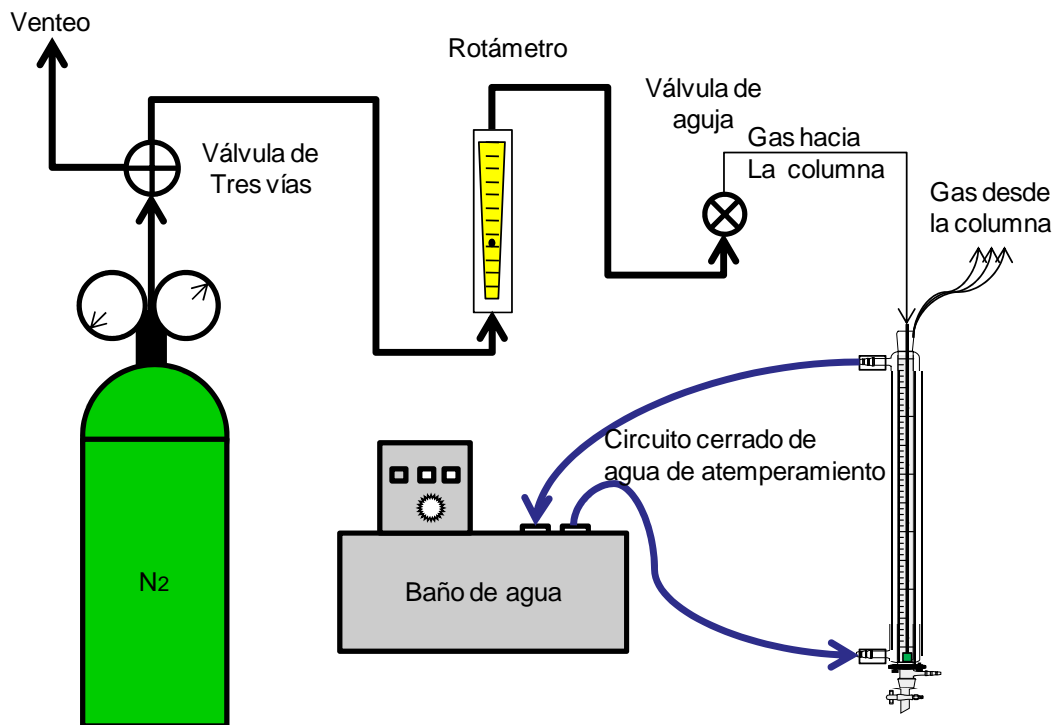


Figura 3.1 Equipo de espumeo utilizado para realizar las mediciones de espumabilidad y estabilidad.

Se realizaron algunas pruebas preliminares usando telas impermeables como dispersores del gas en el fondo de la columna. La característica principal de estas telas es que impiden el descenso del fluido a estudiar, pero permiten el flujo ascendente del gas. Evidentemente, este fenómeno es controlado por la porosidad del material. Sin embargo, esa misma porosidad hace que sea susceptible de modificación por el entrapamiento de partículas sólidas, lo que eventualmente varió la distribución de tamaño de poros. En general, se puede decir que sus propiedades se modificaron con el tiempo. Esto es particularmente importante para sistemas no limpios, como en el caso de crudos o aceites con partículas sólidas.



Figura 3.2 Fotografía de detalle de la parte baja de la columna: a) sistema con tela, b) sistema con inyección por la parte superior de la columna.

Una alternativa ensayada fue el uso de telas con las propiedades citadas, De hecho, se consiguió que con tela tipo *lona impermeable* se produjeran espumas con tamaño de burbujas aceptable, pero no homogéneo, lo cual no permitió un frente de espuma regular tal como muestra la figura 3.2-(a), lo que obviamente dificultaba la toma de datos. En todo caso, el efecto es puramente mecánico. El otro inconveniente es que resulta impráctico para los sistemas de menor viscosidad (bajas fracciones de aceite, altas temperatura, etc.) ya que ocurría drenaje del fluido de prueba, inundando la parte baja de la columna, con todas las complicaciones asociadas (disminución del nivel y, por tanto, pérdida del fluido de prueba, ensuciamiento del sitio de trabajo, etc.).

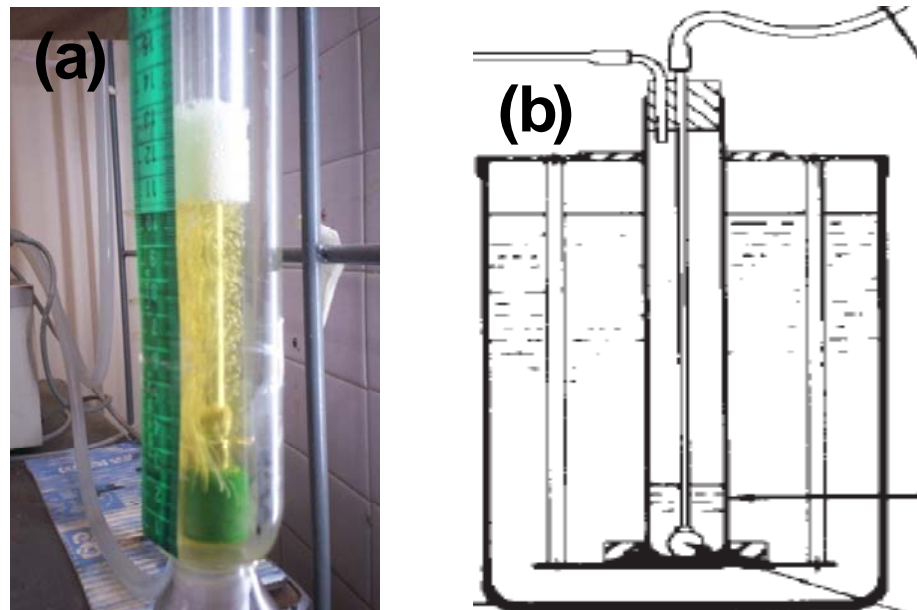


Figura 3.3 Detalle de la inyección del gas por medio de un difusor y (b) esquema del montaje análogo por la norma ASTM D982. [13]

Finalmente, se ensayó con éxito la inyección del gas por la parte superior de la columna, método usado en trabajos previos, [10, 11] . Evidentemente este arreglo tiene las mismas desventajas descritas como ventajas para el arreglo previamente descrito. El propio sistema de inyección del gas (varilla y difusor) obstaculiza y por tanto influye en la formación y colapso de la espuma. En este caso, como se utilizó como difusores piedras para peceras, la porosidad de las mismas no produjo espumas con la misma calidad (tamaño y distribución de poros). La figura 3.3 muestra el detalle de fondo y el esquema análogo en la norma ASTM D892. En cuanto al efecto del fluido a evaluar en el difusor, también se observó desgaste mecánico y térmico. De hecho, la selección del tipo de difusor es determinante en la calidad de la dispersión y de la espuma formada.

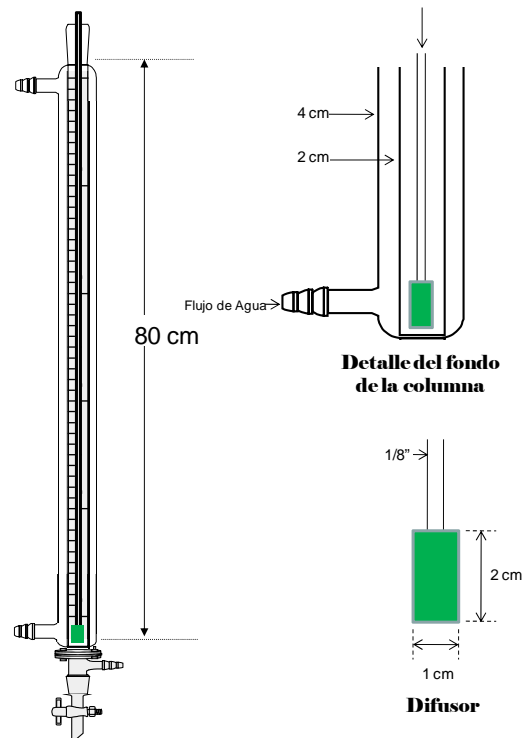


Figura 3.4 Detalle de la columna de espumeo y dimensiones del difusor.

La figura 3.4 muestra un esquema de la columna construida cuya altura efectiva es de 80 cm, más alta que las columnas de referencia [9-11], incluso que el cilindro de espumeo descrito para la norma ASTM D982 (36 cm), lo cual es conveniente y necesario en este caso por los flujos relativamente altos ensayados. Se muestran, además, detalles dimensionales del difusor usado para la inyección del gas. Por efectos prácticos, se usó un difusor de aire para peceras. Este arreglo permitió que la altura del líquido a espumar fuese de 10 cm y un volumen de unos 30 mL de la muestra. Además de la columna ya descrita, los otros elementos usados en el sistema, fueron los siguientes:

- Baño termostático con controlador de temperatura marca Julabo, modelo VLF20, el cual fue utilizado para atemperar la muestra en la columna a las temperaturas de trabajo preestablecidas (30, 50 y 70°C), con una capacidad de bombeo de 15 litros por minutos. La columna fue encamisada con un tubo de 4 cm de diámetro.

- Rotámetro marca Cole-Palmer de flujo máximo 800 mL/min de aire, con flotador de acero inoxidable.
- Válvula de aguja de acero inoxidable marca Cole-Palmer de flujo máximo de hasta 400 mL/min de aire, de 16 vueltas, con orificio de 0,042”.
- En la zona de alta presión se usó manguera de Polyflow de ¼” y en la zona de baja presión se usó manguera de poliuretano del mismo calibre.

Para el estudio de la espumabilidad (altura de la espuma en el equilibrio) y de la estabilidad (tiempo que ésta tarda en colapsar), se utilizó una variante del método mixto. Se produjo la espuma inyectando un flujo del gas en el seno del líquido permitiendo que la espuma creciera hasta alcanzar una altura constante, la cual se tomó como la espumabilidad. Eventualmente, se eliminó el caudal de gas y se tomaron lecturas del tiempo (usando un cronómetro) y de la altura de la espuma hasta que desapareciera la última burbuja.

En todos los casos, se colocó en la columna una cantidad del líquido a espumar cuya altura alcanzó los 10 cm. Este volumen fue fijado en las pruebas preliminares, de manera que la espuma cubriera el difusor y la espuma producida no excediera la capacidad de la columna, como se muestra en la figura 3.5.

3.2 Preparación de espumas no acuosas a diferentes condiciones de flujo, variando la temperatura, naturaleza del aceite e hidrofiliidad del surfactante

Se probaron tres surfactantes para producir la espuma: SPAN 20 (HLB =8,6), SPAN 80 (HLB =4,3) y TWEEN 20 (HLB =16,7). Sin embargo, estos surfactantes no redujeron significativamente la tensión superficial de los aceites (≈ 30 N/m), lo cual se demostrará más adelante. De esta manera, la formación la espuma suele atribuirse al incremento de la viscosidad superficial del aceite como se discutirá más adelante.

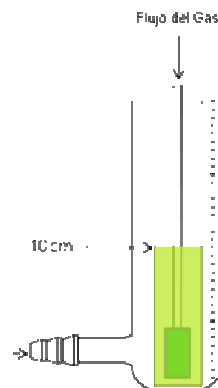


Figura 3.5 Muestra del líquido a espumar en la columna.

Luego de algunos ensayos exploratorios con diferentes aceites (PDV SAE 50, Valvoline HPO SAE 50, Venoco TC-W3 50:1, Mobil Super 2T y Motocicletas API TC) y a diferentes proporciones, se prepararon mezclas de 20% de aceite PDV SAE 50 (700 cp @ 21°C) en kerosén (2,3 cp @ 21°C) a 30°C con 0,1% de cada uno de los surfactantes mencionados. Se colocaron en la columna hasta que la altura del líquido alcanzara los 10 cm, según se describió antes. Luego se suministró gas a la columna a un flujo determinado (medido con el rotámetro)

hasta qué la altura de la espuma formada permaneció estable por un período de tiempo suficiente (aproximadamente 5 minutos). Se incrementó sistemáticamente el caudal de gas hasta que la altura de la espuma sobrepasara el límite superior de lectura de la misma, o hasta que se estableciera un régimen de flujo tal que la espuma perdiera su naturaleza y/o homogeneidad, por ejemplo un flujo tipo tapón de gas en espuma. La tabla 3.1 muestra la altura de espuma al equilibrio en función del flujo de gas, siendo el mejor efecto en la espumabilidad con el SPAN 80.

Tabla 3.1 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas de diferentes surfactantes al 0,1 % v/v en función del caudal de gas (20% aceite de motor y kerosén a 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin Aditivo	0,1% SPAN 20	0,1% SPAN 80	0,1% TWEEN 20
66	4,6	3,6	15,8	1,5
82	5,3	4,2	21,0	2,6
92	6,2	6,5	24,6	3,6
145	12,8	15,2	35,1	5,3
198	17,3	22,6	46,1	9,3
251	25,2	34,9	59,0	12,6
305	32,5	49,6	-	14,6
358	40,8	-	-	14,6

Medidas en cm

Luego, se registró la variación de altura durante el colapso de la espuma en función del tiempo a fin de reunir datos para trazar las curvas de colapso, tabla 3.2.

Tabla 3.2 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo de colapso (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

0,1% SPAN 20		0,1% TWEEN 20		0,1% SPAN 80	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	35	0	13	0	59
15	30	5	10	9	50
30	25	11	9	16	45
42	20	14	8	28	40
51	15	29	7	32	35
62	10	36	6	40	30
70	5	48	5	49	25
86	0	65	4	54	20
-	-	75	3	68	15
-	-	96	2	75	10
-	-	112	0	83	5
-	-	-	-	97	0

El método propuesto por Iglesias y colaboradores [2], establece que la relación de la altura de una espuma a su altura original (H/H_0) es una función lineal del logaritmo de la relación tiempo/tiempo medio ($t/t_{1/2}$). La figura 3.6 muestra la determinación de los parámetros H_0 y $t_{1/2}$ para la mezclas 20% de aceite en kerosén con 0,1% v/v SPAN 80 a 30°C.

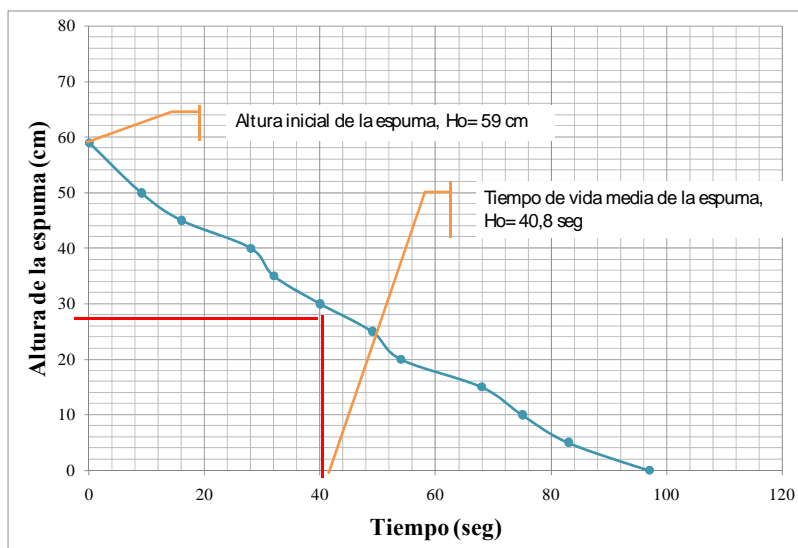


Figura 3.6 Altura máxima de la espuma y tiempo de vida media para la mezcla no acuosa (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

Iglesias [2] encontró que los valores adimensionales se distribuyen a lo largo de una línea recta que pasa por el punto ($H/H_o = 0,5$; $\text{Log}(t/t_{1/2}) = 0$). La ecuación de dicha línea recta es de la forma $H/H_o = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$. En función de esto se estimaron los valores de α por regresión lineal para las experiencias realizadas y se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores adimensionales de tiempo y altura para los ensayos con espumas en mezclas no acuosas (20% Aceite, 0,1% v/v SPAN 80 en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

0,1% SPAN 20		0,1% TWEEN 20		0,1% SPAN 80	
$H_o = 35$ cm		$H_o = 13$ cm		$H_o = 59$ cm	
$t_{1/2} = 46$ s		$t_{1/2} = 33$ s		$t_{1/2} = 40,8$ s	
$\alpha = 1,14$		$\alpha = 0,52$		$\alpha = 0,79$	
$\text{Log}(t/t_{1/2})$	H/H_o	$\text{Log}(t/t_{1/2})$	H/H_o	$\text{Log}(t/t_{1/2})$	H/H_o
-	1	-	1	-	1
-0,499	0,86	-0,8261	0,77	-0,656	0,85
-0,198	0,71	-0,4837	0,69	-0,407	0,76
-0,052	0,57	-0,3789	0,62	-0,106	0,59
0,033	0,43	-0,0626	0,54	-0,009	0,51
0,118	0,29	0,0313	0,46	0,080	0,42
0,170	0,14	0,3500	0,23	0,122	0,34
0,260	0,00	0,4572	0,15	0,308	0,09
-	-	0,5242	0,00	0,376	0,00

Se realizaron pruebas con diferentes concentraciones de SPAN 80 (0,01; 0,1; 0,5 y 1,0 %). Para ello se preparó una solución madre del surfactante en kerosén al 1% v/v de la que se añadían porciones a mezclas preparadas aceite-kerosén hasta conseguir las concentraciones señaladas. La tabla 3.4 muestra los datos obtenidos. La

tabla 3.5 muestra los datos obtenidos en el estudio del colapso de las espumas no acuosas en función de la concentración del SPAN 80.

Tabla 3.4 Altura máxima de la espuma (Ho) para distintos concentraciones SPAN 80 en mezclas no acuosas en función del caudal de gas (20% aceite de motor PDV SAE 50 y kerosén a 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin Aditivos	0,01%	0,1%	0,5%	1,0%
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	4,6	17,5	15,8	23,5	24,5
82	5,3	28,0	21,0	35,8	36,8
92	6,2	30,5	24,6	42,9	38,3
145	12,8	41,5	35,1	58,6	53,4
198	17,3	56,7	46,1	65,2	61,4
251	25,2	65,8	59,1	72,6	68,9

Medidas en cm

Tabla 3.5 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos concentraciones de SPAN 80 en función del tiempo (20% Aceite en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

0,01 %SPAN 80		0,1 %SPAN 80		0,5 %SPAN 80		1,0 %SPAN 80	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	47	0	59	0	72,6	0	69
11	40	9	50	12	60	2	60
27	30	28	40	19	50	10	50
35	25	40	30	25	40	17	40
42	20	54	20	31	30	29	30
50	15	68	15	39	20	36	20
56	10	75	10	47	10	43	10
70	5	83	5	56	5	53	5
93	0	97	0	61	0	69	0

Tabla 3.6 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas para distintos fracciones de aceite de motor PDV SAE función del caudal de gas (0,1 % SPAN 80, 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Porcentaje de aceite SAE 50				
	0%	5%	10%	20%	30%
92	3,0	5,0	5,6	24,6	8,7
145	4,1	7,2	19,3	35,1	12,9
198	6,3	13,0	34,7	46,1	16,9
251	8,5	23,7	54,4	59,0	19,0
305	12,1	36,3	-	-	20,0
358	17,2	48,0	-	-	20,0
411	24,0	-	-	-	21,0
464	41,2	-	-	-	-
517	61,0	-	-	-	-

Medidas en cm

Se realizaron algunos estudios preliminares a fin de determinar el tipo de aceite y su concentración en la mezcla para la generación de la espuma. Para ello, se ensayaron diferentes aceites comerciales: PDV SAE 50, Valvoline HPO SAE 50, Venoco TC-W3 50:1, Mobil Super 2T y motocicletas API TC. Fueron mezclados con kerosén comercial ya que los aceites puros no formaron espumas mayores a 1 cm, en el mejor de los casos, debido a la alta viscosidad de éstos (entre 300 y 400 cp). Al igual que en las pruebas realizadas por Anderson, [10], se hallaron mejores resultados con mezclas de aceite de motor, SAE 50 y kerosén. En la tabla 3.6 se muestran los datos obtenidos a 30°C. La tabla 3.7 muestra los datos en la etapa de colapso para cada espuma.

Tabla 3.7 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos fracciones de aceite de motor PDV SAE en función del tiempo (30°C, 0,1 % SPAN 80, flujo de gas: 250 mL/min).

0 % aceite		5 % aceite		10 % aceite		20 % aceite		30 % aceite	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	8,5	0	24,6	0	55,0	0	59,0	0	19,0
7	6,0	10	22,0	3	50,0	9	50,0	10	15,0
16	5,0	19	18,0	9	40,0	28	40,0	18	12,0
24	4,0	31	10,0	33	25,0	40	30,0	29	10,0
33	3,0	40	8,0	43	20,0	54	20,0	42	6,0
35	2,0	54	4,0	59	10,0	75	10,0	53	4,0
38	1,0	69	2,0	66	5,0	83	5,0	58	2,0
-	-	73	0,0	86	0,0	97	0	71	0,0

Tabla 3.8 Tensión superficial de los sistemas no acuosos.

Porcentaje de aceite en el kerosén	Aditivo	Tensión (Dinas/cm)
30	Sin aditivo	30,0
20	"	29,3
10	"	28,9
5	"	30,0
0	"	29,4
20	0,10 % SPAN 20	26,4
20	0,10% SPAN 80	27,3
20	0,10 % TWEEN 20	29,0
20	0 % SPAN 80	29,3
20	0,01 % SPAN 80	28,6
20	0,10 % SPAN 80	27,3
20	0,50% SPAN 80	27,1
20	1,0 % SPAN 80	27,2

Como se refirió antes, se sabe por múltiples trabajos realizados [4, 6, 10, 11] que el efecto importante de los surfactantes en los sistemas espumosos no acuosos, no es la disminución sustancial la tensión superficial (como sí lo es en los sistemas acuosos), a excepción de los conocidos superespumantes como los surfactantes fluorados. Estos últimos pueden reducirla a niveles de hasta 15 dinas/cm [6]. En ese sentido, se midió la tensión superficial de diferentes sistemas usando el método del anillo de Du Noy, tabla 3.8.

Debido a que la viscosidad depende de la temperatura, se ensayaron algunas pruebas variando la temperatura (30, 50 y 70°C) del sistema a espumar. Los valores de temperatura se establecieron ajustando la temperatura en el baño termostático, esperando el tiempo suficiente para que la muestra se atemperara procediendo de la forma ya descrita anteriormente. En el caso de 50 y 70°C, debido a la expansión del líquido, fue necesario ajustar la altura de la muestra a espumar hasta recuperar la altura establecida (10 cm). En la tabla 3.9 se reportan los datos de altura durante el colapso de la espuma.

Tabla 3.9 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintas temperaturas en función del tiempo (20% aceite de motor PDV SAE 50 y kerosén, 0,1 % SPAN 80, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

30°C		50°C		70°C	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	59	0	47	0	56
9	50	10	40	2	50
16	45	19	35	8	40
28	40	26	30	17	35
32	35	34	25	32	25
40	30	40	20	40	20
49	25	49	15	45	15
54	20	57	10	55	10
68	15	73	5	71	0
75	10	85	0	-	-
83	5	-	-	-	-
97	0	-	-	-	-

También se hicieron mediciones de la viscosidad cinemática de las mezclas a espumar [ASTM D445] en función del porcentaje de aceite y de la temperatura, cuyos datos se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Viscosidad cinemática de las mezclas usadas, sin aditivos.

Temperatura	Porcentaje de aceite				
	0%	5%	10%	20%	30%
30°C	2,1	2,9	4,1	6,5	8,5
50°C	0,9	1,5	1,9	3,4	4,1
70°C	0,5	0,7	0,9	2,3	2,9

Medidas en cm²/s

3.3 Evaluación de la acción antiespumante de alcoholes y de sólidos

En el caso de sistemas acuosos, se conoce el efecto de pequeñas cantidades de aditivos sobre la espumabilidad y estabilidad de las espumas [16-18]. Sin embargo, no abunda la información en el caso de sistemas no acuosos. En ese sentido se estudió el efecto de algunos alcoholes y de partículas sólidas.

3.3.1 Alcoholes

Se prepararon mezclas al 20% del aceite para motor PDV SAE 50 en kerosén con los alcoholes etanol, n-propanol, n-butanol, n-pentanol, n-octanol y n-decanol al 0,1% v/v a fin de observar el efecto de la longitud de la cadena en la espuma formada. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas para distintos alcoholes al 0,1% v/v en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin Alcohol	0,1% Etanol	0,1% n-Propanol	0,1% n-Butanol	0,1% n-Pentanol	0,1% n-Octanol	0,1% n-Decanol
66	3,5	14,0	13,7	26,5	11,3	7,3	6,0
82	5,1	25,0	27,0	32,1	21,8	8,4	7,3
92	6,0	29,2	30,0	34,5	28,5	10,4	8,8
145	9,0	61,0	66,0	56,0	64,0	29,5	22,0
198	11,0	-	-	-	-	58,2	55,2

A fin de observar el efecto de la posición del grupo OH⁻, se realizaron pruebas usando n-butanol, s-butanol e i-butanol por un lado y n-propanol y s-propanol por el otro, y compararlo con lo que se observa en espumas acuosas [1]. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas para los propanoles y los butanoles al 0,1% v/v en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin Alcohol	0,1% n-Propanol	0,1% s-Propanol	0,1% n-Butanol	0,1% s-Butanol	0,1% i-Butanol
66	3,5	13,7	11,0	26,5	14,1	19,5
82	5,1	27,0	18,5	32,1	27,0	28,7
92	6,0	30,0	26,0	34,5	33,0	38,4
145	9,0	66,0	61,0	56,0	62,5	52,5

Medidas en cm

La figura 3.7 muestra la tensión superficial de los alcoholes usados, como líquidos puros, tomados del programa *ACD ChemSketch 6.0*. Aunque no se usaron esos alcoholes puros, los

valores mostrados dan una idea de la tendencia del efecto de los mismos como aditivos en las mezclas.

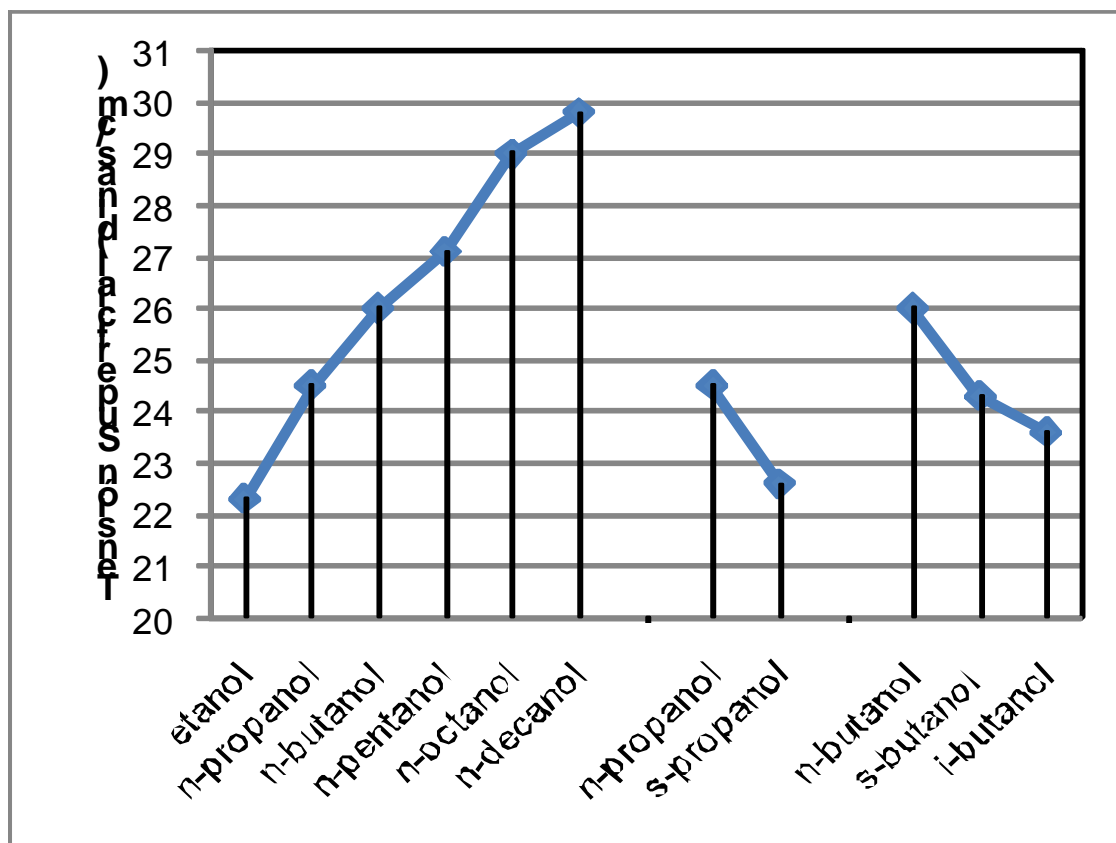


Figura 3.7 Valores de tensión superficial de los alcoholes puros [Programa ACD ChemSketch 6.0].

Para los alcoholes n-propanol y n-octanol se realizaron pruebas con variación de temperatura (30, 50 y 70°C). Los datos obtenidos de altura de la espuma con el flujo del gas se muestran en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Altura máxima de la espuma (H) en mezclas no acuosas con n-Propanol y n-Octanol a diferentes temperaturas en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén).

Q(ml N ₂ /min)	0,1% n-Propanol			0,1% n-Octanol		
	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C
66	13,7	17,2	22,3	7,3	9,2	12,3
82	27,0	30,6	32,5	8,4	10,5	15,3
92	30,0	39,1	40,2	10,4	15,3	21,4
145	66,0	45,6	42,5	29,5	32,9	34,2
198	-	58,6	46,7	58,2	48,9	45,7
251	-	-	52,1	-	55,4	52,1
305	-	-	-	-	-	60,3

Medidas en cm

Se realizaron ensayos para el estudio del colapso de las espumas con los alcoholes lineales y los datos registrados se muestran en la tabla 3.14. Se realizó la adimensionalización de las variables según el método discutido, tabla 3.15.

Tabla 3.14 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con diferentes alcoholes al 0,1% en función del tiempo (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

0,1% Etanol		0,1% n-Propanol		0,1% n-Butanol	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	16	0	15	0	14
3	14	6	12	4	12
6	12	10	10	5	11
8	10	13	8	8	10
13	8	16	6	11	8
17	6	20	4	14	6
18	4	26	2	19	4
25	2	61	0	47	2
50	0	-	-	75	0
0,1% n-Pentanol		0,1% n-Octanol		0,1% n-Decanol	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	10	0	6,5	0	7
3	8	4	4	4	4
6	6	7	3	8	3
9	4	11	2	13	2
13	2	18	1	21	1
28	0	24	0	29	0

Tabla 3.15 Valores adimensionales de la altura de las espumas con diferentes alcoholes en sistemas no acuosos (20% de aceite en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

0,1% Etanol		0,1% n-Propanol		0,1% n-Butanol	
Ho = 16 cm		Ho = 15 cm		Ho = 14 cm	
t _{1/2} = 13,0 s		t _{1/2} = 13,8 s		t _{1/2} = 12,5 s	
α = 0,86		α = 0,87		α = 0,69	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀
-	1	-	1	-	1
-0,637	0,875	-0,355	0,800	-0,495	0,857
-0,336	0,750	-0,134	0,667	-0,398	0,786
-0,211	0,625	-0,020	0,533	-0,194	0,714
0,000	0,500	0,071	0,400	-0,056	0,571
0,117	0,375	0,167	0,267	0,049	0,429
0,141	0,25	0,281	0,133	0,182	0,286
0,284	0,125	0,652	0	0,575	0,143
0,585	0	-	-	0,778	0

Tabla 3.15 Valores adimensionales de la altura de las espumas con diferentes alcoholes en sistemas no acuosos (continuación).

0,1% n-Pentanol		0,1% n-Octanol		0,1% n-Decanol	
Ho = 10 cm		Ho = 6,5 cm		Ho = 7,0 cm	
t _{1/2} = 7,4 s		t _{1/2} = 5,9 s		t _{1/2} = 5,6 s	
α = 0,87		α = 0,77		α = 0,72	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀
-	1	-	0,977	-	1
-0,392	0,8	-0,169	0,602	-0,146	0,571
-0,091	0,6	0,074	0,451	0,155	0,429
0,085	0,4	0,271	0,301	0,366	0,286
0,245	0,2	0,484	0,15	0,574	0,143
0,578	0	0,609	0	0,714	0

3.3.2 Partículas de cuarzo

Con el fin de evaluar el efecto de las partículas, se usaron esencialmente dos tipos de sólidos: cuarzo hidrofobado y asfaltenos. Aunque se logró un sistema con arena, los resultados no fueron del todo satisfactorios ya que la granulometría de la misma no permitía su suspensión. Las tablas 3.16 a la 3.21 muestran los resultados de los ensayos con cuarzo.

Tabla 3.16 Altura máxima de la espuma (H) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes concentraciones en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin cuarzo	0,1 % de cuarzo	0,5 % de cuarzo	1,0 % de cuarzo
66	15,8	1,6	1,3	1,6
82	21,0	2,0	2,0	1,9
92	24,6	2,5	2,5	2,3
145	35,1	3,5	5,5	6,7
198	46,1	6,2	16,5	24,8
251	59,0	13,2	44,6	55,6
305	-	25,2	51,6	62,5
358	-	41,3	-	-
411	-	48,3	-	-

Medidas en cm

En el caso del cuarzo hidrofobado, con tamaño nominal de partículas de 3 μm, se pesaron porciones del polvo y se agregaron directamente en la mezcla a evaluar (20% de aceite PDV SAE 50 en kerosén, con 0,1% v/v de SPAN 80). Se realizaron ensayos preliminares de solubilidad, observando la sedimentación de las partículas adicionadas. Se notó que concentraciones por encima de 1% no mostraban buena solubilización en el cuarzo o requería de otras técnicas para lograrlo (agitación vigorosa, por ejemplo). Finalmente se lograron

sistemas con 0,1; 0,5 y 1,0% de cuarzo, tabla 3.16. A fin de permitir una mejor mezcla de los sólidos, en cada caso se dejó la mezcla en una plancha agitadora por unos 5 minutos, además de la agitación en la columna por inyección del gas.

La tabla 3.17 muestra los datos registrados durante el colapso de los sistemas con 0,10, 0,50 y 1,00% de cuarzo. La tabla 3.18 muestra los mismos datos adimensionalizados.

Tabla 3.17 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes concentraciones en función del tiempo (20% Aceite, 0,1% v/v SPAN 80 en kerosén, 30°C, caudal de gas 250 mL/min).

0,10% cuarzo		0,50% cuarzo		1,00% cuarzo	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	16	0	42	0	56
4	14	3	40	3	50
11	12	9	35	9	45
14	10	12	30	12	40
17	8	18	25	18	35
21	6	22	20	22	30
24	4	29	15	29	25
29	2	33	10	33	20
33	0	37	5	37	15
-	-	42	2	42	10
-	-	58	0	58	5
-	-	-	-	71	0

Medidas en cm

Tabla 3.18 Valores adimensionales de la altura de espumas con diferentes concentraciones de cuarzo en sistemas no acuosos (20% de aceite en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

0,1% cuarzo		0,5% cuarzo		1,0% cuarzo	
Ho = 16 cm		Ho = 42 cm		Ho = 56 cm	
t _{1/2} = 17,0 s		t _{1/2} = 21,6 s		t _{1/2} = 24,3 s	
α = 1,50		α = 1,12		α = 1,02	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀
-	1,000	-	1,000	-	1,000
-0,63	0,875	-0,86	0,952	-0,78	0,893
-0,19	0,750	-0,38	0,833	-0,39	0,804
-0,08	0,625	-0,26	0,714	-0,27	0,714
0,00	0,500	-0,08	0,595	-0,11	0,625
0,15	0,250	0,11	0,357	0,05	0,446
0,23	0,125	0,18	0,238	0,11	0,357
0,29	0,000	0,23	0,119	0,17	0,268
-	-	0,29	0,048	0,22	0,179
-	-	-	-	0,43	0,000

3.1 Se ensayó el efecto de la temperatura en la espumabilidad y estabilidad de las mezclas con 0,10% cuarzo. Se realizaron pruebas a varias temperaturas (30, 50 y 70°C),

tabla 3.19.

Tabla 3.19 Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas con cuarzo a diferentes temperaturas en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 0,10% cuarzo).

Q(ml N ₂ /min)	30°C	50°C	70°C
66	1,6	1,0	1,1
82	2,0	1,0	1,4
92	2,5	1,5	1,7
145	3,5	2,3	2,1
198	6,2	4,0	3,5
251	13,2	8,9	6,0
305	25,2	13,5	9,8
358	41,3	19,0	14,0
411	48,3	24,0	17,8

Medidas en cm

La tabla 3.20 muestra los datos para la evaluación del colapso de las espumas al 20% de aceite en kerosén y 0,1% de SPAN 80 a distintas temperaturas (30, 50 y 70°C). La tabla 3.21 muestra estos datos adimensionalizados.

Tabla 3.20 Altura máxima de la espuma (H_o) en mezclas no acuosas con 0,10% de cuarzo a diferentes temperaturas en función del tiempo (20% Aceite, 0,1% SPAN 80, 30°C, 0,1% cuarzo, caudal de gas 250 mL/min).

30°C		50°C		70°C	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	16	0	11	0	7
4	14	3	9	1	6
11	12	4	8	4	5
14	10	5	7	9	4
17	8	7	6	10	3
21	6	8	5	13	2
24	4	9	4	15	1
29	2	11	3	25	0
33	0	12	2	-	-
-	-	13	1	-	-
-	-	16	0	-	-

Tabla 3.21 Valores adimensionales de la temperatura en sistemas no acuosos con 0,1% de cuarzo (20% de aceite en kerosén, 0,1% SPAN).

30°C		50°C		70°C	
Ho = 16 cm		Ho = 42 cm		Ho = 56 cm	
t _{1/2} = 17,0 s		t _{1/2} = 21,6 s		t _{1/2} = 24,3 s	
α = 1,5		α = 1,23		α = 0,93	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀
-	1,000	-	1,000	-	1,000
-0,63	0,875	-0,38	0,818	-0,98	0,857
-0,19	0,750	-0,16	0,636	-0,38	0,714
-0,08	0,625	-0,08	0,545	-0,03	0,571
0,00	0,500	0,09	0,364	0,02	0,429
0,09	0,375	0,18	0,273	0,13	0,286
0,15	0,250	0,22	0,182	0,19	0,143
0,23	0,125	0,25	0,091	0,41	0,000
0,29	0,000	0,34	0,000	-	-

3.3.3 Asfaltenos

Se evaluó el efecto de asfaltenos en la espumabilidad y estabilidad de las mezclas 20% de aceite PDV SAE 50 en kerosén, con 0,1% v/v de SPAN 80. Para ello se extrajeron los asfaltenos de una muestra de crudo Muscar 97, de gravedad 23°API con un 8,9% de asfaltenos medidos con el método de extracción con solvente. Con dicho método, se recuperaron unos 20 g de asfaltenos, de los cuales 1,0065 g fueron disueltos en kerosén en un matraz aforado de 250 mL para conseguir una solución al 0,40 % m/v.

Tabla 3.22 Altura máxima de la espuma (Ho) en mezclas no acuosas con asfaltenos a diferentes concentraciones en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

Q(ml N ₂ /min)	Sin asfaltenos	0,008 % de asfaltenos	0,016 % de asfaltenos	0,024 % de asfaltenos	0,08 % de asfaltenos
66	15,8	1,8	1,4	1,6	1,3
82	21,0	2,4	2,5	2,2	1,8
92	24,6	3,6	4,6	3,3	2,5
145	35,1	27,5	15,4	10,0	9,5
198	46,1	42,4	35,7	28,5	27,9
251	59,0	50,2	47,0	37,0	39,1

Medidas en cm

A 50 mL de la mezcla base preparada se le agregó 1, 2, 3 y 10 mL de esta solución para obtener mezclas de 0,008; 0,016; 0,024 y 0,08 % de asfaltenos, respectivamente. Igual que para el cuarzo, en cada caso se agitó la mezcla en una plancha agitadora por unos 5 minutos, además de la agitación en la columna por inyección del gas. En este caso, la secuencia de los ensayos se realizó estrictamente en orden creciente de concentración de asfaltenos, a fin de reducir al mínimo el exceso de asfaltenos que queda atapado en la piedra difusora y que

pudiera alterar la concentración de asfaltenos. La tabla 3.22 muestra la altura de la espuma registrada en función del caudal de gas.

La tabla 3.23 muestra los datos registrados en el colapso de los sistemas con contenido de asfaltano.

Tabla 3.23 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con asfaltenos a diferentes concentraciones en función del tiempo (20% Aceite, 0,1% v/v SPAN 80 en kerosén, 30°C).

0,008 % de asfaltenos		0,016 % de asfaltenos		0,024 % de asfaltenos		0,08 % de asfaltenos	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	0	0	0	0	0,2	0	0
7	5	7	5	8	5	8	5
27	15	18	10	35	15	18	10
50	25	31	15	60	25	30	15
76	35	58	25	75	30	59	25
98	42	88	35	87	34	78	30
106	44	122	42	94	36	98	35
119	46	162	45	104	37	124	39
164	49	186	47	153	38	131	40
177	50,5	253	48	177	39	158	41
200	50,2	262	46	207	39	257	41

La tabla 3.24 muestra los mismos valores, pero adimensionales según el modelo propuesto por Iglesias.

Tabla 3.24 Valores adimensionales de la concentración de asfaltenos en sistemas no acuosos (20% de aceite en kerosén, 30°C; flujo de gas: 250 mL/min).

0,008 % de asfaltenos		0,016 % de asfaltenos		0,024 % de asfaltenos		0,08 % de asfaltenos	
Ho = 49,0 cm		Ho = 49,0 cm		Ho = 39,0 cm		Ho = 36,0 cm	
t _{1/2} = 44,5 s		t _{1/2} = 47,3 s		t _{1/2} = 26,0 s		t _{1/2} = 38,2 s	
α = 0,92		α = 0,94		α = 0,69		α = 0,92	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₁
-	1,000	-	1,000	-	1,000	-	1,000
-0,61	0,918	-0,83	0,918	-0,72	0,897	-0,68	0,833
-0,39	0,714	-0,35	0,714	-0,51	0,769	-0,38	0,694
-0,22	0,612	-0,20	0,612	-0,41	0,667	-0,11	0,556
-0,03	0,510	0,07	0,408	-0,03	0,513	0,07	0,417
0,08	0,408	0,16	0,306	0,13	0,410	0,18	0,278
0,28	0,102	0,28	0,061	0,33	0,231	0,35	0,000
0,33	0,041	0,29	0,041	0,37	0,179	-	-
0,36	0,000	0,42	0,000	0,40	0,128	-	-

La tabla 3.25 muestra los datos obtenidos de la temperatura en la espumabilidad y estabilidad de las mezclas en conjunción con los asfaltenos a varias temperaturas (30 y 50°C). Los ensayos a temperaturas mayores (70°C) produjeron daños mecánicos en el difusor, resultando en el desprendimiento de la piedra dispersora de su base plástica.

Tabla 3.25 Altura máxima de la espuma (H₀) en mezclas no acuosas con 0,08% de asfaltenos a diferentes temperaturas en función del caudal de gas (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén).

Q(ml N ₂ /min)	30°C	50°C
66	1,3	4,2
82	1,8	5,8
92	2,5	6,5
145	9,5	12,2
198	27,9	24,5
251	39,1	41,0
305	-	52,0

La tabla 3.26 muestra los valores tomados para el colapso de los sistemas a las temperaturas evaluadas (30 y 50°C). La tabla 4.27 muestra los mismos datos adimensionales.

Tabla 3.26 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con 0,08% de asfaltenos a diferentes temperaturas en función del tiempo (20% Aceite, 0,1% v/v SPAN 80 en kerosén).

30°C		50°C	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0,00	36	0	50
8,00	30	5	40
16,00	25	15	35
30,00	20	21	30
45,00	15	32	25
58,00	10	40	20
70,00	5	47	15
78,00	2	55	10
86,00	0	68	5
-	-	81	0

Tabla 3.27 Valores adimensionales de la altura de espuma en sistemas no acuosos con 0,08% de asfaltenos (20% de aceite en kerosén, 30°C; flujo de gas: 250 mL/min)

30°C		50°C	
H ₀ = 36,0 cm		H ₀ = 50,0 cm	
t _{1/2} = 18,0 s		t _{1/2} = 33,1 s	
α = 0,92		α = 0,96	
Log(t/t _{1/2})	H/H ₀	Log(t/t _{1/2})	H/H ₀
-	1,000	-	1,000
-0,68	0,833	-0,82	0,800
-0,38	0,694	-0,34	0,700
-0,11	0,556	-0,20	0,600
0,07	0,417	-0,01	0,500
0,18	0,278	0,08	0,400
0,26	0,139	0,15	0,300
0,31	0,056	0,22	0,200
0,35	0,000	0,31	0,100
-	-	0,39	0,000

3.3.4 Partículas de arena

El efecto de estabilización de espumas por partículas de granulometría fina ha sido estudiado para sistemas acuosos [9]. Se cree que estas forman una especie de capa compacta que previene la coalescencia de las burbujas. En general, mientras más reducida es la granulometría de las partículas, el efecto estabilizante es mayor [14]. Para evaluar el efecto de partículas de arena en mezclas no acuosas, se ensayó un sistema con 0,001% de arena malla 40 (partículas de menos de 0,42 mm). Los datos obtenidos de altura en función del caudal de gas y del tiempo se muestran en las tablas 4.28 y 4.29, respectivamente.

Tabla 3.28 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con arena a al 0 y 0,001% en función del flujo de gas (20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C)

Q(ml N ₂ /min)	Sin arena	0,001 % de arena
66	3,5	4,6
82	5,1	5,9
92	6,0	6,3
145	9,0	14,0
198	11,0	19,0
251	14,5	23,0

Tabla 3.28 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con arena a al 0 y 0,001% en función del flujo de gas (20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C) (Continuación)

Q(ml N ₂ /min)	Sin arena	0,001 % de arena
305	20,0	27,6
358	28,0	30,1
411	35,5	34,5
464	41,1	39,7
517	48,5	43,8

Tabla 3.29 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con arena al 0 y 0,08% en función del tiempo (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

Sin arena		0,001% arena	
t (s)	H (cm)	t (s)	H (cm)
0	51	0	24
4	45	5	20
9	40	14	15
19	30	27	10
22	25	40	7
26	20	49	4
31	15	55	2
35	10	-	-
42	5	-	-
55	0	-	-

CAPITULO 4

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Diseño de un sistema para la medición de las etapas de vida de espumas no acuosas (formación, maduración y colapso), con control de temperatura, flujo y dispersión de gas

El equipo de formación de espumas no acuosas, diseñado y construido para tal fin permite la evaluación de algunos de los parámetros más importantes en dichos sistemas: flujo del gas de formación, temperatura, naturaleza del aceite a espumar, entre otras. En la figura 4.1 se muestra el montaje con sus accesorios y equipos auxiliares.



Figura 4.1 Equipo usado para la evaluación de espumas no acuosas.

Aunque el equipo cumple con lo establecido para la realización de los ensayos, se encontraron algunas limitaciones, entre éstas la necesidad de mejorar el sistema de dispersión del gas dentro de la columna. La columna permite el estudio de espumas de corta duración (evanescentes) debido a su altura efectiva. Cuenta con un sistema de control de temperatura y de flujo del gas de formación, lo que permite realizar ensayos de cada formulación variando estos parámetros.

4.2 Efecto de la relación gas/líquido, temperatura, naturaleza del aceite e hidrofiliidad del surfactante

A continuación se representan los resultados y análisis de las diferentes variables de formulación e hidráulica sobre la formación y colapso de espumas no acuosas.

4.2.1 Naturaleza del surfactante

La figura 4.2 muestra la altura de la espuma al equilibrio (H_0), en función del flujo del gas, en un rango de 0 a 350 mL N_2 /min, para mezclas 20% de aceite de motor en kerosén con 0,1% de diferentes surfactantes. Se muestra que el surfactante SPAN 80 (HLB = 4,3) produjo más espuma que los demás. En cambio, el TWEEN 20 (HLB = 16,7), mostró efectos antiespumante, al estar por debajo de la lineal correspondiente a la mezcla sin aditivo. El SPAN 20 (HLB = 8,6) mostró efecto antiespumante a flujos de gas bajo (menores a 90 mL/min). Sin embargo, a flujos mayores, produjo efecto espumante.

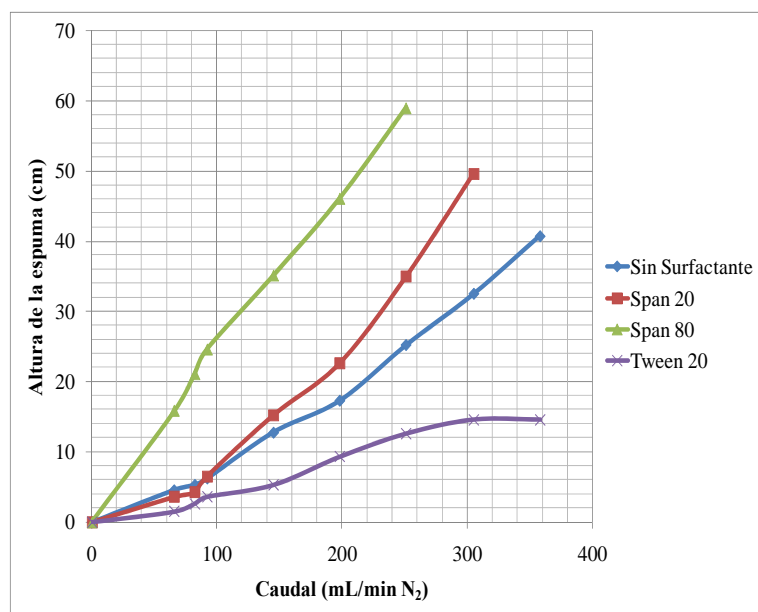


Figura 4.2 Altura máxima de la espuma (H_0) con diferentes surfactantes al 0,1 % v/v en función del caudal de gas (30°C)

Estos resultados difieren de lo encontrado por Anderz [10], en cuyo trabajo encontró que el SPAN 20 producía más espuma y con mayor estabilidad en el mismo orden de concentraciones ($\approx 0,5\%$ v/v). Un contraste entre estos trabajos es la diferencia entre los difusores de gas, lo cual es determinante en el tamaño y calidad de las burbujas formadas y por tanto de la cantidad y calidad de la espuma. Además, las mezclas usadas en ambos trabajos son diferentes. Anderz usó mezclas con 40% de aceite y con un flujo de gas mucho menores (70 mL/min). Es posible que las diferencias combinadas alteren el efecto de los surfactantes.

La figura 4.3 muestra el colapso de las espumas formadas con los tres surfactantes a iguales concentraciones en mezclas 20% aceite de motor SAE 50 en kerosén. Se observa un colapso tipo lineal y no exponencial como en las espumas acuosas; en general, las espumas no

acuosas colapsan más rápidamente porque el factor que domina su colapso es la viscosidad. Al tratarse de espumas de mezclas cuyo mayor contenido es kerosén, con viscosidad cinemática de 1,4 cSt, no se espera que sean muy estables. Según esta última afirmación, se espera que cualquier factor que afecte la viscosidad, entonces también afecte la espumabilidad y la estabilidad.

En la misma figura se observa que el surfactante TWEEN 20, aunque produce poca espuma, parece retardar más el colapso de la misma. Probablemente tenga que ver con la formación de las micelas inversas en el seno del líquido que aumenta ligeramente su viscosidad. Sin embargo, debe considerarse el efecto inercial, en el que el colapso de las burbujas de capas más altas, impacta a las burbujas de capas más abajo lo que altera la estabilidad de la espuma. Cualquiera que sea el caso, es evidente que el SPAN 80 produce una espuma con la estabilidad suficientemente aceptable como para usarlo como agente espumante, sobre el cual probar otros efectos.

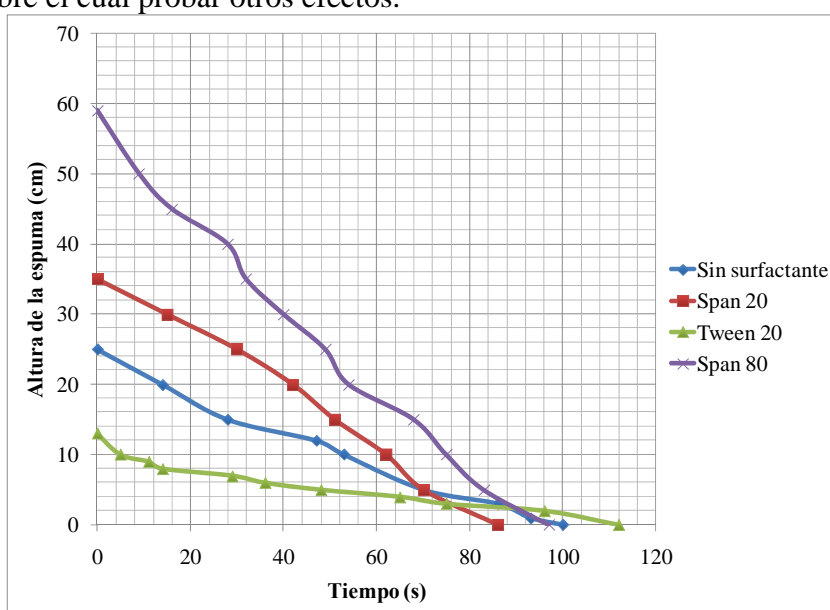


Figura 4.3 Altura de la espuma (H) para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo (30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran dos representaciones diferentes de los resultados de la figura 4.3, pero con tratamiento matemático adicional, a fin de estandarizar comportamientos. En la primera figura, se representa H/H_0 versus el tiempo, donde H_0 es la altura inicial de la espuma (aquella observada en el equilibrio dinámico de Bikerman [1]). El comportamiento de H/H_0 es directamente proporcional para el caso de los SPAN respecto a las espumas sin surfactante mientras que para el TWEEN 20 hay cambios en la pendiente después de 20 s, pero en ambos tramos de la curva se tiene un comportamiento lineal en esta representación.

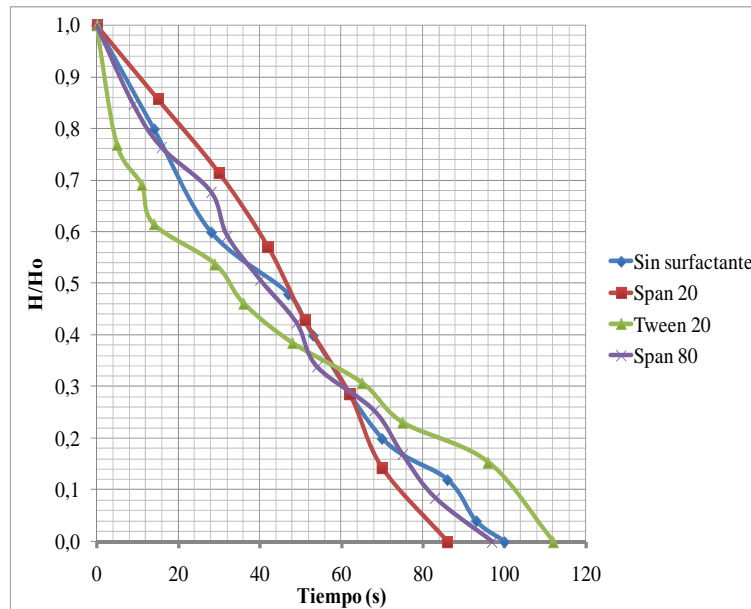


Figura 4.4 Relación H/H_o en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función del tiempo (20% Aceite, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

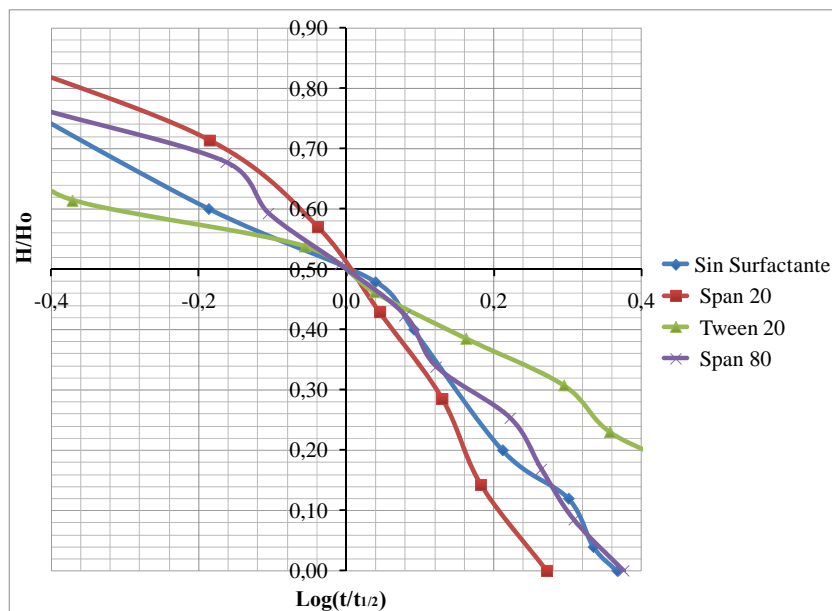


Figura 4.5 Relación H/H_o en mezclas no acuosas para distintos surfactantes al 0,1% v/v en función de $\text{Log}(t/t_{1/2})$ (20% Aceite, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

La figura 4.5 muestra los comportamientos de las distintas espumas, según el modelo que sugirió Iglesias y colaboradores [2]: H/H_o vs. $\text{Log}(t/t_{1/2})$. Se observa que en efecto, las distintas curvas tienen, como es de esperarse, a pasar por el punto $[H/H_o = 0,5, \text{Log}(t/t_{1/2}) = 0]$. Obviamente, los resultados aquí mostrados no son tan ajustados a una recta como los mostrados en el artículo citado, sin embargo, debe tomarse en cuenta que se trata de sistemas diferentes. De hecho, la tendencia general de las curvas luego de pasar por el punto $[H/H_o = 0,5, \text{Log}(t/t_{1/2}) = 0]$ coinciden con lo que Iglesias menciona en su artículo como nuevo

mecanismo; refiriéndose al cambio en el mecanismo dominante de colapso de la espuma, normalmente de controlado por drenaje gravitacional a controlado por maduración de Oswald. Las espumas acuosas muestran recurrentemente comportamiento de decaimiento exponencial, por lo que al tomar el logaritmo del tiempo adimensionalizado, el resultado ha de ser una línea recta. No ocurre lo mismo si el colapso tiene comportamiento lineal como se observa en la figura 4.3.

4.2.2 Concentración del surfactante SPAN 80

La figura 4.6 muestra el efecto de la concentración del surfactante SPAN 80 en la espumabilidad, en función del flujo de gas. Lo observado corresponde con lo esperado, a mayor flujo de gas, la altura de la espuma conseguida aumenta. Como se dijo anteriormente, esto es cierto hasta que el flujo del gas sea tal que la espuma no pierda su naturaleza y, desde el punto de vista experimental, hasta que la columna de medición pueda medirla.

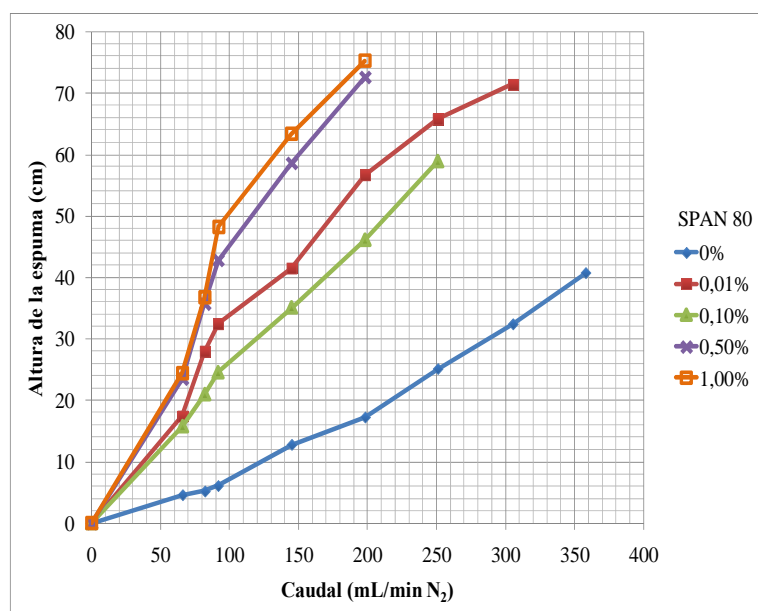


Figura 4.6 Altura máxima de la espuma (H) para distintos concentraciones SPAN 80 (30°C).

Para espumas acuosas, se espera que la mayor espumabilidad ocurra cerca de la concentración micelar crítica, CMC [1]. A concentraciones menores, la disponibilidad de moléculas de surfactante en el seno del líquido no es suficiente para reponer la capa del mismo en la interfase, según el efecto (Gibbs- Marangoni).

Para concentraciones mayores, el efecto es contrario (antiespumante), ya que el exceso de moléculas de surfactante impide el efecto mencionado. Tanto las moléculas de surfactante como las micelas están en capacidad de difundir a la superficie y, en teoría, se restaura más rápidamente el equilibrio. Sin embargo, la espumabilidad de un líquido está relacionada con la estabilidad de las micelas. Mientras más estables son las micelas, entonces más difícil es la formación de las espumas.

En espumas no acuosas no se puede explicar con los mismos términos ya que este efecto sencillamente no es determinante. Es posible que la mayor espumabilidad de los sistemas con

mayor concentración de SPAN 80 se relacione con el incremento de su concentración en la interfase, y por tanto con el incremento en la viscosidad superficial.

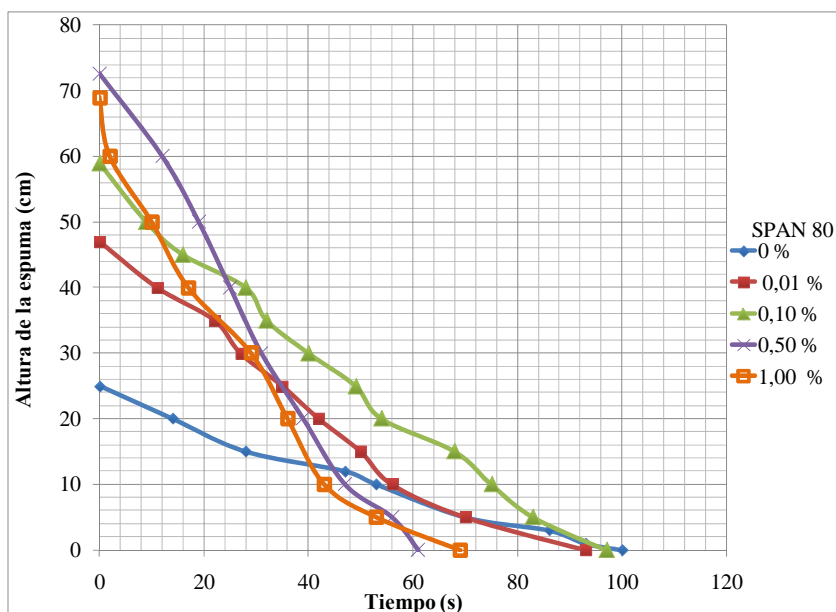


Figura 4.7 Colapso de las espumas de las mezclas para distintas concentraciones de SPAN 80 (20% Aceite en kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

La figura 4.7 muestra el colapso de las espumas con diferentes concentraciones de SPAN 80. En general, el patrón de colapso observado es lineal, la espumabilidad aumenta con la concentración ya que se obtienen mayores alturas de espumas. Esto probablemente se deba a que hay mayor disponibilidad de moléculas del surfactante para ubicarse en la interfase. Por otro lado, la estabilidad disminuye con la concentración del surfactante. La pendiente de colapso aumenta (en sentido negativo), aplanándose en la última etapa de vida de la espuma. Esto se asocia con el cambio de mecanismo de colapso. En la primera etapa de la vida de la espuma predomina el drenaje gravitacional de las películas de líquido a través de los bordes de Plateau. Eventualmente comienza a cobrar importancia la difusión gaseosa interburbuja, el cual es mucho más lento. En las curvas donde no se observa el cambio de pendiente (como por ejemplo la que corresponde a 0,10%), probablemente se deba a que ambos mecanismos controlan la última etapa de vida de la espuma.

4.2.3 Fracción de aceite en las mezclas

Como se mencionó antes, tanto la espumabilidad y estabilidad de sistemas acuosos son afectadas por la viscosidad [6], entonces la fracción de aceite en las mezclas preparadas (aceite SAE 50-kerosén) es determinante en la formación de las espumas. La viscosidad afecta en dos sentidos. Por un lado, una alta viscosidad impide la formación de suficientes burbujas y afecta la fluidez de las mismas en el seno del líquido. Por ello, un líquido muy viscoso no produce alta espumabilidad, como ocurre con la mezcla a 30% de aceite (figura 4.8), cuya viscosidad es de 8,5 cSt. Por otro lado, una viscosidad baja, genera espuma, pero su estabilidad está limitada por el alto drenaje del líquido, el cual aumenta al disminuir la viscosidad, como

ocurre para el caso del kerosén puro (0% aceite) cuya viscosidad es de 21 cSt. De manera que debe existir una viscosidad (o en este caso, una fracción del aceite) tal que la espumabilidad y la estabilidad sean óptimas, en el caso en estudio, la mezcla con 20% de aceite, viscosidad de 65 cSt.

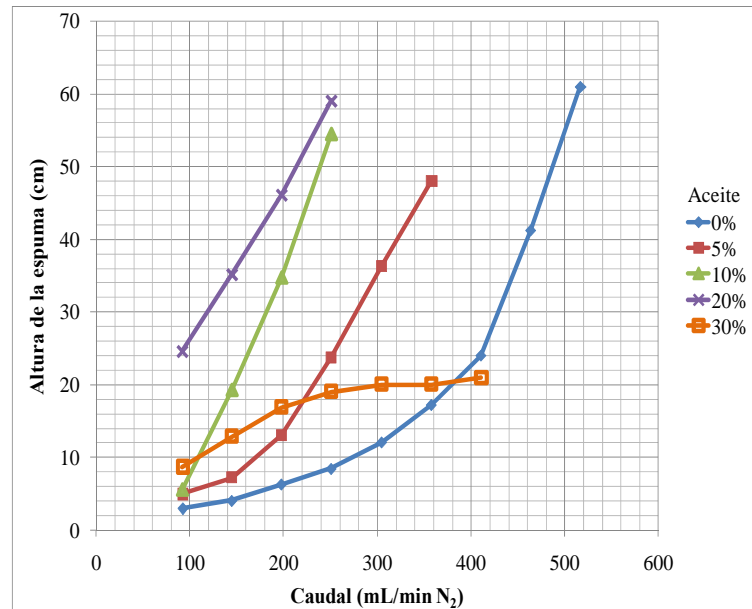


Figura 4.8 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos fracciones de aceite de motor PDV SAE función del caudal de gas (0,1 % SPAN 80, 30°C).

Esto es necesario ya que como se mencionó, en el caso de las espumas no acuosas, el factor relevante es la viscosidad. Así, se requiere que las mezclas contengan un componente que les dé tal característica.

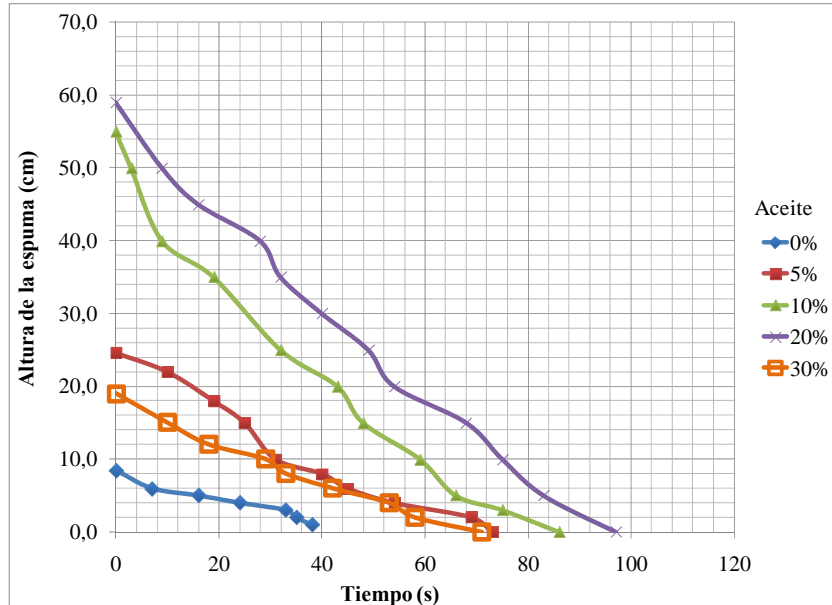


Figura 4.9 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas para distintos fracciones de aceite de motor PDV SAE en función del tiempo (30°C, 0,1 % SPAN 80, flujo de gas: 250 mL/min).

La figura 4.9 ratifica lo comentado en el párrafo anterior. Nótese que tanto el kerosén puro (0% aceite), como la mezcla con mayor contenido de aceite (30% aceite) son los sistemas que muestran menor espumabilidad.

La figura 4.10 muestra el efecto de la fracción de aceite en la tensión superficial de la mezcla. Según estos resultados, la tensión superficial es independiente de la mezcla, o por lo menos, las diferencias reales se confunden con la apreciación experimental del método usado (anillo de Dunoy): ± 1 . Adicionalmente, se representa, usando puntos, el efecto de 0,1% de los surfactantes usados en mezclas al 20% de aceite. El efecto más notable es el que ejerce el SPAN 20, que disminuye la tensión superficial en casi dos unidades (Dinas/cm). Entonces, este debería producir los mejores resultados de espumabilidad y estabilidad, Sin embargo, no es lo que se observa experimentalmente. En la figura 4.11 se observa el efecto de la concentración de SPAN 80 en la tensión superficial. Con 0,1 % v/v del surfactante se logra una disminución de 2 unidades. Para las concentraciones mayores ensayadas (0,5, y 1,0 % v/v) se encontró que la tensión permaneció constante, lo cual sugiere que la CMC del surfactante en el sistema en estudio está alrededor de 0,1% v/v.

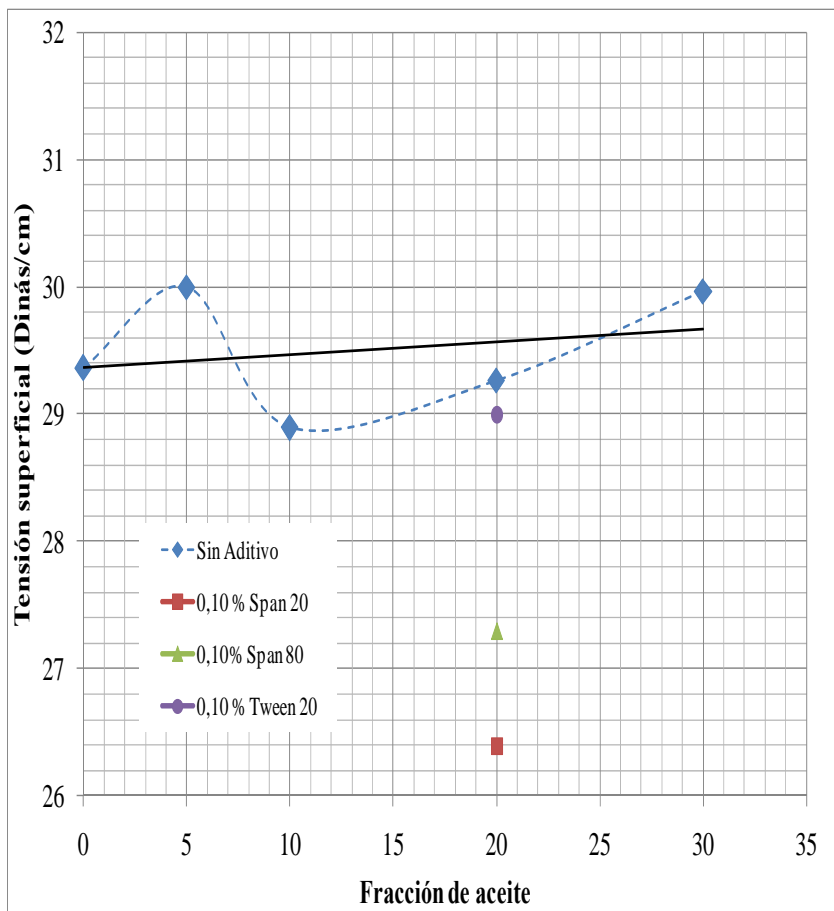


Figura 4.10 Tensión superficial en mezclas de aceite en kerosén en función de la fracción de aceite.

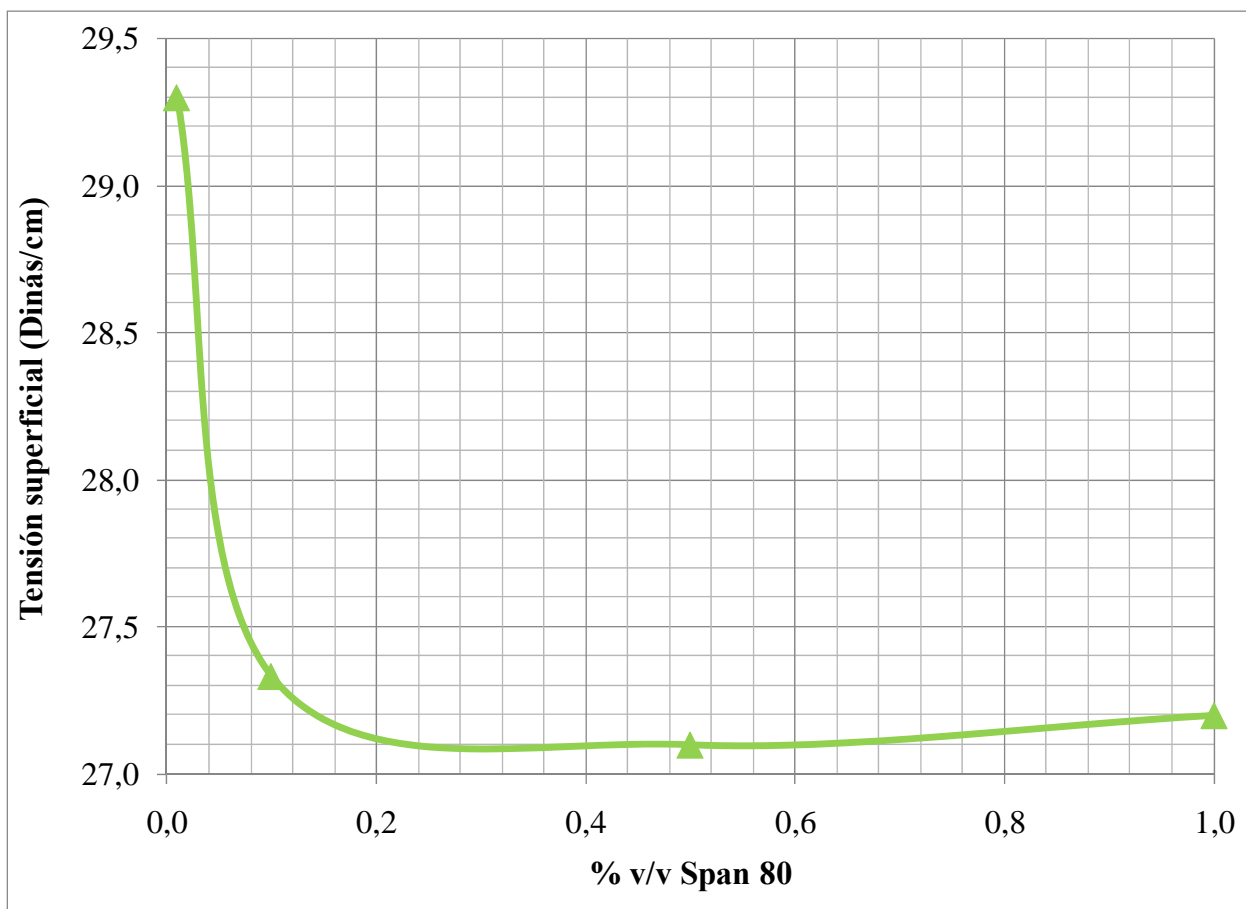


Figura 4.11 Tensión superficial en mezclas 20% de aceite en kerosén en función de la concentración del surfactante SPAN 80.

4.2.4 Temperatura

El efecto de la temperatura en la espumabilidad y la estabilidad de las mezclas es predecible [1, 6], según lo comentado respecto a la viscosidad. En la figura 4.12 se observa la influencia de la temperatura sobre la viscosidad cinemática de las diferentes mezclas de aceite ensayadas. A mayor temperatura, la viscosidad disminuye de manera exponencial [15]. El efecto de reducción de viscosidad es más acentuado para los sistemas con mayores fracciones de aceite. Por tanto la estabilidad debe disminuir con la temperatura, lo cual se observa en la figura 4.13. Sin embargo, no es el único efecto de la temperatura; otros fenómenos se incrementan con el aumento de la temperatura. Por ejemplo, las burbujas formadas se expanden más rápidamente por el calentamiento del gas en su interior, esto hace que colapsen más rápidamente. Además, en la espuma ya “madura”, se incrementa la difusión interburbuja y por tanto se acelera el envejecimiento del sistema y su colapso. Estos últimos factores no fueron estudiados directamente.

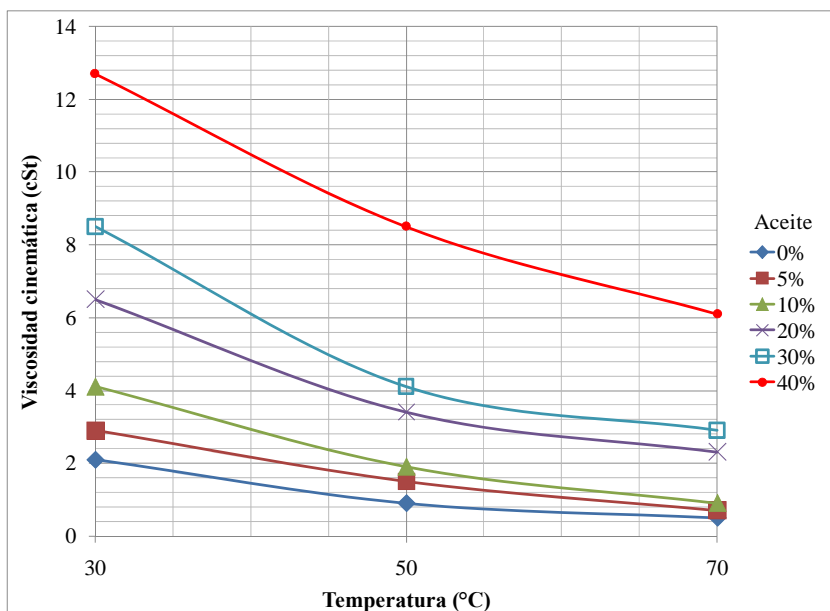


Figura 4.12 Viscosidad cinemática de diferentes mezclas aceite-kerosén en función de la temperatura.

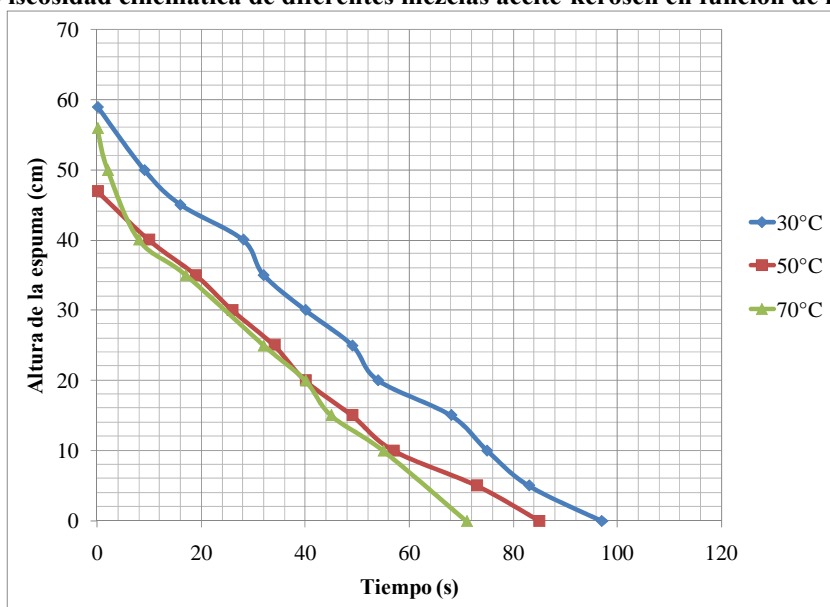


Figura 4.13 Altura de la espuma (H) para distintas temperaturas en función del tiempo (20% aceite de motor PDV SAE 50 y kerosén, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

4.3 Evaluación de la acción antiespumante de alcoholes y de sólidos

Es un tema bien estudiado el hecho de que pequeñas cantidades de aditivos (surfactantes, alcoholes, electrolitos, partículas finas, polímeros, etc.) afectan las propiedades de las espumas [14]. Estos se usan en algunos casos para reducir la estabilidad de las espumas (pinturas, lavaplatos, columnas de destilación, plantas de tratamiento de aguas residuales). En otros se utiliza con el efecto contrario: estimular la producción de las espumas y/o aumentar la estabilidad de las mismas (champú, cremas de afeitar, espumas antiincendio, etc.). En todo

caso, para afectar la estabilidad de una espuma (acuosa) se debe producir al menos uno de los siguientes efectos:

- Incrementar la elasticidad de la película.
- Disminuir el drenaje del líquido en las lamelas.
- Disminuir la difusividad del gas interburbujas.
- Incrementar el espesor de la doble capa eléctrica.
- Incrementar la viscosidad superficial y total del fluido.

Algunos aditivos actúan sobre un mecanismo en particular, mientras que otros actúan sobre varios de ellos. Evidentemente, no todos estos efectos son relevantes en el caso de las espumas no acuosas. En este trabajo se evaluó el efecto de alcoholes, partículas de cuarzo, asfaltenos y arena sobre la espumabilidad y estabilidad de sistemas no acuosos, particularmente sobre mezclas 20% de aceite SAE 50 en kerosén.

4.3.1 Alcoholes

El efecto de los alcoholes en las espumas acuosas ha sido bien estudiado, éstos actúan sobre varios de los mecanismos mencionados. En general, actúan como agentes que mejoran la cohesión de las moléculas del surfactante en la película. Su efectividad depende de la longitud de la cadena lipofílica y de la existencia o no de ramificaciones. Particularmente, el lauril alcohol disminuye la CMC del docedil sulfato de sodio, lo que mejora los efectos finales y con menor cantidad del surfactante.

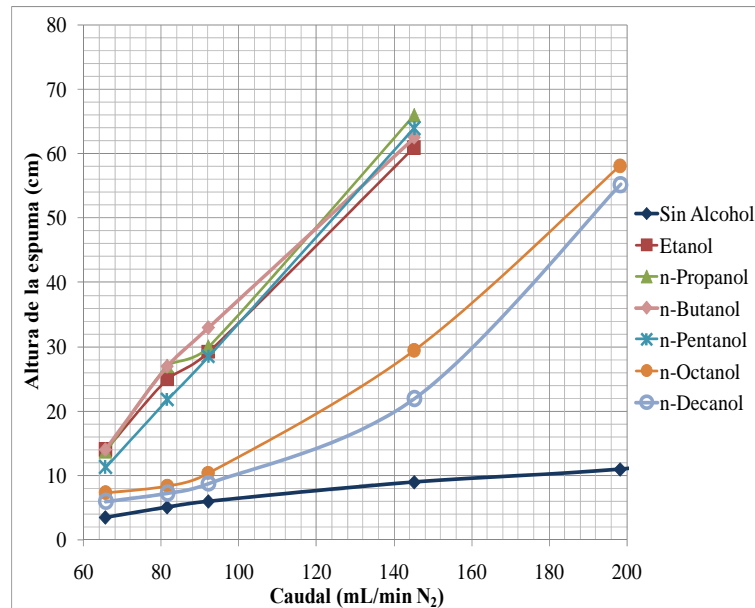


Figura 4.14 Altura máxima de la espuma (H_o) para distintos alcoholes al 0,1% v/v en función del caudal de gas (20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

En las espumas no acuosas, los mecanismos afectados parecen ser otros. La figura 4.14 muestra el efecto de los alcoholes lineales al 0,1% sobre la espumabilidad de las mezclas en función del flujo de gas. Según esta gráfica, los alcoholes mejoran la espumabilidad,

estableciendo una especie de sinergia con el surfactante. Para los alcoholes de cadena más corta (del etanol al n-pentanol) el incremento de la espumabilidad es, esencialmente, proporcional al caudal del gas. Sin embargo, esta linealidad se pierde y en general, el efecto es menos importante con alcoholes de cadena larga (n-octanol y n-decanol) lo que probablemente se deba a que se hace más afín al aceite, por tanto su efecto como coadyuvante del surfactante disminuye.

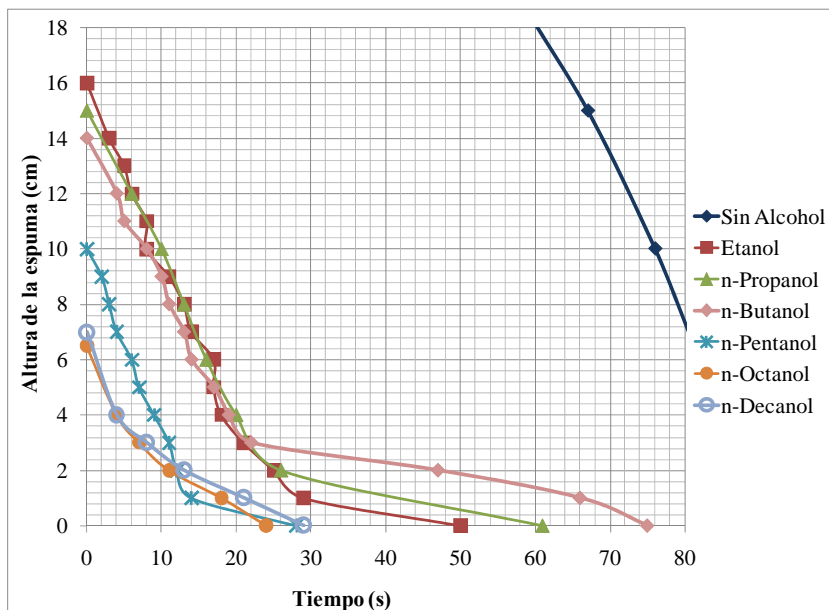


Figura 4.15 Altura de la espuma (H) con diferentes alcoholes al 0,1% en función del tiempo (20% Aceite, 01% SPAN 80 en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

La figura 4.15 muestra las curvas de colapso de los mismos sistemas. Los patrones de decaimiento son diferentes a los observados en los casos anteriores (sin alcoholes). Al flujo usado para formarlas (66 mL/min), estas espumas colapsan a mayor velocidad que las espumas sin alcohol, usada como referencia. El efecto se acentúa para las espumas con alcoholes de larga cadena (n-octanol y n-decanol). Se observa el cambio del mecanismo de colapso en la última etapa de vida de la espuma. Esto se debe a que inicialmente domina el efecto de drenaje gravitacional y al final, domina el efecto de difusión de gas interburbuja.

La figura 4.16 muestra los resultados adimensionados. Nótese como, en general, las diferentes curvas se alinean al representarse el decaimiento según la ecuación $H/H_0 = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$, donde α fue llamado constante de decaimiento por Turner y colaboradores [4]. Además, modificó el modelo de Iglesias a fin de tomar en cuenta el nivel del líquido a espumar.

La tabla 4.1 reporta los valores de H_0 , el tiempo medio, $t_{1/2}$ y α . Se observa una tendencia clara de los alcoholes a producir un efecto antiespumante (H_0 disminuye con el aumento de la longitud de la cadena hidrocarbonada), un efecto análogo se produjo sobre la estabilidad. Ahora, si para cada sistema de la grafica figura 4.15 se ajusta la recta $H/H_0 = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$, se obtienen los valores de α mostrados en la última columna de la tabla 4.1. Nótese que los valores de α están entre 0,7 y 0,9.

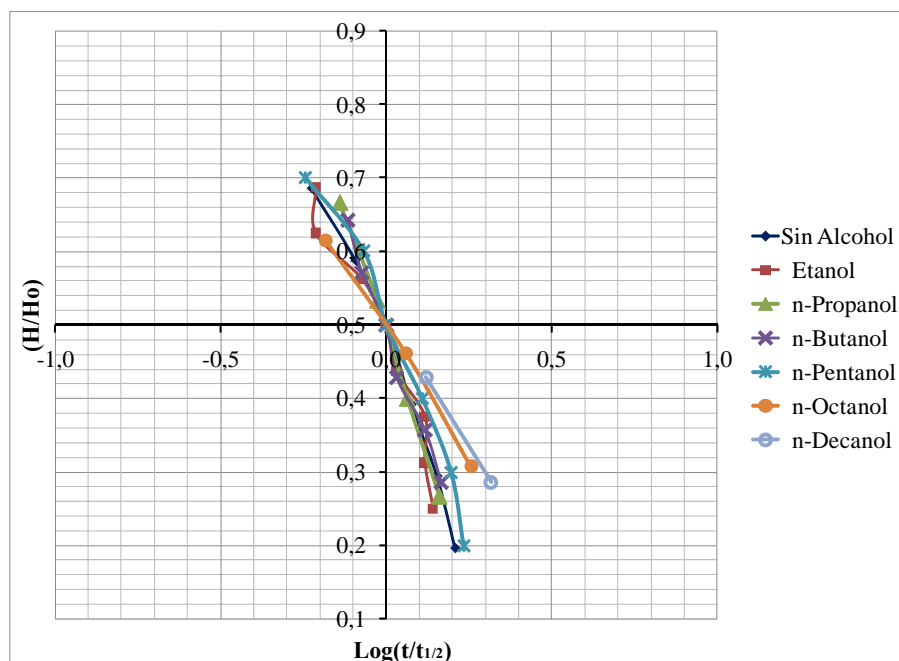


Figura 4.16 H/H_o vs. $\text{Log}(t/t_{1/2})$ para diferentes alcoholes al 0,1% (20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

Tabla 4.1 Espumabilidad y tiempo medio de las espumas en función de la concentración del alcohol ((20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C, caudal de gas 66 mL/min).

Alcohol	H_o (cm)	$T_{1/2}$ (s)	α H/H_o vs. $\log(t/t_{0,5})$
Sin Alcohol	51,0	46,8	0,90
0,1% Etanol	16,0	13,0	0,86
0,1% n-Propanol	15,0	13,8	0,87
0,1% n-Butanol	14,0	12,5	0,86
0,1% n-Pentanol	10,0	7,4	0,87
0,1% n-Octanol	6,5	5,9	0,77
0,1% n-Decanol	7,0	5,6	0,72

El valor de α se interpreta como una medida de la velocidad de decaimiento o colapso; el negativo de la ecuación ($H/H_o = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$) indica el sentido de la curva adimensionalizada. La tabla 4.2, compara los rangos de decaimientos con otros dos trabajos [2, 4]. Se puede decir que están por el mismo orden de magnitud, a pesar de que se usaron diferentes métodos de evaluación. Por otro lado, valores más altos de α implican, mayores velocidades de colapso, lo cual se aprecia al comprar los resultados de los trabajos citados. Las espumas evaluadas en este trabajo, siendo no acuosas, controladas por la viscosidad y con alta concentración de kerosén, lo que las hace poco viscosas, entonces se espera que colapsen mucho más rápidamente, como realmente se evidenció. Nótese también que para los resultados de Turner y colaboradores [4], con emulsiones, se observan los menores tamaños de

α , lo cual tienen sentido por el efecto que producen las gotitas sobre la viscosidad de un sistema.

Tabla 4.2 Comparación de los valores de constante de decaimiento reportados con los de otros autores.

Autor	Sistema promedio usado	Rango de α
Iglesias y colaboradores [2]	Sistema acuoso con NP+13,5 EO	0,3-0,4
Turner y colaboradores [4]	Emulsión W/O con aditivos variados	0,14 – 0,24
Este trabajo	Sistema no acuoso con SPAN 80	0,7 - 0,9

Por analogía a lo mostrado por Salager y colaboradores [1] respecto al efecto de la posición del grupo hidrofílico en el alcohol, quiso compararse la espumabilidad y estabilidad de las espumas no acuosas usando propanol y butanol. A la CMC del surfactante usado, la espumabilidad mejora conforme la posición del grupo OH del alcohol, se encuentre más interno en la molécula, básicamente porque esta forma logra mayor cohesividad lateral con el surfactante y por tanto disminuye más la tensión superficial, con todo lo que esto implica, por ejemplo mejor espumabilidad. Dado que en las espumas no acuosas, la tensión superficial no es determinante, no se espera gran diferencia entre la actuación de estos alcoholes.

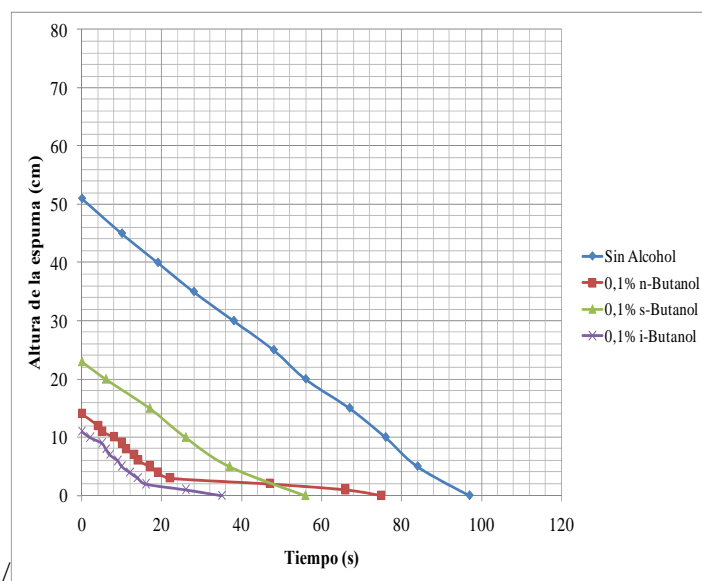


Figura 4.17 Efecto de la posición del grupo OH en el butanol en el colapso de espumas no acuosas en función del caudal de gas (20% de aceite en kerosén, 0,1 % de SPAN 80; 30°C; caudal de gas 66 mL/min)
 La figura 4.17 muestra el efecto mencionado en el decaimiento de las espumas con n-Butanol, s-Butanol e i-Butanol. Aunque las diferencias pudieran adjudicarse a errores experimentales lo cual sería aceptable, casualmente se observa el efecto explicado por Salager y colaboradores[1], excepto por la última etapa de vida de la espuma, donde el patrón de colapso cambia. Sin embargo, ese efecto evidentemente se hace menos importante a medida que el alcohol es más corto, lo que sugiere la figura 4.18. Obviamente, estas afirmaciones no pueden ser concluyentes ya que los alcoholes usados son de cadena corta, por lo que se sugiere usar diferentes versiones del octanol (1-octano, 2-octanol, etc.), para que el resultado sea realmente válido.

La figura 4.19 muestra la influencia de la temperatura en el colapso de espumas con n-propanol y n-octanol (con 0,1% de SPAN 80). En cuanto al tipo de alcohol, lo observado se

ajusta a lo ya comentado: cadena más larga del alcohol, menor espumabilidad. En todos los casos, el efecto de la temperatura es el esperado, al disminuir la estabilidad de las espumas. Lo paradójico es que al aumentar la temperatura, se incrementa la espumabilidad en los casos evaluados. Probablemente esto se debe a que al hacerse más fluido, el arrastre de la espuma es mayor y por tanto la altura de la espuma observada es mayor.

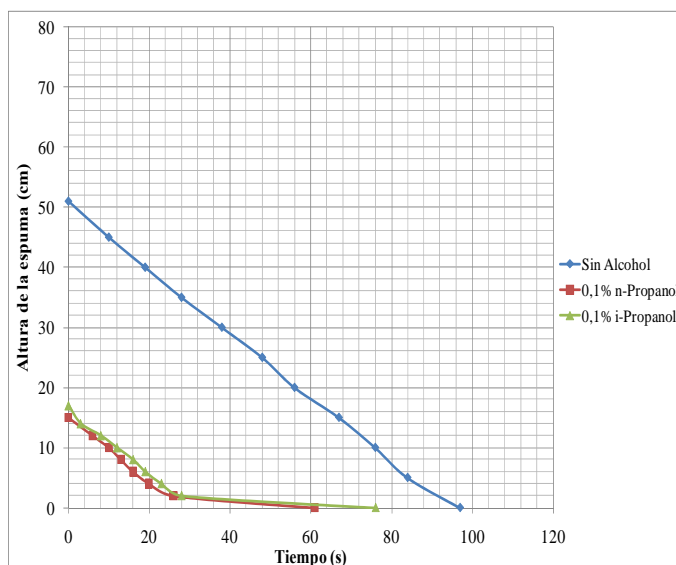


Figura 4.18 Efecto de la posición del grupo OH en el propanol en el colapso de espumas no acuosas en función del caudal de gas (20% de aceite en kerosén, 0,1 % de SPAN 80; 30°C; caudal de gas 66 mL/min).

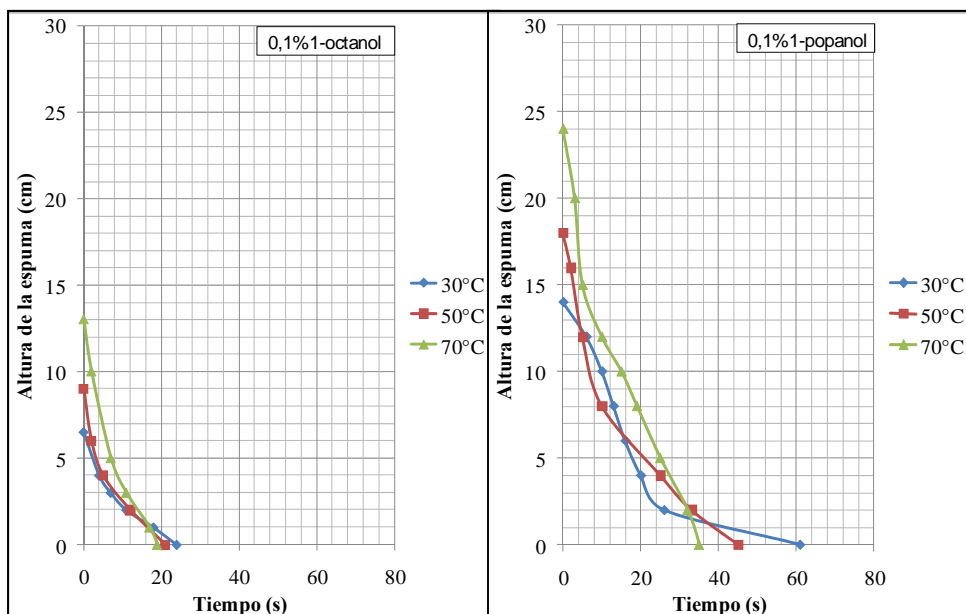


Figura 4.19 Altura de la espuma (H) a diferentes temperaturas en el colapso de espumas no acuosas con 0,1% de n-propanol y con 0,1% de n-octanol (20% de aceite en kerosén, 0,1% de SPAN 80, caudal de gas 66 mL/min).

4.3.2 Cuarzo

Lai y Dixit [14] establecieron que las partículas finamente divididas actúan como estabilizadores de las espumas. Esto se debe a la ubicación de dichas partículas en la superficie de las burbujas, lo que actúa como una placa de protección y ha sido estudiado por Sullivan y Kirkpatrick [16] en emulsiones. Evidentemente, las partículas más pequeñas funcionan mejor que las partículas más grandes. Al parecer, la distribución de tamaño de las partículas es un factor determinante, según lo demostró Sethumadhava y colaboradores [12]. Pero esas afirmaciones son ciertas, en primera instancia para sistemas acuosos, y en tanto las partículas en cuestión sean hidrófobas. Por otro lado, comercialmente hay una amplia variedad disponible de antiespumantes consistentes básicamente de mezclas de aceite de silicona y partículas de sílice, aprovechando la formación de puente y estiramiento (*bridging-streching*, en inglés), tal como ha sido comprobado [17].

Sin embargo, en sistemas no acuosos, el mecanismo no necesariamente es el mismo aunque sí podría serlo el resultado final. Las partículas de cuarzo hidrofobado tienden a ubicarse en la superficie de las burbujas en sistemas acuosos por razones más o menos obvias: el factor determinante en ese caso es la baja mojabilidad de las mismas. En sistemas no acuosos, obviamente no aplica de esta manera. Sin embargo, si es posible que en el líquido se afecte la viscosidad del sistema. Esto probablemente está relacionado con la viscosidad de las mezclas con diferentes cantidades de cuarzo.

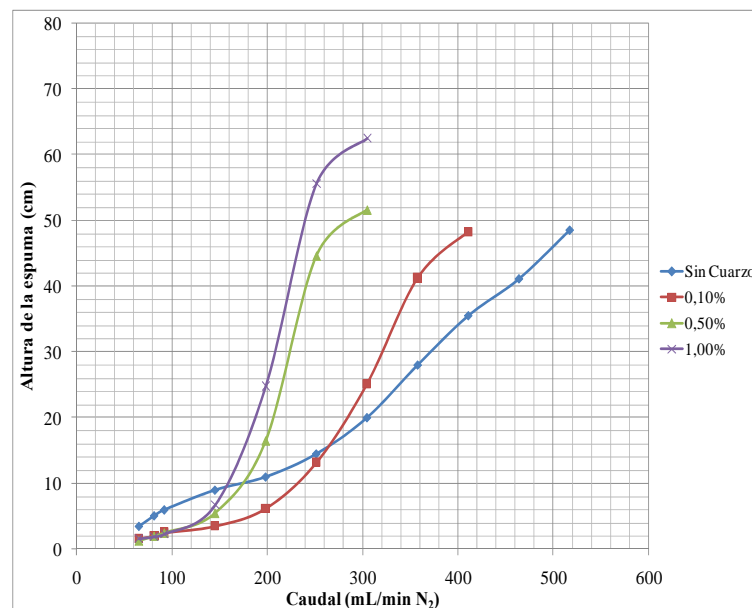


Figura 4.20 Altura de la espuma (H) en mezclas no acuosas con diferentes concentraciones de cuarzo en función del caudal de gas (20% Aceite, 0,1% SPAN 80 en kerosén, 30°C).

La figura 4.20, muestra la influencia del caudal de gas en sistemas con diferentes concentraciones de cuarzo. Se observa claramente que a bajos flujos del gas (< 140 mL/min), la espumabilidad de los sistemas con cuarzo son menores que la referencia (sin cuarzo). Esto cambia drásticamente a medida que se usan flujos mayores, resultando que la espumabilidad se incrementa con la cantidad de cuarzo. A flujos bajos hay pocas burbujas y de tamaños

relativamente pequeños por lo que la presencia de las partículas ejercen acción antiespumante. A mayores flujos, la cantidad y tamaño de burbujas aumenta, lo que hace que la concentración de partículas por unidad de área de espuma disminuya. El efecto espumante probablemente se deba a que se incrementa la viscosidad aparente del fluido o a que las partículas obstruyen el flujo del líquido entre los bordes de Plateau.

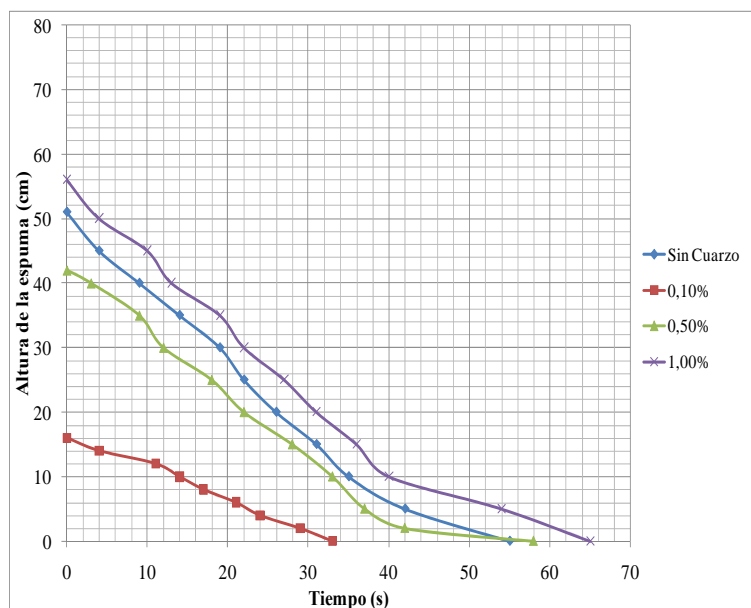


Figura 4.21 Efecto de la concentración de cuarzo en el colapso de espumas no acuosas (20% Aceite; 0,1% SPAN 80; 30°C, flujo de gas: 250 mL/min)

La figura 4.21 muestra el colapso de las espumas con partículas de cuarzo. Podría explicarse diciendo que a 0,1 y 0,5% de cuarzo, éste actúa como antiespumante, ubicándose en la superficie de las burbujas, y ya que no se trata de partículas esféricas, actúan como punzas en las películas interburbujas y finalmente impiden su crecimiento y por tanto reducen la estabilidad. Pero, cuando la cantidad del cuarzo se incrementa al 1%, entonces se incide sobre la viscosidad del líquido. Esta teoría se debe demostrar, como se sugirió antes, midiendo el efecto de las partículas sobre la viscosidad de las mezclas.

Tabla 4.3 Espumabilidad y tiempo medio de las espumas acuosas e función de la concentración de cuarzo (20% Aceite, 0,1% SPAN 80, caudal de gas 250 mL/min)

%Cuarzo	Ho, cm	$t_{1/2}$, s	α H/Ho vs. $\log(t/t_{0,5})$
0	51	46,8	0,9
0,1	16	17,0	1,50
0,5	42	21,6	1,12
1,0	56	24,3	1,02

La tabla 4.3 muestra la espumabilidad y la estabilidad de las espumas con cuarzo. En general, se observa que la espumabilidad (H_o) aumenta con la concentración del cuarzo. Inicialmente produce un efecto antiespumante, pero eventualmente comienza a ganar importancia los fenómenos ya comentados. Otro aspecto a destacar es que hay una relación sobre el efecto del cuarzo en la espumabilidad y en la estabilidad. La tendencia de variación de ambos parámetros coincide. Se observa que α , en general, aumenta con la presencia de las partículas de cuarzo. Para el sistema con 0,1% de cuarzo se alcanza $\alpha = 1,50$, lo que está relacionado con una mayor velocidad de colapso. Eventualmente, a concentraciones superiores de cuarzo, α disminuye ya que cobra importancia el incremento de la viscosidad del fluido.

4.3.3 Asfaltenos

Los asfaltenos (figura 4.22) son macromoléculas de forma y composición compleja, pero que en promedio pueden representarse como la fusión de anillos aromáticos y heteroátomos con ramificaciones hidrocarbonadas extendiéndose por su periferia. Son pues, moléculas cuyo centro es altamente polar, por la presencia de los heteroátomos, mientras que las ramificaciones son lipofílicas. Eso hace que sean surfactantes, de hecho, su presencia en el crudo es la causante de la emulsificación ya que disminuye la tensión superficial del mismo, entre otras cosas. Se ha estudiado el efecto estabilizante de los asfaltenos y de su combinación con las resinas [18]. De hecho, Poindexter y colaboradores [19] demostraron el efecto de los asfaltenos en 20 tipos de crudos, encontrando que la cantidad de asfaltenos, la relación asfaltenos-resinas y la viscosidad (dependiente también de los asfaltenos) definen la espumabilidad de estos crudos.

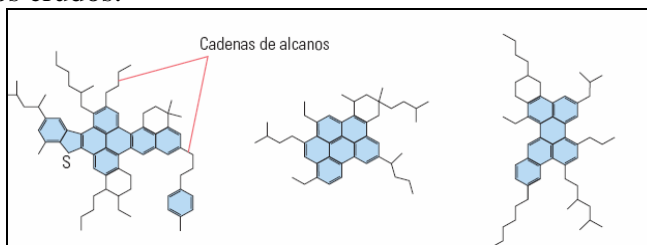


Figura 4.22 Estructuras moleculares de los asfaltenos

La figura 4.23 muestra la influencia de la concentración de asfaltenos en la espumabilidad en función del flujo de gas. En principio, el comportamiento general es parecido al observado en el cuarzo (figura 4.20), en el cual se observa un marcado efecto antiespumante para flujos bajos, pero lo contrario para mayores flujos. Además, a menor concentración, el efecto espumante es mayor y a medida de que la concentración de los asfaltenos aumenta, entonces su efectividad como espumante disminuye. Las partículas de asfaltenos se ubican en la interfase, formando una especie de placa que mejora la resistencia de la espuma. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de estos surfactantes, entonces esta placa se hace más rígida, reduciendo su módulo de elasticidad y por tanto la capacidad de expansión de las burbujas, causando la reducción de la espumabilidad.

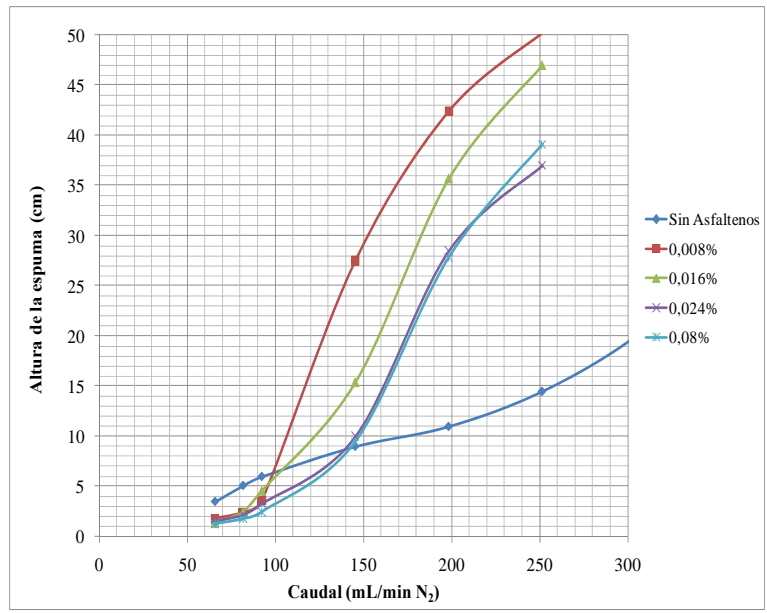


Figura 4.23 Efecto de los asfaltenos en la formación de espumas no acuosas en función del caudal de gas (20% Aceite; 0,1% SPAN 80; 30°C, flujo de gas: 250 mL/min)

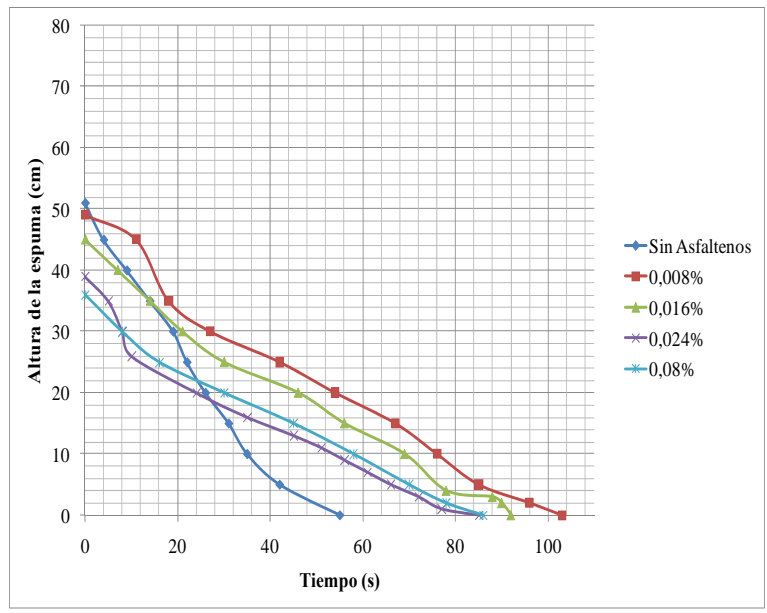


Figura 4.24 Altura de la espuma (H) a diferentes concentraciones de asfaltenos en función del tiempo (20% Aceite; 0,1% SPAN 80; 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

La figura 4.24 muestra el colapso de las espumas no acuosas con diferentes concentraciones de asfaltenos. Se observa que en general, los asfaltenos incrementan la estabilidad de las espumas respecto a la referencia. Probablemente se deba a que estas partículas alteran la viscosidad de la mezcla, pero sobre todo, se afecta la viscosidad superficial de las burbujas formadas y mejoran el módulo de elasticidad de las mismas. Sin embargo, al incrementar la concentración de asfalteno, el tiempo de vida de la espuma se reduce. A diferencia de lo observado en las espumas con alcoholes, no se observa una

variación de mecanismo de colapso en la última etapa de vida de la espuma, lo cual indica que todo el proceso está dominado por el drenaje gravitacional. La difusión interburbuja es menos importante debido a la capa de asfaltenos que recubre las burbujas.

La tabla 4.4 muestra el resultado de la linealización de las curvas de la figura 4.25. En ésta se observa el efecto mencionado, pero sobre todo que la constante de decaimiento (α) sigue estando en el rango ya descrito en la tabla 4.2.

Tabla 4.4 Espumabilidad y tiempo medio de las espumas acuosas en función de la concentración de asfaltenos (20% Aceite, 0,1% SPAN 80, caudal de gas 250 mL/min)

%Cuarzo	Ho, cm	t _{0,5} , s	α H/Ho vs. log(t/t _{0,5})
0,008	49	44,5	0,92
0,016	49	47,3	0,94
0,024	39	26,0	0,69
0,08	36	38,2	0,92

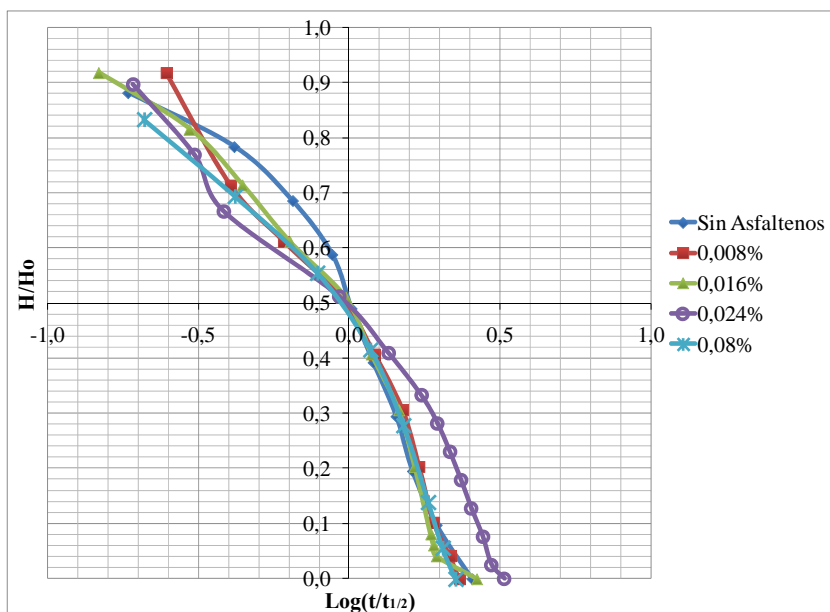


Figura 4.25 Efecto de la concentración de asfaltenos en espumas no acuosas como H/Ho vs. Log(t/t_{1/2}) (20% aceite, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min).

La figura 4.26 muestra la influencia de la temperatura en el colapso de las espumas con 0,08% de asfaltenos. A la temperatura de 50°C se obtuvo una mayor altura de la espuma. Esto se debe a que la disminución de la viscosidad permite un mayor hinchamiento de las burbujas lo cual incrementa el volumen. Sin embargo, al permitir el colapso, la espuma formada a 30°C mostró una mayor estabilidad. Esto permite inferir que el factor determinante es la viscosidad del líquido.

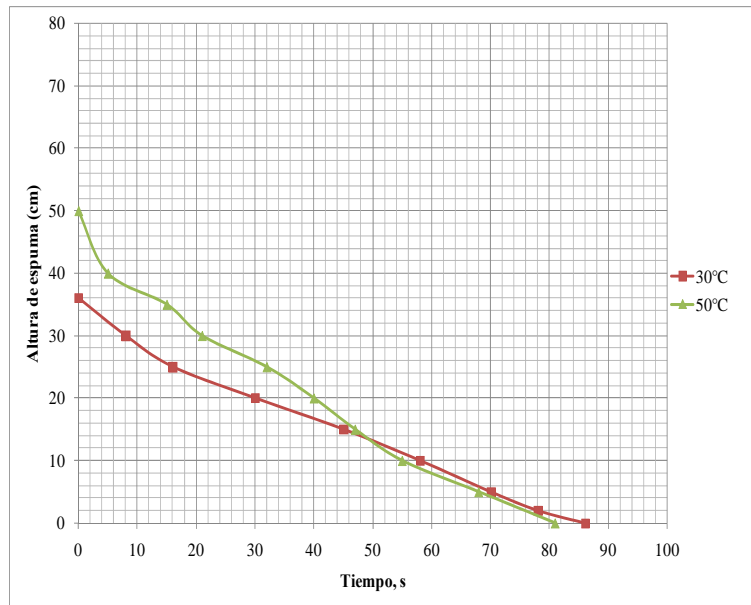


Figura 4.26 Altura de la espuma (H) a distintas temperaturas en función del tiempo (20% aceite, 30°C, flujo de gas: 250 mL/min, 0,08% de asfaltenos)

4.3.4 Arena

La figura 4.27 muestra el colapso de la espuma en función del caudal de gas para un sistema con 0,001% de arena y un sistema de referencia (sin arena). Se muestra que la arena produce un efecto antiespumante, disminuyendo la espumabilidad cerca de un 50%. Sin embargo, incrementa la estabilidad de la espuma. Las partículas se ubican en la superficie de las burbujas formando una película rígida que retrasa su ruptura y eventual colapso de la espuma.

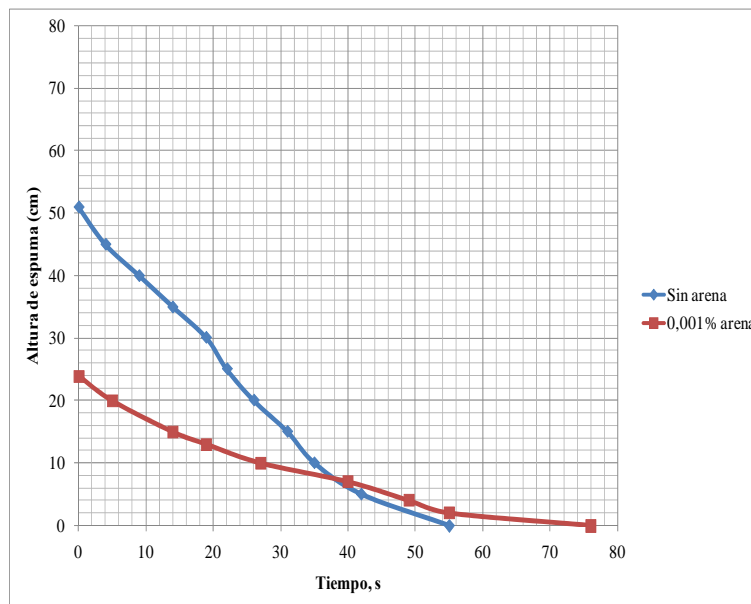


Figura 4.27 Efecto de la presencia de arena en el colapso de espumas no acuosas (20% Aceite; 0,1% SPAN 80; 30°C, flujo de gas: 250 mL/min)

4.4 Conclusiones

1. El equipo construido permitió la medición de la espumabilidad y estabilidad de mezclas aceite-kerosén.
2. El SPAN 80 mejoró en un 140%, aproximadamente, la espumabilidad de los sistemas no acuosos estudiados, en comparación con el SPAN 20 y el TWEEN 20.
3. El sistema con mejores propiedades espumantes fue el de 20% de aceite de motor SAE 80 en kerosén comercial y con 0,1% de SPAN 80.
4. La temperatura afecta la estabilidad de los sistemas estudiados al incidir sobre la viscosidad del líquido a espumar, de tal forma que a mayor temperatura, menor viscosidad y menor estabilidad. En cuanto a la espumabilidad, los resultados no demuestran ser concluyentes por el efecto hidrodinámico del gas de formación.
5. Los alcoholes mostraron un efecto espumante sobre los sistemas para flujos del gas de formación menores a 200 mL N₂/min. Sin embargo, al comparar el colapso de las espumas a un flujo dado, el efecto es contrario y mayor a medida que la longitud de la cadena hidrocarbonada del alcohol aumenta.
6. Los resultados encontrados para el efecto de los alcoholes y con asfaltenos fueron ajustados al modelo propuesto por Iglesias y colaboradores, con coeficientes de decaimiento entre 0,7 y 0,9. El ajuste con los diferentes surfactantes usados y con partículas sólidas no fue satisfactorio.
7. No hubo efectos notables de la posición del grupo hidroxilo del alcohol en las espumas estudiadas.
8. En general, las partículas de cuarzo y de asfaltenos producen efectos espumantes en los sistemas no acuosos, probablemente debido a su incorporación en las películas interburbujas, alterando la viscosidad superficial y el módulo de elasticidad de las mismas.

4.5 Recomendaciones

1. Ensayar con difusores de poros de menor tamaño y mejor resistencia mecánica.
2. Instalar un manómetro a la entrada de la columna a fin de evaluar el efecto de la energía incorporada al líquido.
3. Evaluar el efecto de otros surfactantes.
4. Realizar pruebas para la evaluación del efecto de la posición del grupo OH usando alcoholes de cadena larga.
5. Realizar pruebas del efecto de partículas de cuarzo y arena de diferentes granulometrías y combinaciones de éstas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Salager JL, **Influencia de la formulación sobre las espumas**. Mérida, Venezuela, Laboratorio FIRP; (2003).
2. Iglesias E, Anderez J, Forgiarini A, Salager J, **A new method to estimate the stability of short-life foams**. In, *Colloids Surface.*, 167– 174. (1995)
3. Bhakta A, Ruckenstein E, **Decay of standing foam, drainage, coalescence and collapse**. In, *Advances in Colloidal and Interface Sciences.*, 124. (1997).
4. Turner D, Dlugogorski B, Palmer T, **Factors affecting the stability of foamed concentrated emulsions**. In, *Colloids Surf A, Physicochem Eng.*, 171–184. (1999).
5. Ross S, **Foaming volume and foam stability**. In.; (1945).
6. Schmidt D, **Nonaqueous Foam, Theory, Measurement and Applications**. In, *Foams, Theory, Measurements, and Applications*. Edited by Khan RKPhSA, vol. 57. New York, Marcel Dekker, Inc., 287-314. (1996).
7. Denkov N, **Mechanisms of Action of Mixed Solid-Liquid Antifoams. 2. Stability of Oil Bridges in Foam Films**. In, *Lagmuir*. Saint Fons Cedex, 8530-8542. (2001).
8. Zaki N, Poindexter M, Kilpatrick P, **Factors Contributing to Petroleum Foaming. 2. Synthetic Crude Oil Systems**. In, *Energy & Fuels*, 711-717. (2001)
9. Belandria V, **Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos**. *Tesis de Grado*. Mérida, Laboratorio FIRP, (2001).
10. Anderez A, **Estabilidad de espumas no acuosas**. *Tesis de Grado*. Mérida, Laboratorio FIRP, (2001).
11. Alcalá P, **Evaluación de formulaciones antiespumantes para la ruptura de espumas no acuosas**. *Tesis de Grado*. Puerto la Cruz, (2008).
12. Sethumadhavan G, Bindal S, Nikolov A, Wasan D, **Stability of thin liquid films containing polydisperse particles**. In, *Colloids and Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects*. vol. 204. Chicago, Elsevier, 51-62. (2001).
13. ASTM, **Standard Test Method for Foaming Characteristics of Lubricating Oils**. In., (2003).
14. Lai K, Dixit N, **Additives for foams**. In, *Foams Theory, measurements, and Applications*. Edited by Khan RKPhSA, vol. 57. New York, USA, Marcel Dekker, Inc., 315-338. (1996).

15. Reid R, Sherwood T, **Propiedades de los gases y líquidos, su estimación y correlación**. México, Hispano-Americana, (1975).
16. Sullivan A, Kilpatrick P, **The effects of inorganic solid particles on water and crude oil emulsion stability**. In, *Ind Engineering Chemistry*. vol. 41. North Carolina, 3389-3404. (2002).
17. Krastanka M, Denkov N, Branlard P, Giraud Y, Deruelle M, **Optimal Hydrophobicity of Silica in Mixed Oil–Silica Antifoams**. In, *Langmuir*. vol. 18. Sofia, 3399–3403. (2002).
18. Baugeta F, Langevinb D, Lenormanda R, **Dynamic Surface Properties of Asphaltenes and Resins at the Oil–Air Interface**. In., Academic Press; (2000).
19. Poindexter M, Zaki N, Kilpatrick P, Marsh S, Emmons D, **Factors Contributing to Petroleum Foaming. 1. Crude Oil Systems**. In. Edited by Society AC, vol. 16, Energy Fuels, 700–710. (2002).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS Y DE FORMULACIÓN SOBRE LA ESTABILIDAD DE ESPUMAS NO ACUOSAS
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Alexis José Cova Bonillo	CVLAC: 11.905.328 E MAIL: alexiscovab@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

ESPUMAS, SISTEMAS DISPERSOS, ALCOHOLES, SURFACTANTES,
CUARZO, ASFATENOS, SPAN 80, TWEEN 20

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Coordinación General de postgrado/Ingeniería	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Se evaluó el efecto de variables hidráulicas y de formulación en espumas no acuosas, esencialmente en mezclas al 20% de aceite de motor PDV SAE 80 y kerosén comercial. Para ello, se construyó un sistema basado en una columna de vidrio de 80 cm de altura, con control de temperatura. Se encontró que la mejor opción para la producción de las espumas fue con el surfactante SPAN 80, entre los evaluados. Se encontró que al incrementar la concentración del surfactante, aumenta la espumabilidad, pero disminuye la estabilidad de las espumas. Tanto la fracción de aceite como la temperatura, que afectan la viscosidad de las mezclas evaluadas, afectan la espumabilidad y la estabilidad de las espumas formadas de tal manera que a mayor viscosidad se consigue mayor estabilidad. Se encontró un efecto espumante de los alcoholes etanol, n-propanol, n-butanol, n-pentanol y n-octanol a flujos menores a 200 mL/min de N₂. A flujos mayores, se encontró el efecto contrario: la espumabilidad y la estabilidad de las espumas disminuyen con la longitud de la cadena hidrocarbonada del alcohol. No hubo efectos notables de la posición del grupo hidroxilo del alcohol en las espumas estudiadas. Se observó un efecto espumante en las partículas de cuarzo y de los asfaltenos agregados a las mezclas, probablemente debido a que estos sólidos se incorporan en la superficie de las burbujas formando una película que aumenta la viscosidad superficial y el módulo de elasticidad. Los resultados encontrados para los alcoholes y los asfaltenos fueron ajustados según la ecuación $H/H_0 = 1/2 - \alpha \text{Log}(t/t_{1/2})$, donde la constante de decaimiento, α , está entre 0,7 y 0,9 para las espumas con alcoholes y se incrementa hasta 1,1 para las espumas con asfaltenos

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:
CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Marfisi Shirley	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	10.301.828			
	E_MAIL	shirleymarfisi@yahoo.com			
	E_MAIL				
Arturo Rodolfo	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.300.709			
	E_MAIL	rodulfo99@cantv.net			
	E_MAIL				
Lucas Álvarez	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	4.077.552			
	E_MAIL	lalvarezm57@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	05	22
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:
ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Efecto de las variables hidráulicas y de formulación sobre espumas no acuosas.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8
9.

ALCANCE

ESPACIAL: Laboratorio de Sistemas Dispersos y Ambiente (SDA). Universidad de Oriente

TEMPORAL: Un año

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Magíster Scientiarum en Ingeniería Química

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Postgrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ing. Química-Coordiación General de Postgrado

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente / Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado: “Los trabajos de grado son de la exclusividad propiedad de la universidad de oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del núcleo respectivo, el cual lo notificará al consejo universitario”

AUTOR

Alexis José Cova Bonillo

AUTOR

AUTOR

**Prof. Shirley Marfisi
(Dra.)
Tutor**

**Prof. Lucas Álvarez
(Ph.D.)
Jurado Principal**

**Prof. Arturo Rodolfo
(M.Sc.)
Jurado Principal**

Ing. Químico Marfisi Shirley (Dra.)
POR LA SUBCOMISION DE TESIS