

UNIVERSIDAD DE SONORA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**PROPIEDADES FÍSICAS DE
ESPUMAS ACUOSAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIATURA EN FÍSICA

PRESENTA

SERGIO ROMÁN MIRANDA VÉLEZ ESCALANTE

JUNIO DE 2007

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Agradecimientos

La realización de este trabajo fue posible gracias a la participación de muchas personas.

Agradezco primera y especialmente a mi familia todo el apoyo aportado en estos años.

Agradezco al Dr. Amir Maldonado por la dirección y asesoría.

Agradezco particularmente al M. en C. Alfredo Eduardo Cervantes Martínez por haber fungido en los hechos como un coasesor de este trabajo.

Agradezco a los doctores Heriberto Acuña, Ricardo López Esparza y Ernesto Hernández por sus comentarios y por haber aceptado fungir como sinodales.

Esta tesis se desarrolló en el contexto del proyecto “Propiedades Coloidales de Soluciones de Polímeros Asociativos” financiado por la División de Ciencias Exactas y Naturales con recursos PIFI.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1 “Generalidades”	4
1.1 Un poco de historia	4
1.2 Estructura de las espumas	5
1.3 La fracción líquida de una espuma	8
1.4 La tensión superficial	9
1.5 Los tensoactivos	10
1.6 Los polímeros	14
1.7 Algunas aplicaciones de las espumas	15
1.7.1 La espuma de la cerveza	16
1.7.2 Espumas en los alimentos	17
1.7.3 Fraccionación de espumas	18
1.7.4 Flotación de metales	18
1.7.5 Espumas en el combate a incendios	19
1.7.6 Espumas en la extracción de petróleo	21
1.7.7 Espumas en la descontaminación de procesos industriales	22
Capítulo 2 “Conceptos teóricos”	24
2.1 Leyes de equilibrio de Plateau	24
2.2 Estabilidad de una espuma	28
2.3 Fenómenos que desestabilizan una espuma	29
2.3.1 Maduración	29
2.3.2 Drenaje	31
2.3.3 Ruptura de las películas de la espuma	34
2.4 Efectos de polímeros sobre espumas acuosas	35
Capítulo 3 “Sistemas experimentales”	37
3.1 Métodos de preparación de espumas	37
3.1.1 Método de burbujeo a través de un tubo capilar	37
3.1.2 Método de burbujeo a través de un vidrio poroso	39
3.1.3 Método de agitación	39
3.1.4 Método de mezcla turbulenta	40
3.2 Espumas estudiadas	42
Capítulo 4 “Resultados experimentales”	44
4.1 Efectos del PEG	44
4.1.1 Espumabilidad de las soluciones	44
4.1.2 Estabilidad de las espumas	46
4.1.3 Drenaje de las espumas	47
4.2 Efecto de polímeros anfífilicos	48
4.2.1 Espumabilidad de las soluciones	49
4.2.2 Estabilidad de las espumas	50
4.2.3 Drenaje de las espumas	51
4.3 Diferencia entre los efectos producidos por el polímero hidrosoluble y los polímeros anfífilicos	53

Conclusiones

54

Bibliografía

55

INTRODUCCIÓN

Si le solicitáramos al ciudadano común, en general neófito en asuntos de ciencia y tecnología, que nos indicara cuáles son los estados en que se puede presentar la materia, probablemente se limitaría a contestar: “sólido, líquido y gaseoso”; esta respuesta, sin dejar de ser correcta, sí deja de estar completa pues ignora varias otras interesantes posibilidades, entre ellas, las espumas (aunque seguramente sería una falta decir “estado espuma” como decimos “estado gaseoso” o “estado sólido” según los usos de nuestro lenguaje), tan cotidianas a fin de cuentas en la vida de nuestro ciudadano común.

Las espumas son sistemas que, por su naturaleza compleja, se encuentran lejos aún de contar con una teoría completa que explique y describa su comportamiento, a pesar de que su estudio no es propiamente nuevo y debemos decir que sí ha tenido logros admirables en su caracterización teórica y experimental. La importancia de este tipo de sistemas es poco conocida fuera del mundo de la ciencia y la industria, sin embargo, se pone en evidencia al tomar en cuenta todos los productos humanos en los que se presentan, como por ejemplo: los jabones y detergentes, extinguidores, pastas de dientes, aislantes y por supuesto, la siempre disfrutable cerveza; además de sus múltiples presentaciones en la naturaleza, cuyo mejor ejemplo lo encontramos repetidamente en el rompimiento de las olas del siempre disfrutable mar.

Así que si el lector se ha encontrado alguna vez en la playa sentado o caminando, disfrutando de una rica cerveza y de un rico mar, seguramente buena idea tendrá del objeto de estudio de este modesto trabajo.

Pero ¿qué es una espuma? Primero debemos decir que las espumas pertenecen a un tipo de materiales conocidos como “blandos”, debido a que poseen características tanto de los sólidos como de los líquidos; de hecho podemos incluso hablar de espumas sólidas y espumas líquidas, conceptos que se explicarán unas líneas adelante.

Propiamente hablando, una espuma es un sistema de dos fases, en el cual una fase se encuentra dispersa dentro del continuo que es la otra; siendo la primera un gas, mientras que la segunda puede tratarse de un líquido (espuma líquida o acuosa) o incluso puede ser un sólido (espuma sólida). Generalmente las espumas sólidas se obtienen al solidificar la fase líquida de una espuma ídem.

Este trabajo trata particularmente sobre las espumas líquidas, así que de ahora en adelante, nos referiremos a éstas simplemente como espumas. Podemos decir que guardan (las espumas) una estructura “celular”, en el sentido de que el gas se encuentra confinado en burbujas o “células” en el volumen de la fase continua. Existe otro tipo de sistemas conocido como emulsiones, muy similar estructuralmente a las espumas; con la importante diferencia de que se trata de sistemas en los que las dos fases son líquidas.

En este trabajo hemos realizado un estudio bibliográfico de algunos conceptos importantes para el estudio, tanto teórico como experimental, de las propiedades físicas de espumas líquidas. Dicha revisión de la literatura se ha enfocado hacia conceptos que permitan comprender experimentos diseñados y realizados para estudiar el efecto de diferentes polímeros sobre espumas acuosas de un detergente bien conocido. De hecho, parte de este trabajo de tesis ha consistido en la realización de experimentos que estudian el efecto de un polímero hidrosoluble (el polietilenglicol o PEG, cuya fórmula química es del tipo $\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$), sobre las espumas líquidas de un detergente aniónico, el dodecil sulfato de sodio (SDS). Nuestros experimentos se comparan con otros realizados en el contexto del trabajo doctoral que Alfredo Cervantes Martínez realiza en el Posgrado en Materiales en la Universidad de Sonora. En este último trabajo, se ha estudiado el efecto de dos polímeros anfifílicos (el PEG-100 stearate o Myrj 59, así como el HEUR) sobre las espumas del SDS. En nuestro trabajo de tesis señalamos las diferencias y semejanzas obtenidas con los dos tipos de polímero (hidrosoluble y anfifílico).

Para ello, este trabajo se ha dividido en capítulos, cuyo contenido es a grandes rasgos el siguiente. En el capítulo 1 mencionamos algunas generalidades sobre las espumas y sobre los materiales que las forman, terminándolo con un breve listado de aplicaciones de

estos sistemas. El capítulo 2 está dedicado a algunos conceptos teóricos necesarios para la comprensión de las propiedades físicas de espumas. En particular, dado que la estabilidad de espumas es uno de los problemas más estudiados actualmente, se presentan los fenómenos que la afectan: drenaje, maduración y rompimiento de películas líquidas. En el capítulo 3 realizamos una descripción de los métodos utilizados para preparar espumas, incluyendo los que usamos en nuestros experimentos. Así mismo, se dan detalles del trabajo experimental que desarrollamos. Después, en el capítulo 4 se presentan los resultados experimentales obtenidos, los cuales se comparan con los de la tesis doctoral mencionada en el párrafo precedente. Finalmente, la tesis termina con un breve capítulo de conclusiones y recomendaciones.

La parte experimental de este trabajo se ha realizado en colaboración con Alfredo Eduardo Cervantes Martínez, estudiante del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales. El polímero HEUR utilizado fue sintetizado por el grupo de trabajo del Dr. Rogelio Gámez, en particular por Emanuel Robles.

Capítulo 1

Generalidades

En este capítulo abordamos algunos conceptos básicos necesarios para entender las espumas líquidas. Iniciamos con un breve esbozo histórico del tema de esta tesis, tras lo cual definimos algunos conceptos con los cuales se describe la estructura de una espuma. Así mismo, se presenta lo que es la tensión superficial. Además describimos el tipo de materiales necesarios para estabilizar espumas: los tensoactivos. Después de hablar someramente de los polímeros, sustancias que utilizamos en este trabajo para modificar las espumas estudiadas, finalizamos con un listado corto de aplicaciones de las espumas.

1.1 Un poco de historia

El estudio de la “materia blanda” y dentro de ésta, de las espumas, es relativamente reciente, comenzando alrededor de la década de los 50. Sin embargo, sus antecedentes pueden rastrearse hacia atrás, hasta el año 1873, en que el científico Joseph Antoine Ferdinand Plateau publicó un libro en el que resumía lo conocido hasta entonces en materia de burbujas y películas jabonosas, además de presentar en el mismo ciertas reglas y conclusiones a las que llegó por sus propios experimentos. A las reglas que llegó a formular se les conoce todavía como “reglas de Plateau ” [Weaire, (1999)], las cuales serán comentadas en el siguiente capítulo.

Para el año en que formuló dichas leyes, Plateau había quedado ciego debido a anteriores experimentos relacionados con la visión. El libro de Plateau inspiró al reconocido científico William Thompson (también conocido como lord Kelvin) en 1887 a buscar la estructura óptima, en términos de menor área superficial, en que burbujas del mismo volumen podían conformarse en una espuma. Después de un par de meses de trabajo, Thompson creyó encontrar lo que buscaba en una configuración de tetradecaedros formados por hexágonos y cuadrados (Figura 1.1.a); durante mucho tiempo, la comunidad científica pensó lo mismo, sin embargo, un siglo después se encontró una estructura ligeramente mejor en lo que respecta a minimización del área superficial, ésta compleja estructura se conforma de dodecaedros y tetradecaedros (Figura 1.1.b).

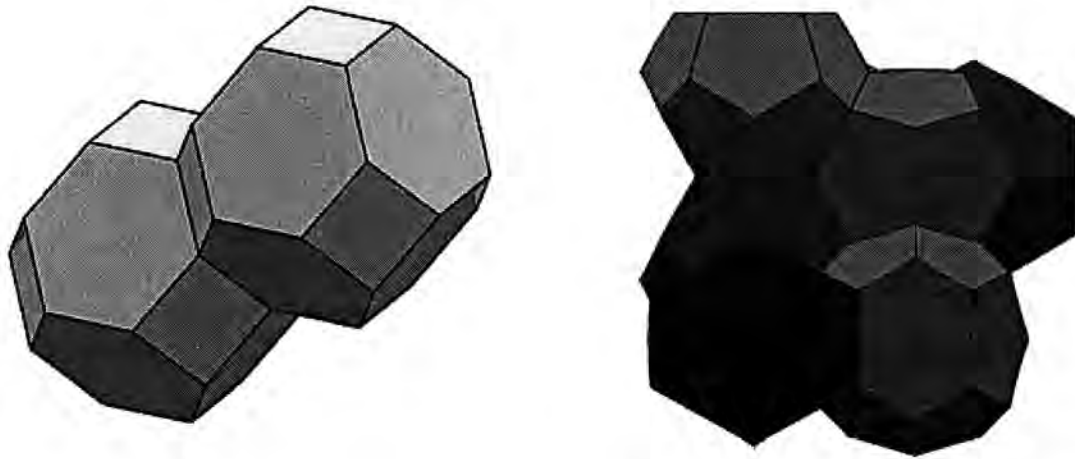


Figura 1.1 a) Configuración de Kelvin, de tetradecaedros. b) Configuración de Denis Weaire y Robert Phelan, consta de 2 dodecaedros y 6 tetradecaedros, ésta es 0.3% más eficiente que la de Kelvin, en términos de minimización de la energía superficial.

Después de 1950, se comenzó a estudiar a las espumas como un sistema de interés por sí mismo, en gran medida gracias a la visión y entusiasmo científico de un metalúrgico llamado Cyril Stanley Smith, quien demostró la viabilidad del estudio de espumas de jabón bidimensionales. Al principio, su trabajo no despertó mucho interés en general, pero sí lo hizo en particular en el caso del señor David Aboav, cuyos trabajos lo llevaron a descubrir una ley estadística que lleva su nombre. Poco a poco, y con trabajos innumerables de laboratorios físicos y químicos, el tema cobró más importancia, de manera que hoy en día es de gran relevancia para el avance de la tecnología pues entre muchas otras cosas, su estudio permite la creación de más y mejores materiales. La investigación de nuevos materiales, por su parte, es esencial para la innovación en campos tan diversos como la industria de la construcción civil, o la aeroespacial. Al final del presente capítulo hacemos una breve lista de aplicaciones de las espumas; en base a ella se puede apreciar la importancia de estos sistemas.

1.2 Estructura de las Espumas

No es difícil imaginar a grandes rasgos la estructura interna de una espuma. Se trata de una fase gaseosa dispersa en forma de burbujas dentro de una matriz líquida. Pero las burbujas no están separadas entre sí arbitrariamente. De hecho, las burbujas hacen contacto entre ellas. En esta región en la cual hacen contacto, se forman delgadas películas líquidas

que las separan. Estas películas tienen dos interfaces agua-aire, relativamente próximas entre sí, ambas estabilizadas por moléculas de materiales conocidos como tensoactivos(que serán discutidos en la sección 1.5) adsorbidos en ellas (Figura 1.2).

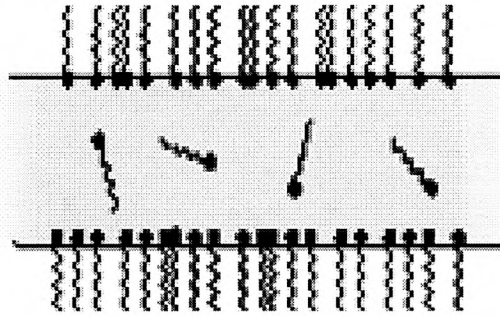


Figura 1.2 Película líquida estabilizada por un tensoactivo

Ahora, donde tres películas se unen, se forman canales rectos que son conocidos como bordes de Plateau. Estos bordes tienen sección transversal aproximadamente triangular, cuyos lados tienen una curvatura mayor a la de las burbujas que los forman, debido a la deformación producida por el contacto mismo de las burbujas (Figuras 1.3 y 1.4).

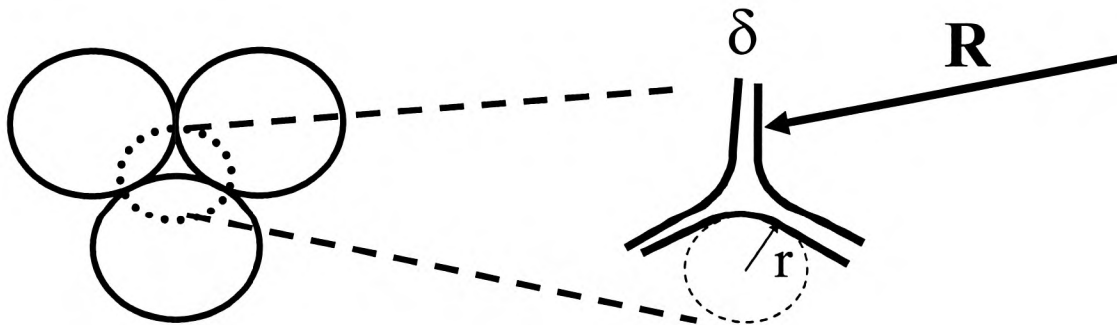


Figura 1.3 Unión entre tres burbujas para formar un borde de Plateau

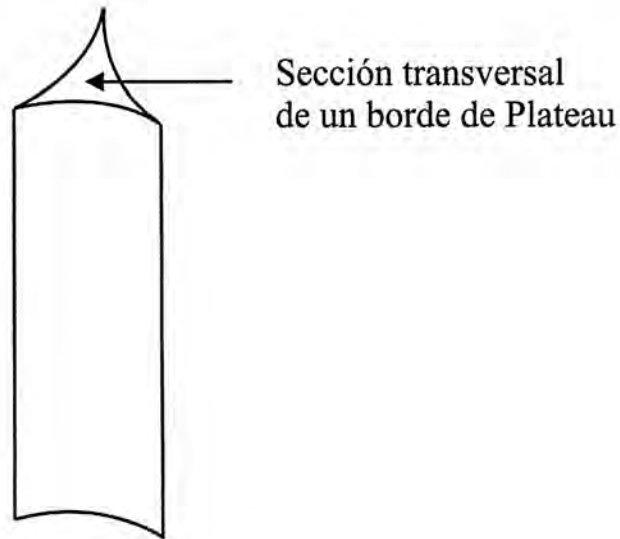


Figura 1.4 Sección transversal de un borde de Plateau

Se suele considerar para modelos teóricos que es en los bordes de Plateau donde se encuentra el líquido que contiene una espuma, ya que es donde en realidad se encuentra en mayor cantidad.

Por último, donde cuatro bordes de Plateau se encuentran, se forman vértices conocidos como nodos (Figura 1.5).

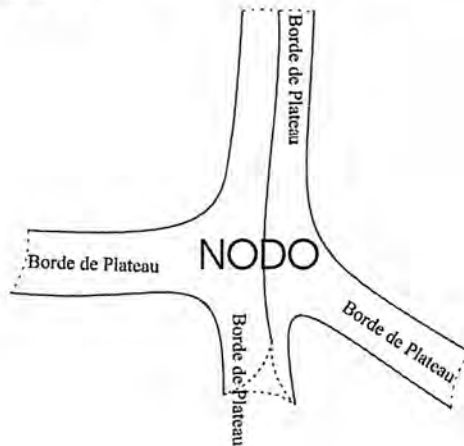


Figura 1.5 La unión de cuatro bordes de Plateau forman un nodo.

Todos estos elementos en su conjunto, dan lugar a una estructura que es una especie de red tridimensional de la fase líquida en películas, nodos y bordes, conteniendo a las burbujas de gas (Figura 1.6).

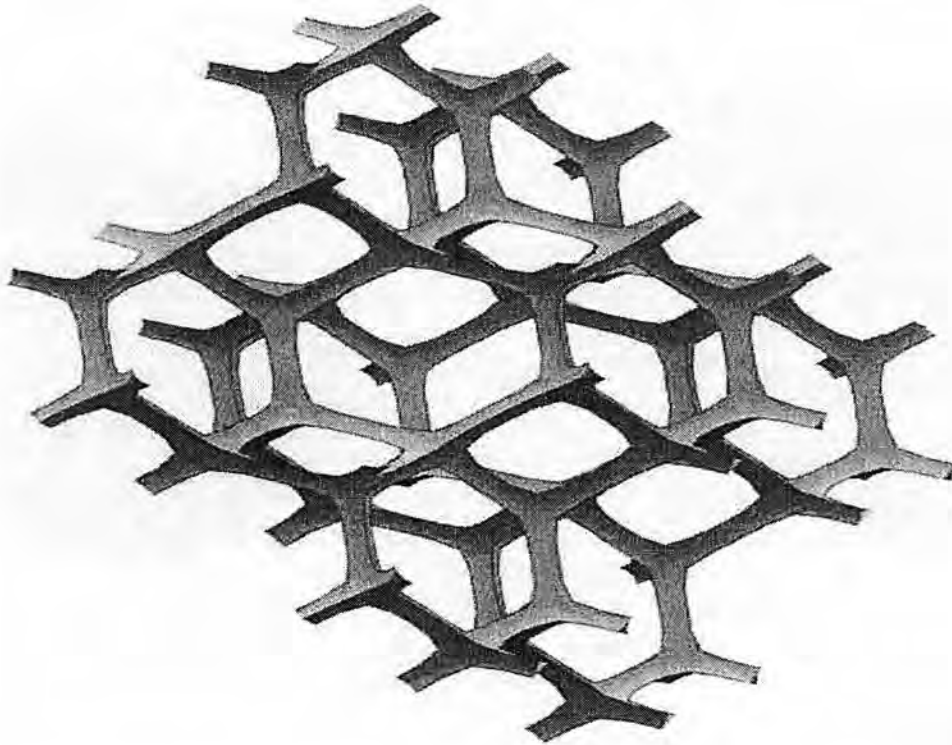


Figura 1.6 Red tridimensional formada por los nodos y bordes de Plateau

1.3 La fracción líquida de una espuma

Cuando se trata con espumas líquidas, es importante conocer qué tanto líquido contienen. Esto se expresa con el parámetro denominado fracción líquida, que es el valor adimensional obtenido del cociente del volumen del líquido contenido en una espuma (V_{liq}) entre el volumen total de la misma (V_{esp}). Es decir, la fracción líquida ξ está dada por:

$$\xi = V_{liq}/V_{esp}$$

Es importante notar que esta definición representa la fracción líquida global de una espuma. Sin embargo, en general el contenido líquido de estos sistemas es una función que depende tanto del tiempo como de la posición, $\xi(x,t)$, debido en parte a los fenómenos que describiremos en el capítulo 2. Entonces, en general, la fracción líquida se define según la fórmula anterior aplicada a cada elemento de volumen infinitesimal del sistema.

El valor de ξ dice qué tan seca o húmeda es una espuma. Específicamente, para valores entre 0.01 y 0.15 se dice que la espuma es seca. Mientras que para valores de 0.15 a 0.36, se tratará de espumas húmedas. $\xi = 0.36$ es el máximo posible por razones geométricas relacionadas con el empaquetamiento de burbujas esféricas en el espacio.

En las espumas secas se encuentra que las burbujas tienen una forma poliédrica y mientras más secas son, los bordes de Plateau se vuelven más rectos, con menor curvatura en sus lados; igualmente pasa con las películas. En espumas muy secas la estructura tiene forma tal que en un corte bidimensional semeja al de un panal de abejas.

Por el contrario, conforme el valor de ξ es mayor, las burbujas tienden a una forma más esférica y los bordes de Plateau son más anchos y con mayor curvatura en sus lados. En el valor límite $\xi = 0.36$ ocurre que las burbujas ya son completamente esféricas y la estructura de bordes, nodos y películas ya no puede definirse; por lo tanto, ya no se trata de una espuma, sino más bien de burbujas de gas aisladas dentro de un líquido. El valor $\xi = 0.36$, está definido por la fracción de volumen de empaquetamiento máximo de esferas en un volumen total dado. Dicha fracción de volumen es $\phi = 0.74$ para esferas empaquetadas en un arreglo cúbico centrado en las caras. De donde, si este valor representa la fracción máxima de volumen de aire, la fracción líquida máxima es $\xi = 0.36$.

1.4 La Tensión Superficial

La tensión superficial es la propiedad de los líquidos, por la cual la superficie de éstos tiende a comportarse como si fuera una delgada película elástica. Es lo que permite a algunos insectos “caminar en el agua” o a las hojas de los árboles “flotar” en la superficie sin encontrarse siquiera parcialmente sumergidas.

En un líquido, las moléculas están sometidas a fuerzas de cohesión entre ellas; mientras que para las moléculas del seno del líquido estas fuerzas se anulan (en promedio) debido a que cada una de ellas está completamente rodeada (en promedio también) por otras moléculas, esto no es así en la superficie, ya que una molécula localizada en esta zona no estará completamente rodeada de otras moléculas. Como consecuencia, existirá una

fuerza neta resultante sobre las moléculas superficiales, hacia el interior del líquido. Esta fuerza se manifiesta en lo que se conoce como tensión superficial γ . Las moléculas en la superficie, al estar sometidas a una mayor fuerza que el resto, tienen una mayor energía, esta energía es llamada “energía potencial superficial”. Si algún proceso resultara en el incremento de la superficie de un líquido, este resultado requeriría entonces de mayor energía, ya que más moléculas se encontrarían entonces en la superficie. Esta energía requerida por unidad de área a incrementar es la tensión superficial γ :

$$\gamma = E / A$$

Aquí “A” representa el área de la superficie y “E” a la energía potencial superficial; se puede ver en esta expresión que, como se dijo implícitamente en el párrafo anterior, para que un líquido con una tensión superficial dada tenga una mayor superficie, se requiere un mayor gasto energético y por lo tanto el volumen de un líquido adoptará la forma óptima posible, en términos de minimización de superficie. Es lo que hace que, para un volumen dado, un líquido tenga tendencia a disminuir en lo posible su superficie (en ausencia de fuerzas externas, las gotas de agua son esféricas, ya que la esfera es la forma de tener una cantidad de volumen con la menor cantidad de área posible).

Este último hecho es importante para la formación y estabilización de espumas. Si se agita un recipiente con agua pura, la energía mecánica hará que momentáneamente volúmenes de aire queden atrapados en forma de burbujas en el volumen de agua pura. Sin embargo, dado que la tensión superficial del agua es (en comparación con muchos otros líquidos) relativamente alta (72.75 dina/cm) [Rodríguez, 1999], la energía superficial relacionada con las interfaces creadas es muy alta y el sistema relaja espontáneamente hacia un estado de menor energía, donde las burbujas de aire desaparecen.

1.5 Los tensoactivos

Los tensoactivos o surfactantes, que intervienen en la formación y estabilidad de una espuma, son sustancias formadas por moléculas conocidas como anfifílicas, que

significa que tienen una parte hidrofílica, i.e., soluble en agua y otra parte hidrofóbica, que repele el agua (Figura. 1.7).

De manera que estas moléculas, estando en agua, tienden a formar entre ellas, estructuras que les permitan satisfacer sus caprichosas necesidades de “hidro-solubilidad” e “hidro-repelencia” al mismo tiempo. Los detergentes son surfactantes comunes.



Figura 1.7 Representación gráfica de una molécula anfifílica

Imaginemos que tenemos un recipiente con agua, destapado de forma que tengamos la superficie como una interface agua-aire. Ahora tomemos una cierta cantidad de surfactante imaginario vertámoslo en el recipiente, permitiendo que se mezcle con el agua. Lo que sucederá entonces, si nuestra imaginación no se desborda más allá de la realidad, es que las moléculas anfifílicas se adsorberán, ésto es, se integraran y retendrán en la superficie, de manera tal que sus partes hidrofóbicas queden expuestas al aire, mientras que las hidrofílicas permanezcan inmersas en el agua (Figura 1.8). Así es como afectan a la tensión superficial en donde se adsorban, reduciéndola. De hecho, mientras mayor es la concentración de surfactante, menor es la tensión superficial en la superficie libre del sistema.

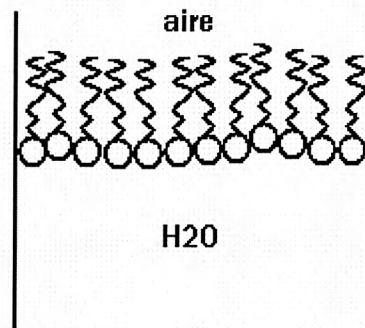


Figura 1.8 Moléculas anfifílicas adsorbidas en la interface agua-aire

Si aumentamos la cantidad de surfactante, la capa superficial se irá concentrando cada vez más, hasta que llegue un momento en el que la concentración de moléculas en el

líquido será tal que debido a condiciones químicas ya no podrá haber más moléculas en la superficie, y entonces, las excedentes bajarán al “bulto” del agua y formarán estructuras conocidas como micelas. La concentración de surfactante a la cual ésto sucede es llamada concentración micelar crítica (cmc). A partir de ese momento, la tensión superficial es constante aunque se aumente la concentración de surfactante, pues las moléculas en exceso van y forman agregados en el volumen del sistema, sin afectar la interface líquido-aire, que se encuentra saturada desde que se llega a la cmc.

Las micelas, dependiendo de varios factores químicos y/o termodinámicos, así como de la forma misma del surfactante (que de hecho, viene siendo un factor químico), pueden tener forma esférica, cilíndrica, o incluso pueden formar bicapas en lo que se conoce como “fase lamelar”, que a su vez pueden formar estructuras más complejas, como la llamada “fase esponja” (Figura. 1.9).

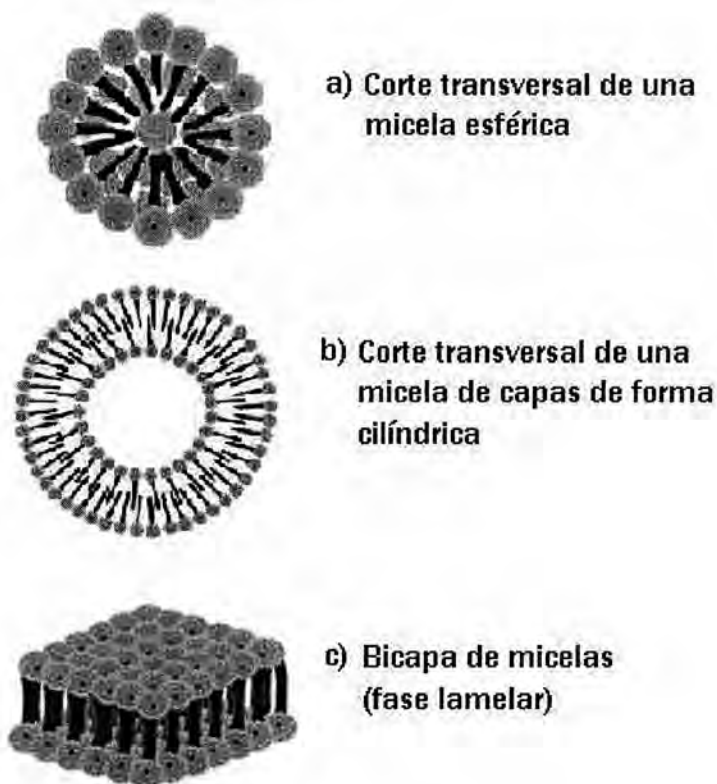


Figura 1.9 Algunas formaciones micelares.

Como hemos visto, una de las propiedades fundamentales de los surfactantes es la fuerte tendencia de adsorberse en las superficies o en las interfaces. Y es esta propiedad la que hace disminuir la tensión superficial, permitiendo así la formación y estabilización de espumas. Para ilustrar lo anterior, recordemos que una espuma consta de muchas burbujas de gas en una matriz líquida, cada burbuja teniendo una superficie propia que es la interface entre el líquido y el gas. Recordando entonces la relación entre tensión superficial, área y energía ($\gamma = E / A$); vemos que tener una tensión superficial pequeña equivale a necesitar poca energía para mantener las superficies de las interfaces, es decir, las burbujas, y por ende, la espuma.

En la figura 1.10 se especifica la constitución básica de una molécula anfifílica, se puede apreciar que constan de una cabeza polar, que es la parte hidrofílica, y de una cola hidrofóbica.

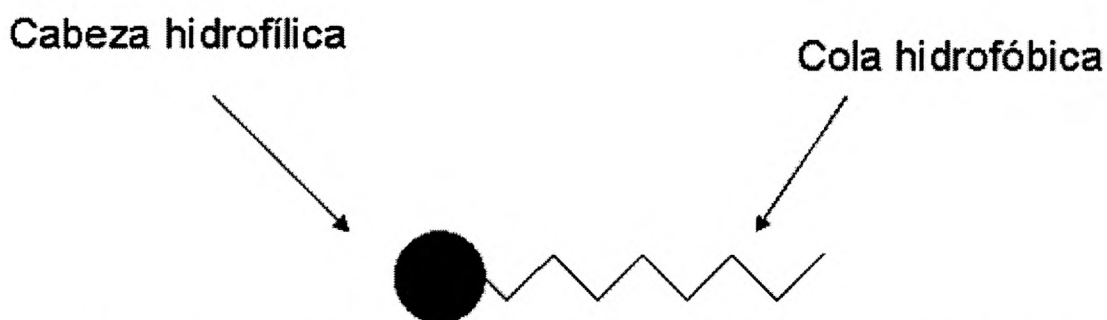


Figura 1.10 Esquema de una molécula anfifílica, donde se muestra la cabeza polar, hidrofílica y la cola hidrofóbica.

Los tensoactivos se clasifican según el signo de la carga eléctrica neta de la cabeza, éste puede ser neutro, positivo o negativo, teniendo entonces tensoactivos neutros, catiónicos o aniónicos, respectivamente. En el caso de los aniónicos, el grupo polar es derivado de un ácido carboxílico, en detergencia normalmente son grupos sulfonatos, en distintos tipos de shampoos son mayoritariamente éter sulfatos. Los catiónicos suelen ser tóxicos, suelen utilizarse como suavizantes. Además existen los tensoactivos zwitteriónicos, cuyas moléculas anfifílicas pueden adoptar una carga negativa o positiva según sean las

condiciones fisicoquímicas del sistema, esto debido a que su cabeza polar tiene una zona de densidad de carga negativa y otra positiva, un ejemplo de éstos son los fosfolípidos.

En nuestro trabajo preparamos espumas utilizando un tensoactivo muy utilizado en diferentes aplicaciones (detergencia, pastas dentales, etc): el dodecil sulfato de sodio o SDS, cuyas características principales serán descritas en el capítulo 3.

1.6 Los polímeros

El otro tipo de materiales importantes para el estudio experimental que se presenta en los dos capítulos finales son los llamados “polímeros”. Estos están constituidos por moléculas formadas por la repetición de una unidad básica, el “monómero”. En la figura se pueden ver ejemplos de diagramas representando polímeros y los monómeros que los forman. De esta manera, se pueden formar moléculas gigantes (o macromoléculas) de alto peso molecular (Figura 1.11).

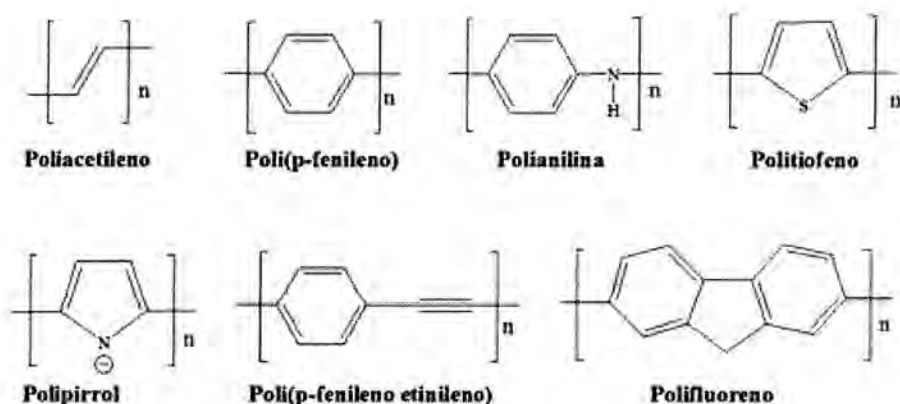


Figura 1.11 Representaciones visuales de algunos monómeros con el nombre del polímero que forman abajo.

Según el tipo de monómero que se emplee para formar un polímero, este puede tener diferentes propiedades fisicoquímicas. En este trabajo nos interesan dos clases de polímero: los hidrosolubles y los anfifílicos.

En el primer caso, se trata de polímeros hidrofílicos, esto es, que son solubles en agua. Ejemplos de estos son el polietilenglicol (PEG) y el polivinilpirrolidone (PVP).

Pero existe otro tipo de polímeros, formados por bloques tanto hidrofílicos como hidrofóbicos. Debido a su parte hidrofóbica, que los asemeja a un tensoactivo, estos polímeros tienen una tendencia a formar agregados por sí solos o a adsorberse a interfaces agua-aire o agua-aceite. Hay muchos ejemplos en la literatura de este tipo de materiales también conocidos como polímeros “asociativos”. En nuestro trabajo estudiamos dos, denominados Myrj 59 y HEUR, y cuyas características serán discutidas en el capítulo 3.

En este trabajo, estudiamos experimentalmente el efecto de agregar un polímero hidrosoluble (PEG) a las espumas formadas con un tensoactivo aniónico (SDS). Los resultados obtenidos con dicho sistema, se comparan con los resultados que Alfredo Cervantes obtuvo para dos polímeros anfifílicos: el Myrj 59 y el HEUR.

1.7 Algunas aplicaciones de las espumas

En la vida diaria, las espumas líquidas se encuentran más comúnmente en los jabones, detergentes, cremas para rasurar y en las bebidas. En muchos casos, su utilidad es mayormente psicológica, como un factor de preferencia del consumidor. ¿Qué propósito tendrían las burbujas en una lavadora, si no el de indicar que uno no ha olvidado usar el detergente? [Weaire, (1999)]. Las propiedades espumantes de los jabones y shampoos son frecuentemente consideradas como inútiles [Weaire, (1999)]. Pero ciertas propiedades reológicas son útiles al permitir a la espuma adherirse a superficies verticales (la cara del que se rasura, o la pared de una fábrica) antes de ser enjuagada. Esta habilidad de cubrir superficies sin inmediatamente escurrirse es útil también en el combate de incendios.

En ingeniería química, las espumas pueden ser usadas para separar impurezas a través de procesos llamados flotación y filtración de espumas.

Una aplicación recientemente publicada se trata de un sustituto para medios más violentos de control de desorden civil [Weaire, (1999)]. Ser envuelto en una espuma es un medio de arresto relativamente inofensivo. De hecho, puede ser un placer positivo, como lo

demuestra la popularidad de las fiestas de espuma en algunos clubs nocturnos [Weaire, (1999)].

Muchos procesos industriales que se usan en la industria textil, tales como el lavar, secar o pintar, requieren ciertos químicos actuando en grandes extensiones de área. El uso de espumas como transportador de agentes químicos reduce considerablemente la cantidad de agua requerida y por lo tanto también el volumen de desperdicios secundarios.

La misma justificación para el uso de espumas se ha dado en la descontaminación de materiales dentro de un reactor nuclear.

La supresión de la espumabilidad también ha consolidado una pequeña industria. Agentes antiespumantes de muchos tipos son usados regularmente o como emergencia, siempre que se produzcan espumas indeseables. En reactores gas-líquido, separadores de gas-aceite, y bombas, siempre que líquido y gas se mezclen, una espuma podría formarse. Las consecuencias pueden ser catastróficas si, por ejemplo, se permite que persista y subsecuentemente entre al compresor de gas.

La espuma de la cerveza

La cerveza y la trágicamente feliz (o felizmente trágica, dependiendo del caso) afición humana hacia ella, ha existido desde hace miles de años, pero no su espuma [Wolfgang, 1998]. Hoy en día, además del sabor, un factor importante para la industria cervecera es la formación y estabilización de espumas, ya que éste es esencial para una buena comercialización.

La producción de cerveza debe tener cuidado de elaborar una espuma que sea del tipo tradicional para esa cerveza particular. En algunos casos una excesiva espumabilidad causa dificultades en el mismo proceso de elaboración, y se hace uso en ocasiones de antiespumantes. Mientras que en algunas regiones del mundo la espuma en la cerveza es totalmente indeseable, en otros ocurre todo lo contrario.

La espuma en la cerveza es creada al momento de abrirse la botella o barril (o envase contenedor del que se trate) como resultado de la formación de burbujas de CO₂ debido a la súbita reducción de la presión. Las burbujas de CO₂ colectan materiales surfactantes al subir a la superficie. Mientras más CO₂ contenga disuelto la cerveza, mayor cantidad de espuma será formada [Wolfgang, 1998].

En la cerveza, los surfactantes son proteínas naturales y en algunos casos, tienen que añadirse para tener una espuma satisfactoria. Se conocen varias proteínas que se cree son las mayormente responsables de la estabilidad de la espuma en las cervezas, y de ellas se cree que la principal es la llamada LPT1, por sus siglas en inglés (Lipid Transfer Protein 1) [Wolfgang, 1998]. Nitrógeno disuelto (además del CO₂) ha resultado ser útil en la creación de una buena y estable espuma.

Ejemplos de sustancias que favorecen la estabilidad de la espuma en la cerveza son: Nitrógeno coagulable, Nitrógeno de elevado peso molecular, isohumulones. Ejemplos de sustancias que afectan negativamente a la estabilidad de la espuma en la cerveza son: alcohol, anthoeyanógenos, polipéptidos de bajo peso molecular [Wolfgang, 1998].

Existen factores involucrados en la levadura, en la fermentación y en el proceso de almacenamiento que afectan generalmente de manera negativa a la obtención de una espuma estable. Este es un buen ejemplo de un desarrollo práctico basado mayormente en la experiencia y en la prueba y error, pero la formación de espumas por mezclas de gases es un tópico que requiere futura investigación. El placer de algunos clientes por la espuma de la cerveza se extiende a la admiración del patrón que produce el residuo de la espuma en el vidrio del vaso o tarro en el que se bebe. Este es otro punto que interesa a los productores de cerveza.

Espumas en los alimentos

Muchas espumas líquidas son producidas en la cocina, usualmente por batido. El ejemplo clásico es la clara de huevo, cuyas proteínas constituyentes proveen de buenos surfactantes, mientras que la yema del huevo contiene partículas de grasas que actúan como

antiespumantes. El cremor tártaro (ingrediente especialmente utilizado en repostería) actúa como un agente estabilizador.

Paradójicamente, la estabilidad de la crema batida se atribuye a agregados de glóbulos de grasas. Es el proceso continuado de agregación el que produce mantequilla, siguiendo con el batido.

Una estructura más compleja y más variable es encontrada en la nieve o helado, que es tanto una espuma como una emulsión, con cristales de hielo y posiblemente también un componente gel.

La grasa de la leche también suele ser precursora de espumas en la cocina y en la industria alimenticia. Juega un rol importante, pero poco comprendido en las propiedades estructurales de muchos productos lácteos [Pilhofer,1994]. La estabilidad de una espuma que contiene partículas de grasa puede depender tanto del tamaño como de la composición de las partículas de lípidos [Anderson, 1988].

Fraccionación de espumas

Mezclas de soluciones con diferentes actividades superficiales, como por ejemplo tintes, pueden ser separadas con el uso de fraccionación de espumas [Prud'homme, 1996]. Aquí, un soluto se adsorbe en la superficie de burbujas que son creadas dentro de una columna de fraccionación soplando aire a través de un recipiente con líquido al fondo de la columna. Al subir la espuma, carga consigo con el soluto. La espuma se mueve como un todo a través de la columna, lo cual añade problemas al análisis del sistema [Prud'homme, 1996].

Flotación de metales

La flotación es un proceso usado en la separación de metales que se encuentran mezclados en minerales obtenidos en la industria minera. Es una operación de suma importancia en dicha industria; mundialmente, un gran porcentaje de la producción de cobre, zinc, níquel, plomo, y antimonio (todos metales) son obtenidos por procesos de

flotación [Prud'homme, 1996]. Éste proceso hace uso de las diferentes “solubilidades” de las sustancias para segregar mezclas.

Un mineral finamente sedimentado se suspende en un líquido espumante que es posteriormente agitado. La segregación se da debido a la diferente “solubilidad” de los varios componentes del mineral. Una partícula de mineral baja en metales tiene un carácter hidrofílico, de manera que es mojado y drena a través de la espuma. Los componentes que son ricos en metales y por lo tanto hidrofóbicos permanecen en la espuma; obteniendo de ésta manera, la separación de los metales.

Aunque el separar metales de minerales es probablemente el uso más difundido de éste proceso, no es el único. El mismo proceso puede ser aplicado en la limpieza del carbón. El carbón es hidrofóbico por sí mismo y es recobrado de la espuma, mientras que otros componentes se quedan en el líquido drenado [Prud'homme, 1996].

También se usa para la separación de muchos otros materiales, como el caso de biomoléculas o de iones. Igualmente ha encontrado un uso práctico en la industria del reciclaje de papel, separando por ejemplo las partículas de tinta del papel.

Espumas en el combate a incendios

La utilización de mezclas de aire o gases con agua en la forma de espuma para el combate a los incendios se volvió críticamente necesaria al comienzo del siglo XX, debido al gran auge y diversificación de los combustibles líquidos basados en hidrocarburos [Silvia, 1976]. El agua, nuestro milenario extintor natural no podía efectivamente seguir cumpliendo esa función, debido a que su densidad es mayor que la de los líquidos inflamables. El problema con esto último reside en que las llamas formadas en la superficie del líquido inflamable, difícilmente son afectadas por el rápido tránsito del flujo o las gotas de agua, a través de la zona de incendio hacia el nivel del fondo del líquido inflamable, en donde finalmente permanece inútil. Incluso, de esta manera el agua empeora el problema ya que, al desplazar volumen de líquido inflamable, promueve su esparcimiento a un área mayor. Así que la solución obvia era intentar reducir la densidad del agua para poder cubrir

efectivamente el líquido flamable; ésto se logró mediante el uso de espumas. El mayor uso de espumas en el combate a incendios ha sido hasta ahora en este tipo de situaciones [Silvia, 1976].

El manto de espuma debería quedar intacto lo más posible para reducir el riesgo de reignición del fuego, una vez que se haya extinguido. Por lo tanto, es deseable una espuma de lento drenado. La espuma necesita ser resistente al calor, lo que a su vez, hace desear espumas con una fracción líquida alta. Sin embargo, el área de cobertura de la espuma producida por unidad de tiempo disminuye al aumentar la fracción líquida, así que depende de las circunstancias particulares del incendio en cuestión, el tipo de espuma que deberá ser usada para su extinción.

Su aplicación actualmente no se limita a los líquidos flamables, sino a diversos tipos de incendios, variando las características deseadas de la espuma según sea el caso.

Generalmente, un incendio necesita tres condiciones para esparcirse: combustible, oxígeno y calor. Una vez que este triángulo de fuego se rompe, removiendo uno de los tres constituyentes, el incendio se terminará.

Las espumas usadas en el combate al fuego pueden atacar los tres factores: primeramente, excluyendo el oxígeno de la zona de combustión; en segundo lugar, enfriando el combustible por debajo de su punto de ignición; y finalmente atrapando el vapor de combustible en la superficie líquida.

Las espumas para combatir incendios se clasifican de acuerdo a su fracción líquida ξ o a su razón de expansión. Existen espumas de baja (5 : 1 a 20 : 1), media (arriba de 200 : 1) y alta expansión (arriba de 1000 : 1) [Silvia, 1976].

Las espumas de expansión media y baja son producidas con el uso de pipas ramificadas, que son dispositivos que se usan para ventilar una solución espumante. Estas espumas pueden ser disparadas como “spray” desde una distancia de 10 a 20 metros.

Aumentar el radio de expansión reduce la resistencia al calor pero un área mayor puede ser cubierta por unidad de tiempo. También, cuanto más ligera es una espuma, más fácil se asienta en la superficie de un combustible líquido sin agitarlo. Espumas de alta expansión son producidas disparando la solución espumante a una red por la cual el aire atraviesa. Debido a su peso ligero, las espumas de alta expansión no pueden ser arrojadas a distancias considerables, sino que deben ser aplicadas directamente en el fuego. Sus aplicaciones son frecuentemente en extinguidores automáticos instalados dentro de edificios, ya que pueden rápidamente llenar grandes espacios. La sequedad de la espuma también tiene la ventaja de que la gente cubierta por ésta es aún capaz de seguir respirando. El peso ligero causa problemas para aplicaciones al aire libre, donde la espuma puede ser llevada por el viento. También drena muy rápido y tiene poca resistencia al calor.

La composición química de las espumas extinguidoras es tal que éstas tengan una deseada resistencia al calor. También incrementa la formación de capas en la superficie de los combustibles líquidos. Así mismo, debería ayudar a dispersar la espuma en la superficie.

Las propiedades de drenaje son probadas por el llamado método de “drenaje de un cuarto”, que también es llamado experimentalmente como “drenaje-libre”. La espuma producida por una pipa con una cantidad definida de solución espumante es recolectada y es medido el tiempo que toma el drenar a un cuarto de la solución fuera de la espuma. Las espumas son probadas para su capacidad de combatir incendios provocando pequeños fuegos con determinadas extensiones. Luego, es medido el tiempo que toma el reducir el área del fuego en un 90% una vez aplicada la espuma. Pruebas adicionales incluyen determinar cuánto tarda en reiniciarse el fuego después de ser contenido.

Espumas en la extracción de petróleo

La técnica estándar de extracción de petróleo consiste en inyectar agua en la formación geológica para forzar al petróleo a salir. Sin embargo, ésta técnica deja alrededor del 50% del petróleo en el lugar, disperso en gotas a través de poros en las rocas [Prud'homme, 1996]. Para recoger este petróleo residual, las fuerzas de tensión

interfaciales deben ser alteradas añadiendo los químicos apropiados. Esto incrementa los costos de extracción, así que conviene distribuir los químicos en una espuma.

Como la espuma debe ser bombeada a través de los poros de las rocas, es deseable un entendimiento detallado del comportamiento del flujo de espumas en tales materiales, por lo cual es importante conocer la viscosidad efectiva del sistema en cuestión [Prud'homme, 1996].

Diferentes situaciones se dan, variando distintos parámetros de la espuma, por ejemplo, podemos tener burbujas del tamaño aproximado de los poros, en cuyo caso, el flujo podría ser muy diferente del correspondiente a otro tamaño de burbujas.

Aparte de cargar los químicos hasta las gotas de petróleo, las espumas tienen otros usos en la extracción de dicho aceite mineral, por ejemplo sellar espacios para controlar el movimiento de agua, o también la limpieza de la arena de los pozos.

Espumas en la descontaminación de procesos industriales

Hoy en día existen varios métodos utilizados en la descontaminación o limpieza de complejos industriales. Dichas instalaciones, suelen constar de multitud de elementos de las más diversas formas, tales como válvulas, cámaras, turbinas, engranes, cámaras térmicas, etc. Lo anterior, provocaba, hasta el año de 1993, que la eficacia de los métodos de limpieza existentes hasta entonces fuera muy baja, o la aplicación de ellos muy complicada. Los métodos en esencia se pueden clasificar en físicos, electroquímicos y químicos; siendo éstos últimos clasificables en líquidos, geles y, desde 1993, espumas [Prud'homme, 1996].

En el año mencionado, se validó por primera vez la eficacia del uso de espumas como medio aplicador de agentes limpiadores a escala industrial [Prud'homme, 1996]. Éste método muestra varias ventajas, la mayor de las cuales es la necesidad de menores cantidades de líquido y la consiguiente reducción en el volumen de desechos secundarios. Además, las espumas son susceptibles de ser forzadas a alcanzar superficies contaminadas que serían de difícil o imposible acceso mediante el uso de otros métodos; otras ventajas

concernientes al manejo del producto hacen del método de utilización de espumas uno de alta eficacia en la limpieza industrial. La eficacia en la limpieza industrial es de suma importancia, ya que se traduce en mejores ganancias económicas y ecológicas al aprovechar mejor los recursos.

Con todos estos ejemplos de aplicaciones, nos podemos formar una idea de la importancia que tiene en la actualidad el estudio de las espumas líquidas. En el siguiente capítulo, abordaremos algunos conceptos teóricos que permiten profundizar en la comprensión de estos sistemas, y en particular en el entendimiento de la estabilidad de una espuma, fenómeno de gran importancia en todas las aplicaciones.

Capítulo 2

Conceptos teóricos

En este capítulo presentamos algunos elementos teóricos necesarios para la comprensión de algunas propiedades estructurales y dinámicas de una espuma. En particular, discutimos el problema de la estabilidad de una espuma, así como los tres fenómenos que la desestabilizan: la maduración, el drenaje y el colapso de las películas. Finalmente, comentamos algunos resultados referentes a la utilización de polímeros para la estabilización de espumas acuosas.

2.1.- Reglas de equilibrio de Plateau

Como se ha dicho en el capítulo precedente, una espuma acuosa es una dispersión de un medio gaseoso en una matriz líquida. Dependiendo de la fracción líquida de la espuma, se puede hablar de espumas con bajo contenido en agua, “espumas secas”, donde la fracción líquida es del orden: $\xi < 0.15$. Para mayores contenidos de agua, las espumas se denominan “húmedas”. En éstas últimas, las burbujas gaseosas son esféricas, mientras que en el caso de espumas secas, las espumas son poliédricas. En este último caso se habla del límite de espuma “seca”, el cual es más sencillo de analizar teóricamente.

En el límite de espuma “seca”, Joseph Plateau enunció tres reglas empíricas que describen la estructura de una espuma en equilibrio. Dichas reglas fueron publicadas en 1873 en el libro “Estática experimental y teórica de líquidos sometidos solamente a fuerzas moleculares”. Cabe aclarar que dichos resultados se aplican a espumas que han adquirido una configuración poliédrica después de un cierto tiempo de ser fabricadas. Sin embargo, dichas espumas no están en estados propiamente de equilibrio, pues si se les deja evolucionar conforme pasa el tiempo, eventualmente las espumas desaparecen. Sin embargo, el lapso temporal requerido para esto puede ser muy grande, por lo que las reglas de Plateau pueden ser útiles para modelar espumas en escalas de tiempo más cortas. De

hecho, tales reglas se utilizan en trabajos de simulación por computadora del comportamiento de espumas [Weaire, (1999)].

Las reglas de Plateau son las siguientes:

1.- Primera Regla de Equilibrio.- En el caso de espumas secas, las películas de la espuma se intersectan de tres en tres, y lo hacen a un ángulo de 120° , para formar los bordes de Plateau. En dos dimensiones, esta regla se aplica a las líneas que definen las fronteras de las celdas gaseosas.

Esta regla es producto de la observación. De hecho, más de tres películas pueden intersectarse en un momento dado, pero se observa que esta unión es inestable y da lugar a una separación espontánea en uniones de tríos de películas, tal como se observa en la figura 2.1. Esto ocurre debido a que la energía se minimiza en este caso. Por simetría, el ángulo formado entre pares vecinos de las películas de la unión es 120° .

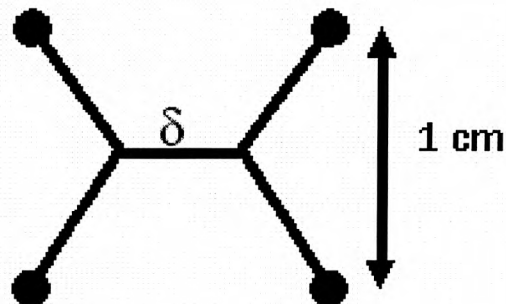


Figura 2.1.- Esquema utilizado para mostrar la validez de la Primera Regla de Equilibrio de Plateau. La figura representa dos intersecciones de tres películas cada una, separadas una distancia δ . Se supone que los extremos de las películas están en los vértices de un cuadrado de lado 1. Las películas se extienden en tres dimensiones en la dirección perpendicular al plano de la hoja.

La observación que da lugar a esta regla de equilibrio puede ilustrarse en términos de minimización de la energía superficial. Por ejemplo, comparemos una unión de cuatro

películas con el caso de dos uniones de tres películas; por simplicidad, consideremos los extremos fijos en un cuadrado digamos de lado 1cm (puede ser lo que sea para esta ilustración) (Figura 2.1).

Siguiendo al esquema de la figura 2.1, podemos ver que para el caso de una unión de 4 películas, δ debe valer cero. Cualquier otro valor mayor que cero y menor que uno representa el caso de 2 uniones de 3 películas. Para $\delta = 1$, puede apreciarse que ya se trata de 2 uniones de 2 películas.

Dado que en ambos casos la tercera dimensión de las películas (perpendicular al dibujo) tiene el mismo valor, el área superficial y por lo tanto, la energía superficial es proporcional simplemente a la longitud total de todas las líneas del dibujo, sea esta longitud “L”.

Se puede mostrar que hay un valor de δ , distinto de cero, para el cual la longitud total “L” (y por lo tanto la energía superficial) es mínima, tal como se ilustra en la figura 2.2. Un simple cálculo geométrico arroja el valor de L en función de δ resultando que $L = \delta + 2\sqrt{2 - 2\delta + \delta^2}$; éste resultado es el que se grafica en la figura 2.2.

Puede apreciarse en la gráfica, que para el caso de una unión de 4 películas ($\delta = 0$) $L = 2\sqrt{2}$, y para el otro extremo ($\delta = 1$), $L = 3$.

La forma de la curva muestra entonces que hay un valor de δ distinto de cero para el cual L y por ende, la energía superficial, es mínima. Lo anterior nos ilustra entonces que una configuración de 2 uniones de 3 películas requiere de menos energía superficial que una unión de 4 películas.

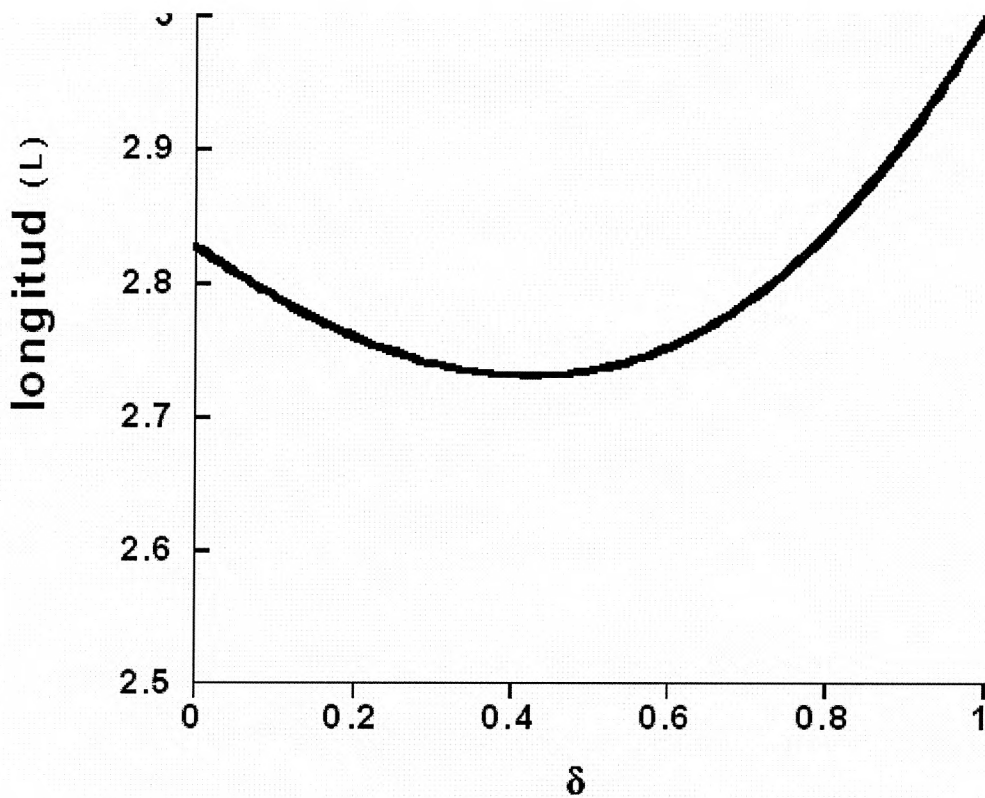


Figura 2.2.- Gráfica calculada para la geometría de la figura 2.1. En el eje vertical se representa la longitud de la línea de las películas (proporcional a su área), en función de la distancia de separación entre las dos uniones de tres películas δ . El cálculo muestra que hay un valor de δ donde la longitud (y por lo tanto el área) es mínima. En ese valor, la energía superficial es mínima y por lo tanto las películas tienden a estar en esa configuración con dos intersecciones triples (en vez de una cúadruple).

2.- Segunda Regla de Equilibrio.- En el caso de espumas secas, en cada vértice de la estructura se unen cuatro bordes de Plateau en una geometría tetraédrica simétrica. El ángulo entre los bordes de Plateau se llama “ángulo de Maraldi” y su valor es

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{-1}{3}\right).$$

3.- Tercera Regla de Equilibrio.- La unión entre bordes de Plateau y películas adyacentes ocurre suavemente, siendo la normal a la superficie una función continua a ambos lados de la intersección.

A estas reglas experimentales, se suma el llamado “Teorema de Decoración” para espumas bidimensionales, el cual dice como extender estos principios al caso de una espuma húmeda. Dicho teorema dice que una espuma húmeda bidimensional puede obtenerse a partir de una espuma seca, sustituyendo las líneas por los bordes de Plateau, donde se concentra la mayor cantidad de agua. Este teorema no tiene equivalencia tridimensional, pero conceptualmente se puede aplicar de manera aproximada a espumas en tres dimensiones.

2.2.- Estabilidad de una espuma

Una de las propiedades que más interesan en el estudio de las espumas es la de su estabilidad. En ciertas aplicaciones es importante tener espumas estables, mientras que en otras se desea que las espumas desaparezcan rápidamente. Por ello, el control de la estabilidad de espumas es un problema que está recibiendo mucha atención actualmente. Aunque aún queda mucho por entender sobre cuáles son los factores que estabilizan o desestabilizan una espuma.

Se ha encontrado que el volumen de una espuma fabricada por cualquier método decrece exponencialmente con el tiempo. Si la espuma está en condiciones controladas y en un recipiente de sección transversal constante, se puede afirmar que la altura de la espuma decae exponencialmente:

$$h(t) \propto e^{-\alpha t}$$

Esta es una ley experimental que se cumple en muchas ocasiones, por ejemplo en la evolución de la espuma de cerveza [Weaire, (1999)]. Sin embargo, no existe una teoría que prediga exactamente de qué factores depende el parámetro de decaimiento α . Este parámetro puede obtenerse a partir de un ajuste en un experimento.

En principio toda espuma es inestable pues tiende a desaparecer con el paso del tiempo. Sin embargo, la estabilidad se puede describir en términos de la escala de tiempo típica del experimento o de la aplicación con la que se trabaja. Si el tiempo de decaimiento de la espuma es mucho mayor que el tiempo típico del experimento, la espuma puede considerarse estable en este caso. Por el contrario, si el tiempo de decaimiento es del orden o más pequeño que el tiempo típico del experimento, la espuma puede considerarse inestable.

2.3.- Fenómenos que desestabilizan una espuma

Aunque no existe una teoría exacta y detallada que describa la estabilidad (o la desestabilización) de una espuma, se sabe que hay tres procesos que afectan el tiempo de vida del sistema. Estos procesos son: la maduración, el drenaje y la ruptura de las películas. A continuación describiremos algunas características de cada uno de ellos.

2.3.1.- Maduración

La maduración es el proceso mediante el cual el gas que forma una espuma pasa de burbujas de tamaño pequeño a burbujas de tamaño grande. Este proceso lleva eventualmente a la desaparición de la espuma (Figura 2.3). Cuando burbujas de distintos tamaños se encuentran en la vecindad una de la otra, el gas de la de menor tamaño pasa hacia la mayor, haciendo que las burbujas grandes crezcan a expensas de las pequeñas, que terminan por desaparecer. Una explicación más extensa puede encontrarse en la referencia [Weaire, (1999)].

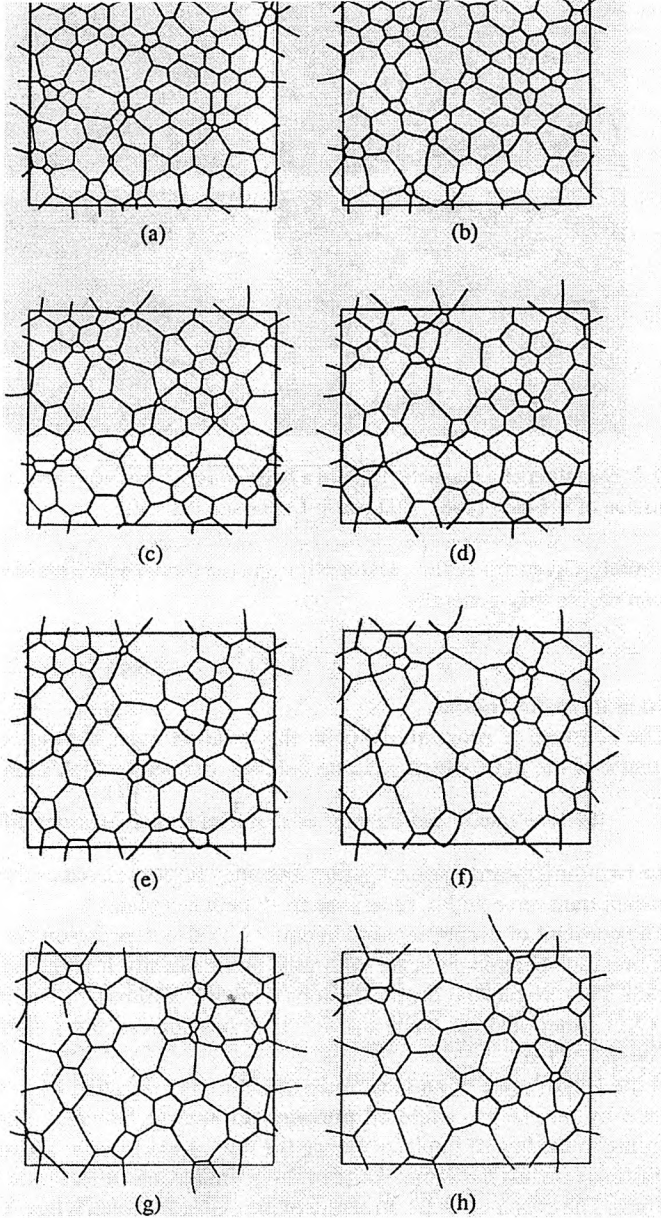


Figura 2.3.- Secuencia simulada de espumas bidimensionales conforme avanza el proceso de maduración [Weaire, (1999)].

2.3.2.- Drenaje

Cuando una espuma se fabrica mediante cualquier procedimiento, el sistema tiene un contenido acuoso dado por la fracción líquida $\varepsilon(x,t)$, la cual es una función tanto de la posición como del tiempo. Dado que la espuma está sujeta a la fuerza de gravedad, el líquido que la constituye tiende a fluir por los canales definidos por los bordes de Plateau. A este movimiento de líquido, que hace que la espuma se seque primeramente de su parte superior, se le conoce como drenaje. Es un factor que influye también en la desestabilización de una espuma pues el drenaje lleva a una transición de una espuma húmeda a una seca y puede llevar eventualmente a la desaparición de la misma.

Estudiar el drenaje es un problema muy complejo pues debe considerarse el flujo de líquido a través de la intrincada red de canales definidos por los bordes de Plateau. En primer aproximación, puede considerarse la hidrodinámica del flujo de líquido en un canal de sección circular. Los efectos que en este caso sintetizado se presentan, pueden extrapolarse a una red tridimensional de tales canales conectados en vértices tetraédricos (segunda regla de equilibrio de Plateau).

En ese caso, la rapidez del flujo, y por lo tanto del drenaje, dependen tanto de la geometría del sistema, como de las variables hidrodinámicas del mismo. En particular un parámetro importante es la viscosidad, que es el equivalente a la fricción entre las láminas de un fluido, (para una explicación más detallada ver la referencia [Resnick, 1998]). Se puede distinguir entre dos tipos de viscosidad: la viscosidad volumétrica de la solución líquida η , así como la viscosidad superficial de la interface agua-aire, η_s . Ambos parámetros determinan el tipo de flujo que ocurre en los bordes de Plateau.

Por ejemplo, en el caso límite donde la viscosidad interfacial no es relevante, es decir si las paredes de los bordes de Plateau se deslizan ante cualquier esfuerzo de corte, la velocidad del fluido no será influenciada por las paredes y se tendrá un perfil de velocidades plano (Figura 2.4). En ocasiones, a este flujo se le llama tipo “tapón”.

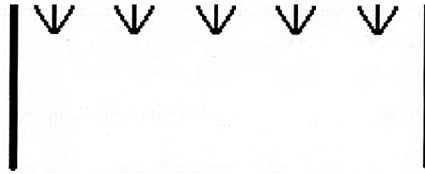


Figura 2.4.- Perfil de velocidades tipo “tapón” en un canal de sección circular constante.

Por otra parte, si tanto la viscosidad superficial como la volumétrica son importantes, el perfil de velocidades no será plano, sino del tipo “Poiseuille”. Este perfil puede calcularse a partir de la definición newtoniana de viscosidad:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

donde $\frac{F}{A}$ es el esfuerzo de corte al cual está sometido el fluido y $\frac{dv}{dx}$ es el gradiente de velocidad en dirección perpendicular a las capas de fluido que se mueven. En el caso de una geometría cilíndrica, la ecuación anterior puede integrarse fácilmente para obtener la velocidad en función de la distancia r a partir del centro del canal cilíndrico de radio R :

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$

donde ΔP es la diferencia en presión entre los extremos del canal y L su longitud. Esta ecuación da lugar al perfil parabólico mostrado en la figura 2.5. A este tipo de flujo se le denomina tipo “Poiseuille” y ocurre de manera más lenta que el flujo “tapón”.

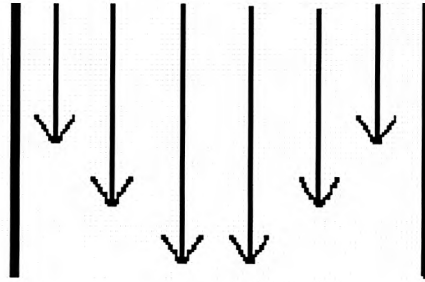


Figura 2.5.- Perfil de velocidades tipo “Poiseuille” en un canal de sección circular constante.

En la práctica se han observado sistemas donde ocurre una transición entre ambos tipos de flujo [Cervantes, 2005]. Tal transición puede describirse en términos del parámetro adimensional

$$M = \frac{\eta a}{n_s}$$

donde a es el radio de los bordes de Plateau. Cuando la viscosidad superficial tiene un valor importante, la velocidad de flujo en las paredes de los bordes de Plateau puede considerarse cero, y esto da lugar a un flujo tipo Poiseuille. Se ha observado que esto ocurre cuando $M < 0.1$. En caso contrario, el flujo es del tipo tapón. Dado que la rapidez de drenaje puede determinar la estabilidad de una espuma, y a su vez dicha rapidez puede modificarse al cambiar las viscosidades del sistema, es posible apreciar que agregar aditivos puede ser determinante en el control de la estabilidad de una espuma.

Debido a la complejidad del fenómeno de drenaje, que implica el flujo de líquido a través de la intrincada red definida por los bordes de Plateau y que depende de las propiedades fisicoquímicas de cada sistema, no existe una teoría general que describa el drenaje en una espuma. Sin embargo, en ciertas aproximaciones se han derivado teorías que se acercan parcialmente a la descripción del problema. Una de esas teorías da lugar a la que se conoce como “ecuación del drenaje”, que es una ecuación diferencial que en principio

permite calcular la fracción líquida como una función de la posición y del tiempo, $\varepsilon(x,t)$, en una espuma cuyo líquido drena.

Las principales hipótesis empleadas para llegar a ella son:

1. El flujo ocurre entre los bordes de Plateau, los cuales se consideran canales rectos, que forman una red tridimensional de uniones tetraédricas simétricas;
2. El flujo en cada borde de Plateau es del tipo Poiseuille.

Existen algunas soluciones a la ecuación de drenaje que describen resultados experimentales. Una primera solución analítica, describe lo que se conoce como solución de “onda solitaria”, fenómeno que ha sido observado en algunos sistemas [Weaire, (1999)]. Otro caso es la conocida como aproximación de Kraynik, empleada cuando la fracción líquida varía muy lentamente con la posición, de tal forma que se pueda despreciar el segundo término en el paréntesis de la ecuación. La solución obtenida con la aproximación de Kraynik también ha sido observada experimentalmente [Weaire, (1999)].

Sin embargo, la mayoría de los estudios experimentales del drenaje de espumas no son explicables mediante una teoría general. Para cada caso particular hay que considerar las condiciones específicas del experimento.

Para efectos de nuestro estudio, basta decir que la adición de polímeros, ya sea hidrosolubles o anfifílicos, podría modificar ya sea la viscosidad de bulk o la superficial, lo cual tiene su efecto sobre el drenaje de las espumas. De hecho, se espera que si la viscosidad aumenta considerablemente debido al polímero, los tiempos de drenaje aumenten y por lo tanto la estabilidad de la espuma [Goddard, 2005].

2.3.3.- Ruptura de las Películas de la Espuma

El último mecanismo que desestabiliza una espuma es la ruptura de las películas líquidas que separan a las burbujas de aire. La repetición de este proceso lleva a la desaparición completa de la espuma.

Muchos factores pueden afectar en este fenómeno. De hecho, el drenaje hace que las películas líquidas se adelgacen, lo cual puede facilitar su ruptura. La evaporación de líquido puede jugar un papel similar. Factores como la concentración de surfactante, la presencia de polvo o de impurezas en la espuma también pueden llevar al colapso de las películas.

Los mecanismos que llevan a la ruptura de una película líquida no son cabalmente entendidos. De hecho, se trata de un tema de investigación contemporáneo. Incluso, hay materiales llamados “antiespumantes” que destruyen una espuma induciendo el rompimiento de las películas líquidas. Generalmente su naturaleza es hidrofóbica, pero el mecanismo exacto mediante el que actúan no se conoce actualmente.

2.4.- Efectos de polímeros sobre espumas acuosas

La agregación de un polímero a la solución con la que se prepara una espuma puede modificar las propiedades espumantes de la solución, así como las propiedades de la espuma formada.

Por ejemplo, un polímero soluble en agua, como el polietilenglicol (PEG) o el polivinipirrolidona (PVP) tendrán una tendencia a aumentar la viscosidad de la solución y por lo tanto a disminuir el tiempo de drenaje. Esto puede alterar el tiempo de vida de una espuma [Weaire, (1999)].

Por otra parte, un polímero anfifílico, es decir, que tenga parte hidrofílica y parte hidrofóbica como los polímeros asociativos, se adsorberá a la interface agua-aire y modificará parámetros como la tensión superficial y la viscosidad superficial, lo cual a su vez puede modificar las propiedades de las espumas, aunque de manera diferente que en el caso de los polímeros solubles en agua [Goddard, 2005].

En la literatura se han presentado algunos reportes del efecto de polímeros sobre espumas líquidas. La mayoría de estos reportes trata sobre polímeros hidrosolubles neutros, como el PEG [Dhara, 2001] o el PVP [Folmer, 2000], o sobre polímeros hidrosolubles

catiónicos, en presencia de surfactantes iónicos [Asnacios, 2000]. Sin embargo, dichos trabajos analizan el efecto de la concentración de tensoactivo sobre las propiedades de espumas donde la concentración de polímero es fija. En ese caso, se ha mostrado por ejemplo que el PEG disminuye la estabilidad micelar, lo cual incrementa la espumabilidad de las soluciones [Dhara, 2001]. En nuestro trabajo, nosotros presentamos resultados similares, salvo que analizamos el efecto de la concentración de dos tipos de polímeros: hidrosolubles y anfifílicos, dejando fija la concentración de tensoactivo.

Capítulo 3

Métodos Experimentales

En este capítulo se describen algunos métodos de preparación de espumas, incluyendo los empleados en este trabajo. De igual forma, damos detalles sobre los materiales utilizados para preparar las espumas estudiadas.

3.1 Métodos de preparación de espumas

En la literatura existen reportes de diferentes métodos utilizados para preparar espumas [Weaire, (1999)]. Cada método es apropiado para algún tipo de estudio o aplicación específicos, como veremos posteriormente. En términos generales, estos métodos buscan dispersar aire o gas en forma de burbujas en un medio continuo líquido. El medio líquido consiste normalmente de una solución de algún tipo de moléculas anfílicas (tensoactivo, polímero, proteínas) más algún tipo de aditivos. En las secciones siguientes describiremos algunos métodos de fabricación, haciendo énfasis en los utilizados en este trabajo.

3.1.1 Método de burbujeo a través de un tubo capilar

Este método consiste en introducir gas en un líquido a través de un tubo capilar, de manera que las burbujas se vayan apilando hasta formar la espuma (Figura 3.1). De esta manera, es posible obtener una espuma monodispersa en cuanto al tamaño de las burbujas se refiere; siempre y cuando el flujo del gas introducido sea lento y constante. Este método tiene las ventajas de ser fácilmente montable y reproducible, además de la monodispersión de tamaños, sin embargo, no es útil si se quiere una espuma uniforme en cuanto a la fracción líquida, ya que por efecto del drenaje hacia abajo del líquido (debido a la acción de la gravedad) para el término de la fabricación, existirá un gradiente de fracción líquida, siendo ésta mayor en la parte del fondo de la espuma y menor en la parte superior de la espuma.

El método de burbujeo se utiliza principalmente para determinar la “espumabilidad” de una solución, es decir, la habilidad de la misma para producir o no espuma. Este es el

método utilizado en este trabajo para estudiar el efecto de los polímeros hidrosoluble y anfifílicos sobre la espumabilidad de las soluciones del tensoactivo aniónico utilizado. En nuestro caso, se inyectó un flujo de aire de 180 cc/min a través de capilares de 1 mm de diámetro en un tubo cilíndrico de acrílico transparente que contenía la solución a estudiar. Mediante una cámara de video se grabó el proceso de formación de la espuma durante dos minutos en que circuló el flujo de aire. Digitalizando el video y realizando mediciones con la imagen de una regla, se midió la altura de la espuma en función del tiempo. Por convención, la espumabilidad se representa como la altura alcanzada a los dos minutos de flujo de aire; de esta manera se reportan los resultados en el capítulo siguiente.

Cabe agregar que la estabilidad, o el decaimiento, de las espumas también fue estudiado por este método. Simplemente se continuó filmando la espuma una vez que cesó el flujo de aire. Digitalizando la película se obtuvo el decaimiento de la altura de la espuma en función del tiempo, resultados que también se presentan en el capítulo siguiente.

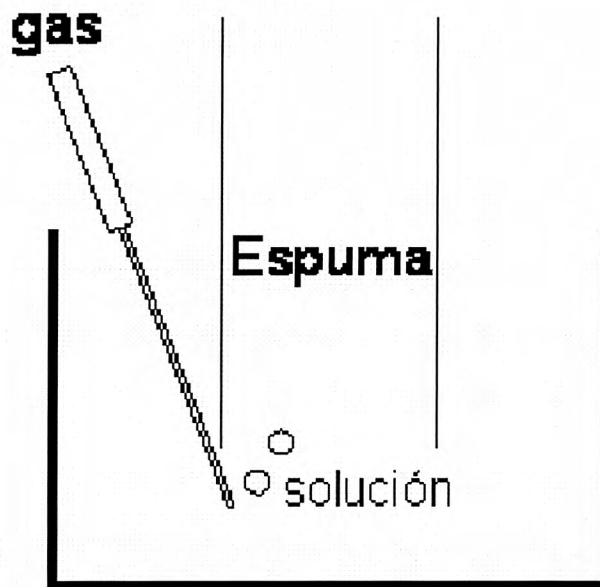


Figura 3.1 Esquema del método de producción de espumas mediante la inyección de gas por un tubo capilar. En un recipiente se tiene la solución con la cual se fabricará la espuma. Se inyecta gas con un flujo constante mediante el uso de un tubo capilar. La espuma se crea de burbuja en burbuja.

3.1.2 Método de burbujeo a través de un vidrio poroso

Este método funciona igual que el anterior, solo que aquí el aire se introduce por un tubo que en su extremo tiene un tapón con porosidad regular, por donde se “filtra” el gas hacia el líquido (Figura 3.2). De esta manera, dado que se producen muchas burbujas a la vez, este método permite producir más rápido la espuma, aunque no lo suficientemente rápido para obtener uniformidad en su fracción líquida, es decir, sigue habiendo drenaje durante el intervalo que toma desde el inicio hasta el final de su producción. Igual que en el método anterior, la espuma obtenida será monodispersa en cuanto al tamaño de las burbujas, siempre que el flujo del gas sea relativamente lento y constante.

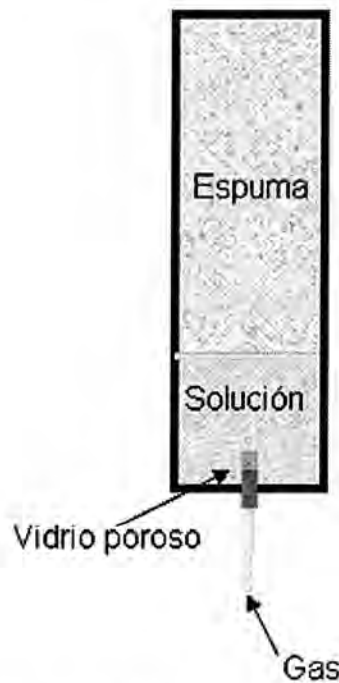


Figura 3.2 Esquema del método de producción de espumas mediante inyección de gas a través de un vidrio poroso.

3.1.3.- Método de agitación

Es el método más simple e intuitivo, sencillamente consiste en agitar fuertemente la solución de tensoactivo para que ésta se mezcle con el aire y se formen las burbujas de la espuma. Este método resultará en una espuma no homogénea en su fracción líquida y con una dispersión de tamaños de burbujas sin control ni patrón alguno, todo lo cual hace

imposible su reproducción para estudios experimentales. Sin embargo, se usa a veces para probar la capacidad espumante o “espumabilidad” de algunas soluciones.

3.1.4.- Método de mezcla turbulenta.

Este método, como su nombre lo indica, consiste en mezclar muy rápidamente la solución de tensoactivo con el gas. Esta mezcla se hace en una cámara especial a la cual llega por un lado la solución a gran velocidad y por otro lado y al mismo tiempo, el gas a alta presión (Figura 3.3). Este procedimiento da como resultado la creación de una espuma monodispersa como las producidas por los métodos de burbujeo y además homogénea en su fracción líquida, debido éste último a la rapidez con que se forma la espuma.

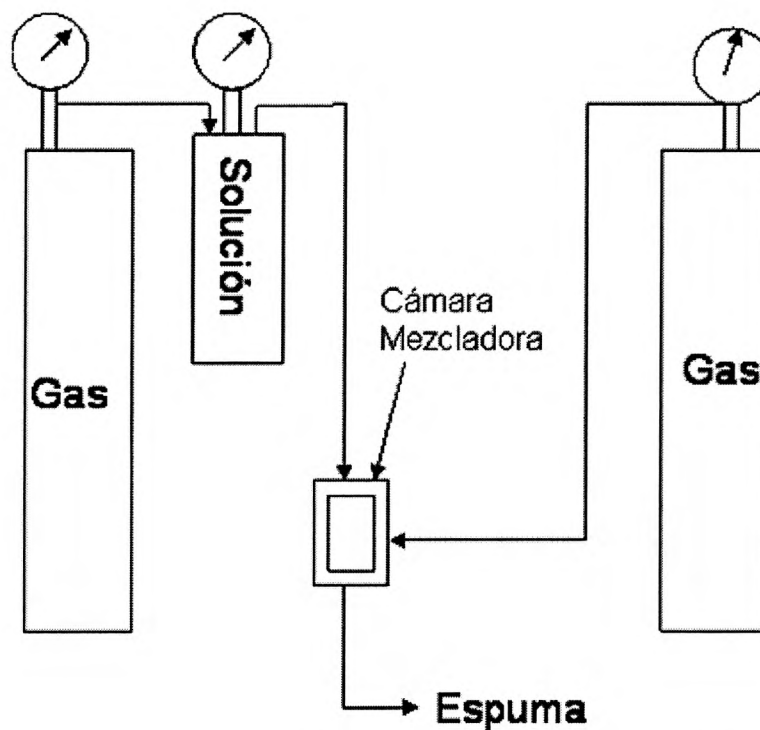


Figura 3.3 Esquema del dispositivo utilizado durante para la fabricación de las espumas mediante la mezcla turbulenta

El funcionamiento del dispositivo (figura 3.3) se basa en el mezclado vigoroso de un chorro de solución con otro de gas. Para llevar a cabo esta mezcla violenta, se utiliza un recipiente

con la solución que contiene al tensoactivo (1 en la figura 3.4), cuya presión interior es elevada hasta alrededor de 100 lbs/plg². Lo anterior produce que la solución contenida en el recipiente salga a gran velocidad (del orden de 40 m / s). Esta solución se lleva a una cámara mezcladora (2 en la figura 3.5), a la cual también llega gas a alta presión (80 lbs/plg²), cuyo flujo es controlado mediante un flujómetro (3 en la figura 3.4). Este último permite controlar la cantidad de gas presente en la espuma y, por lo tanto, la proporción del líquido también. La espuma fabricada es conducida mediante una manguera a un recipiente rectangular de 2.5 cm de ancho, 3 cm de espesor y 1 m de alto. El equipo fue montado por Alfredo Cervantes Martínez.

Este método (con el dispositivo aquí descrito) fue utilizado en nuestro trabajo para estudiar el drenaje de las espumas líquidas.

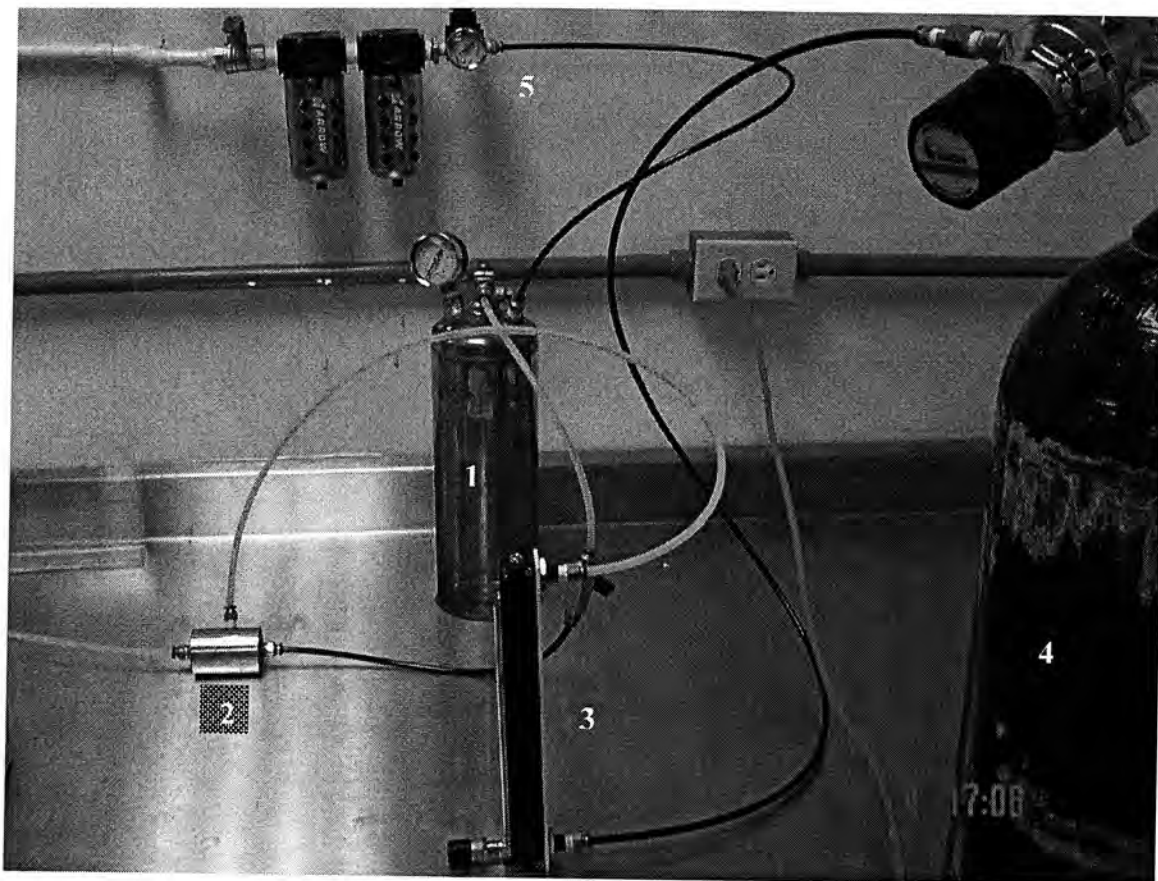


Figura 3.4 Dispositivo experimental construido por Alfredo Cervantes para fabricar espumas de fracción líquida homogénea. 1) Recipiente a alta presión con la solución de tensoactivo. 2) Cámara mezcladora. 3) Flujómetro para regular el flujo de gas a la cámara mezcladora. 4) Gas N₂ conectado al flujómetro. 5) Aire comprimido para presión en el recipiente.

3.2 Espumas estudiadas

En este trabajo estudiamos experimentalmente el efecto de diferentes polímeros sobre las espumas acuosas de un tensoactivo aniónico, el dodecil sulfato de sodio o SDS ($\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{O}_4\text{S}$). Se escogió este tensoactivo porque fácilmente produce espuma y ha sido estudiado ampliamente [Barentin, 1999]. En todos los experimentos, la concentración de tensoactivo fue de 25 mM. El peso molecular del SDS es 288.4 gr/mol.

Para estudiar el efecto de un polímero hidrosoluble sobre las espumas fabricadas con SDS, utilizamos polietilenglicol o PEG, de peso molecular $M_w = 6000$ gr/mol. La

concentración de polímero fue variada tomando en cuenta el número de agregación (cantidad de moléculas por micela) del SDS. Así, la concentración de polímero se varió de tal forma de tener una molécula de polímero por cada 15 micelas (concentración más baja de polímero), hasta tener una molécula de polímero por cada micela (concentración más alta de polímero). Por esta razón, los datos del capítulo siguiente se presentan en función de la razón molar tensoactivo/polímero. Una razón molar igual a 60, equivale a tener una molécula de polímero por micela.

En el caso del efecto de los polímeros anfifílicos, tomamos los datos del trabajo desarrollado por Eduardo Cervantes. Dos polímeros fueron estudiados. Primeramente, el Myrj 59, el cual está formado por una cadena de cien monómeros de Polietilenglicol (PEG) unida a una cola hidrocarbonada de 18 carbonos. El peso molecular de este polímero es 4684 gr/mol. El otro polímero es del tipo HEUR, el cual consiste de un polímero asociativo a bloques hidrofílicos e hidrofóbicos. Su peso molecular es 35000 gr/mol. Este polímero fue sintetizado por el equipo de trabajo formado por el estudiante Emanuel Robles y el Dr. Rogelio Gámez.

Tanto el SDS, como el PEG y el Myrj fueron adquiridos en Sigma-Aldrich y sus pesos moleculares venían indicados en los envases respectivos.

Todas las espumas fueron hechas con aire, que se inyectó de un compresor.

Capítulo 4

Resultados Experimentales

En este capítulo presentaremos los resultados experimentales obtenidos con espumas acuosas estabilizadas con el tensoactivo SDS y con dos tipos de polímero: un polímero hidrosoluble (PEG) y dos polímeros anfifílicos (HEUR y Myrj 59). La diferencia en la naturaleza química de dichos polímeros permite esperar efectos diferentes sobre las espumas. Dado que el PEG es soluble en agua, es de esperarse que su efecto principal se manifieste en propiedades relacionadas con el volumen acuoso de la espuma. Por otro lado, tanto el HEUR como el Myrj 59 tienden a adsorberse fuertemente a la interface agua-aire, y por ello afectan propiedades relacionadas con dicha superficie.

4.1 Efectos del PEG

Tratándose el PEG de un polímero hidrosoluble, es probable que sus efectos se noten en características relacionadas con propiedades del bulto del líquido.

4.1.1 Espumabilidad de las soluciones

Como primera prueba experimental, se determinó la espumabilidad de soluciones mixtas de SDS y PEG en agua. La concentración de tensoactivo se mantuvo fija en 25 mM, mientras que la del polímero se varió de tal manera que la fracción molar tensoactivo/polímero varió entre 60 y 960. El peso molecular del polímero utilizado es 20 000 gr/mol.

Como ya se mencionó, se utilizó el método de burbujeo. El proceso fue videograbado y después digitalizado haciendo uso del software Pinnacle Studio 4. Se tomó video de una regla métrica junto al tubo, para tenerla como referencia en la realización de todas las medidas de alturas.

La superficie superior de las espumas no era plana, debido a que en esta parte, algunas burbujas se apilaban más alto que otras. Por lo tanto se tomó la diferencia de altura

entre la burbuja superficial más alta y la menos alta como estimación del error experimental, ya que esta diferencia superaba el milímetro, que es la escala mínima medida por la regla usada. Esta estimación no es la más adecuada estadísticamente, pero fue utilizada tomando en cuenta el número escaso de datos reportados. Esto se ilustra en la figura 4.1. El error resultó ser de $\pm 2.5\text{mm}$ y se debe tomar en cuenta en cada una de las siguientes gráficas.

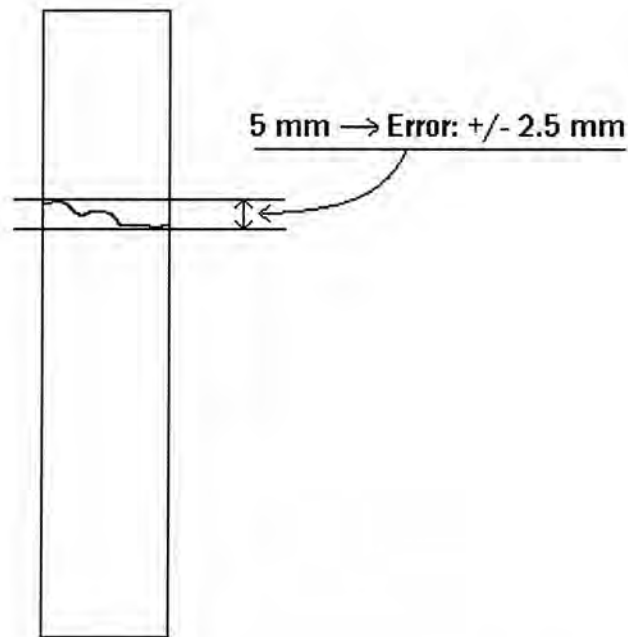


Figura 4.1.- Criterio usado para la estimación del error.

En la figura 4.2 se muestra la espumabilidad obtenida en función de la concentración de polímero. La gráfica ilustra la altura de la espuma obtenida por el método de burbujeo dos minutos después de empezado el flujo de aire. Como se aprecia en la figura, la espumabilidad obtenida al agregar PEG al sistema parece ser del mismo orden que la de la solución de SDS puro (17 cm) [Cervantes, 2007]. Podría parecer entonces que el PEG no afecta de manera sistemática a la espumabilidad de la solución en el intervalo de concentraciones estudiado; sin embargo, hay que tomar en cuenta que no podemos afirmar algo así debido a la escasez de experimentos realizados.

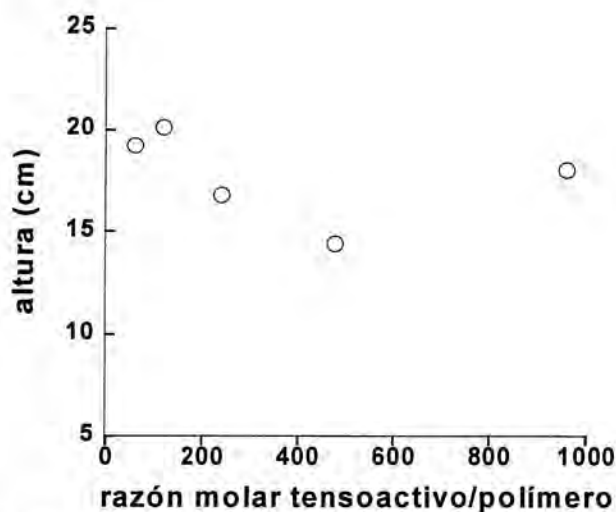


Figura 4.2 Espumabilidad de la solución SDS/PEG para diversas concentraciones

4.1.2 Estabilidad de las espumas

La estabilidad de las espumas obtenidas se determinó registrando el decaimiento de las mismas en función del tiempo. En principio, los parámetros del decaimiento exponencial tienen que ver con las propiedades de la solución a partir de la cual se crea la espuma, y por lo tanto de los detalles de la interacción tensoactivo-polímero. Sin embargo, no existe una teoría que permita predecir dicho comportamiento o relacionar las propiedades de la solución con los parámetros del decaimiento exponencial observado experimentalmente. Aún así, para tener una idea de los órdenes de magnitud del tiempo de estabilidad de las espumas, en la figura 4.3 se presentan los tiempos de decaimiento en función de la razón molar tensoactivo/polímero. Como se aprecia en la figura, el tiempo de vida parece decrecer conforme aumenta la concentración de PEG. Para concentraciones bajas de polímero, dicho tiempo es del orden de 75 minutos, mientras que para las concentraciones más grandes estudiadas, el tiempo de decaimiento es del orden de 35 minutos. Podemos inferir entonces que el efecto de este polímero es hacer menos estables a las espumas de SDS.

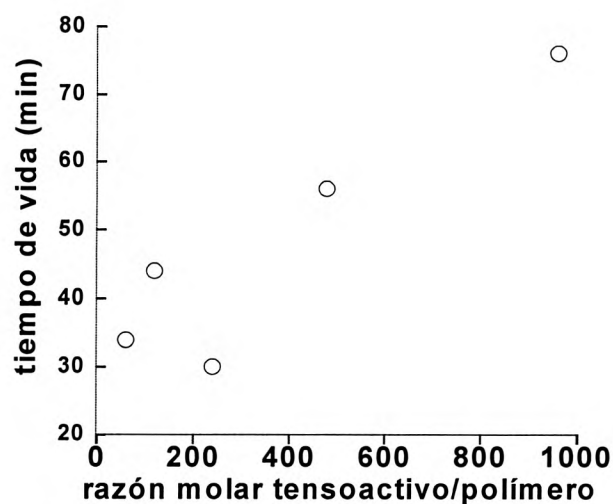


Figura 4.3.- Tiempo de decaimiento de espumas preparadas a partir de soluciones de SDS y PEG, en función de la concentración del polímero.

4.1.3 Drenaje de las espumas

Dado que el drenaje es uno de los fenómenos que influyen en la estabilidad de las espumas, en nuestro estudio medimos la altura del líquido drenado. El método de medición consistió en determinar la altura del agua drenada en la base de la espuma, en función del tiempo transcurrido a partir de la preparación de la espuma por el procedimiento de la mezcla turbulenta. En la figura 4.4 se muestran las curvas obtenidas para cuatro diferentes razones molares de tensoactivo/polímero. Observamos que todas las gráficas se comportan cualitativamente de la misma manera. La altura de líquido drenado crece linealmente con el tiempo para todas las muestras, hasta estabilizarse en una altura constante aproximadamente a los 900 segundos de iniciado el experimento. Podemos usar esto como criterio para decir que es ese el tiempo en el cual lo esencial del drenaje ya se ha llevado a cabo. Parece ser que este polímero hidrosoluble no modifica el drenaje de las espumas, al menos en el intervalo de concentración estudiado.

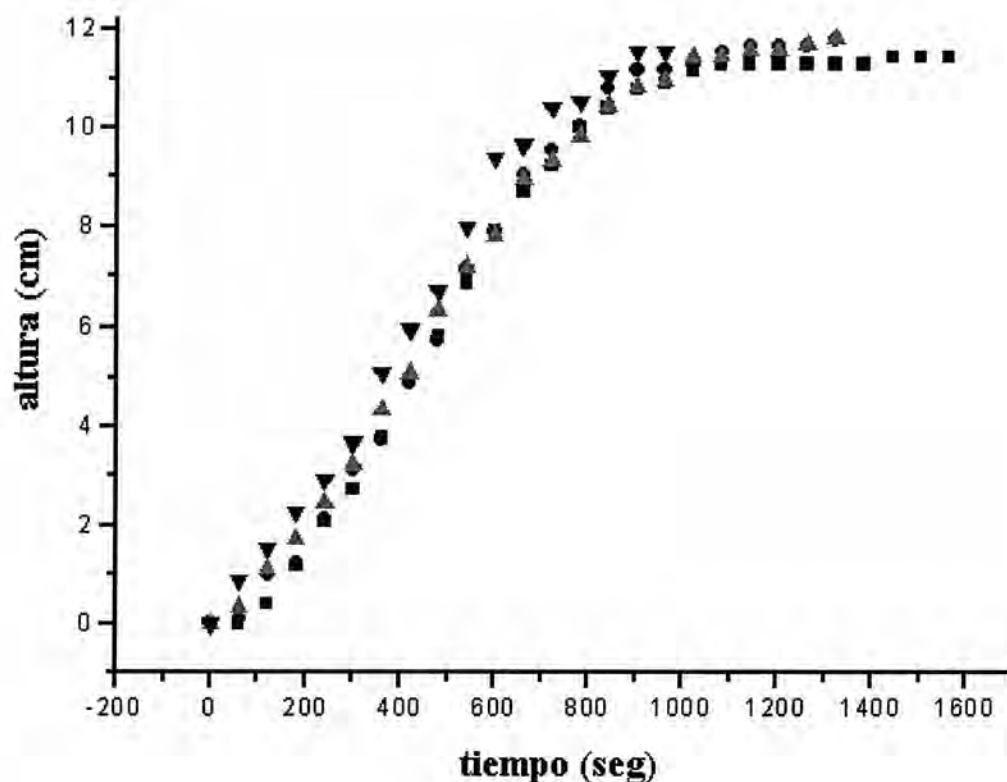


Figura 4.4.- Velocidad de drenaje de espumas preparadas con SDS y PEG para diferentes razones molares (R) de tensoactivo/polímero; siendo el cuadro para R=60, el círculo para R=120, el triángulo apuntando hacia arriba para R=920 y, finalmente, el triángulo hacia abajo representa una solución de SDS puro, en ausencia de PEG.

4.2 Efecto de polímeros anfífilicos

Los resultados presentados en la sección anterior corresponden al efecto de un polímero soluble en agua sobre algunas propiedades de las espumas acuosas estabilizadas con el tensoactivo SDS. En esta sección presentaremos el efecto de otro tipo de polímeros: aquellos que presentan tanto una parte soluble en agua, como una parte hidrofóbica. Esta naturaleza química hace que estos polímeros tengan una gran afinidad por la interface agua-aire y que por lo tanto se adsorban en ella. Las diferencias que se observen en este caso probablemente entonces estén relacionadas con los cambios en las propiedades interfaciales inducidas por estos polímeros. Particularmente, presentamos resultados con dos polímeros:

el HEUR y el Myrj 59. Dichos datos fueron medidos por Alfredo Cervantes en su trabajo doctoral y se reportan en la referencia [Cervantes, 2007], de la cual tomamos algunas gráficas para hacer las comparaciones.

4.2.1 Espumabilidad de las soluciones

En las figuras 4.5 y 4.6 se presentan los resultados obtenidos para la espumabilidad de soluciones mixtas de SDS y los polímeros asociativos HEUR y Myrj 59. En ambos casos los resultados son muy semejantes, aunque diferentes a lo obtenido en el caso del PEG. Para bajas concentraciones de polímero, la espumabilidad parece aumentar respecto a las soluciones puras de SDS, así como respecto a las soluciones mixtas SDS-PEG. Esto se debe posiblemente a que los polímeros anfifílicos usados se adsorben en la interface agua-aire y actúan como si fueran un tensoactivo. El efecto neto es entonces que existen más moléculas anfifílicas capaces de adsorberse en la interface y por lo tanto la cantidad de espuma es mayor.

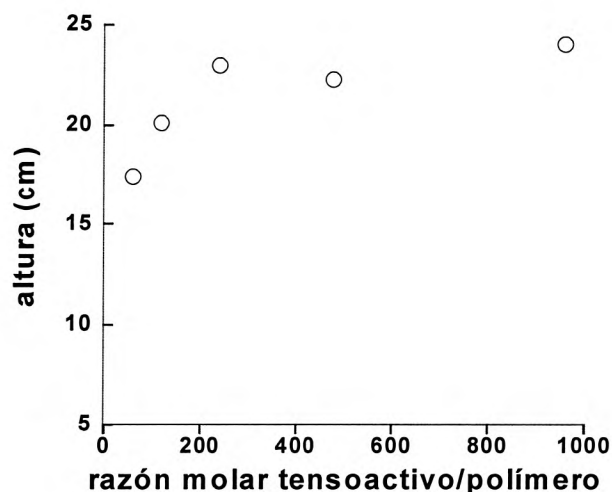


Figura 4.5.- Espumabilidad de soluciones mixtas de SDS y el polímero asociativo HEUR, en función de la concentración de polímero.

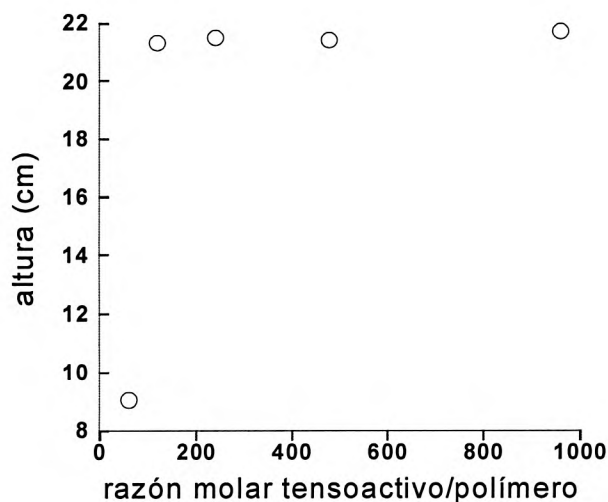


Figura 4.6.- Espumabilidad de soluciones mixtas de SDS y el polímero asociativo Myrj-59, en función de la concentración de polímero.

Por otra parte, cuando la cantidad de polímero anfifílico aumenta, la espumabilidad del sistema parece disminuir en ambos casos, tal como se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6. Este efecto posiblemente tiene que ver con la formación en el bulto de agregados mixtos tensoactivo-polímero.

4.2.2 Estabilidad de las espumas

Los valores obtenidos para el tiempo de estabilidad de las espumas preparadas con soluciones de SDS-HEUR se presentan en la figura 4.7, la cual muestra la dependencia con la razón polímero/tensoactivo. Como se aprecia en la figura, los tiempos de decaimiento parecen ser del mismo orden de magnitud que los obtenidos para el polímero hidrosoluble.

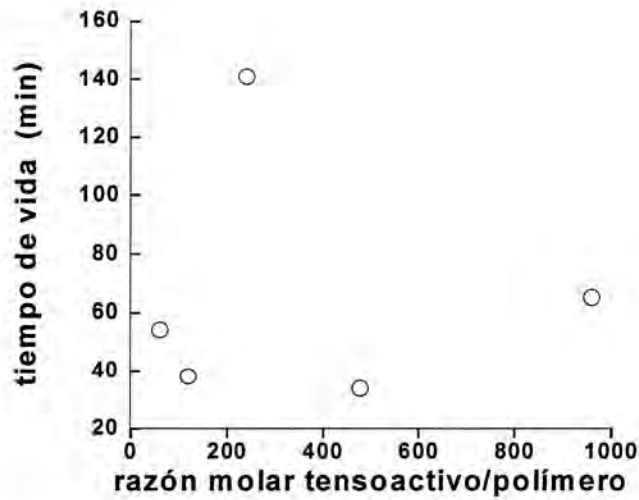


Figura 4.7.- Tiempo de vida de espumas preparadas con soluciones de SDS-HEUR, en función de la razón molar.

4.2.3 Drenaje de las espumas

En la figura 4.8 se presentan curvas del drenaje de espumas preparadas con una solución mixta de SDS-Myrj 59. Cualitativamente, las gráficas son semejantes a las obtenidas para el polímero hidrosoluble. El ritmo de drenaje parece variar de manera lineal con el tiempo; los valores medidos son muy similares para todas las muestras estudiadas, hasta un tiempo de 600 segundos. A partir de ese tiempo, el ritmo de drenaje es notoriamente diferente para las diferentes concentraciones de polímero. El drenaje en este caso ocurre de manera más lenta que en el del polímero hidrosoluble: el tiempo de estabilización, determinado por el instante en que la altura de líquido drenado es prácticamente constante, es del orden de 1200 segundos, superior en 30 % al obtenido para el PEG.

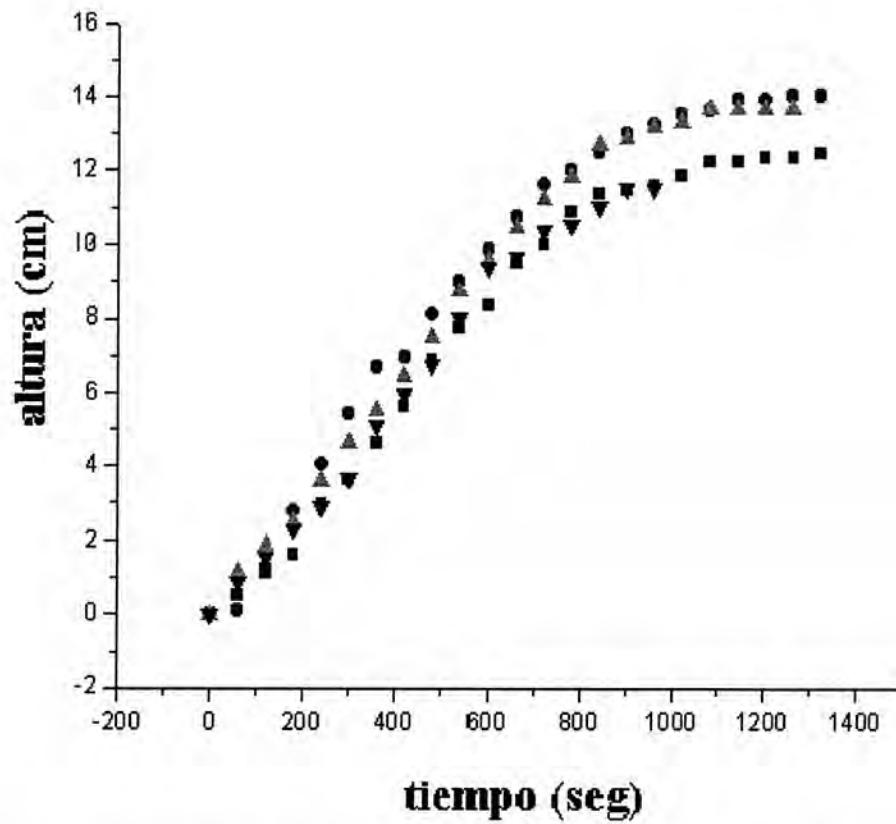


Figura 4.8.- Velocidad de drenaje de espumas preparadas con SDS y Myrj-59 para diferentes razones molares (R) de tensoactivo/polímero; siendo el cuadro para R=60, el círculo para R=120, el triángulo apuntando hacia arriba para R=920 y, finalmente, el triángulo hacia abajo representa una solución de SDS puro, en ausencia de Myrj.

4.3 Diferencia entre los efectos producidos por el polímero hidrosoluble y los polímeros anfífilicos

No parece haber mucha diferencia entre las soluciones con polímero hidrosoluble y las hechas con polímeros anfífilicos. Sin embargo, pequeñas distinciones parecen apreciarse:

1. Los polímeros anfífilicos parecen hacer que la espumabilidad aumente, para bajas concentraciones de polímero, mientras que para altas concentraciones disminuye la espumabilidad. Por el contrario, el PEG no parece tener un efecto tan sistemático sobre la espumabilidad.
2. El tiempo de vida parece no tener diferencia apreciable entre las muestras de SDS-HEUR, y SDS-PEG.
3. El drenaje parece ser ligeramente más lento para las espumas fabricadas con SDS-Myrj 59 que para las fabricadas con SDS-PEG.

Conclusiones

En este trabajo, se realizó un estudio de bibliográfico sobre algunas propiedades físicas de espumas acuosas y sus aplicaciones. Se hicieron experimentos con el objetivo de espumas de soluciones de SDS-PEG y SDS-polímero asociativo, HEUR y Myrj 59 respectivamente.

Aunque la cantidad de datos y experimentos no permite contar con resultados concluyentes, dichas comparaciones parecen indicar leves diferencias entre lo que ocurre con los distintos polímero. Estas diferencias se deben probablemente a las distintas propiedades interfaciales de los dos tipos de polímeros.

Debe considerarse que los experimentos realizados y estudiados en este trabajo, son de carácter preliminar y solamente ayudan a entender algunas tendencias en los sistemas estudiados.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten plantear nuevos experimentos a futuro. Por ejemplo, más repeticiones de los mismos serían definitivamente útiles para llegar a conclusiones más concretas, resultaría además interesante incrementar el intervalo de concentraciones estudiadas con los polímeros. También podría ser interesante completar los experimentos con los polímeros anfifílicos, estudiando las mismas concentraciones que en el caso del PEG. Esto no fue posible anteriormente por la poca disponibilidad de HEUR, debido a la necesidad de sintetizarlo cada vez que se emprende un experimento. Además pueden mejorarse las condiciones en que se realiza el experimento, por ejemplo el tubo (que se mantuvo destapado de su parte superior en todos los experimentos) puede ser tapado por su parte de arriba, para asegurar la eliminación de cualquier posible perturbación del sistema debido a algún posible cambio de presión externa. También sería interesante variar la razón líquida, para ver cómo esto afecta a las propiedades de las espumas resultantes. Igualmente podrían hacerse estudios semejantes con otros tipos de gases, para ver también si esto afecta a las espumas.

Bibliografía

Anderson, M., and B. E. Brooker, *Advances in Food Emulsions and Foams*, Elsevier Appl. Science, New York, NY, 1998.

Asnacios, A., Klitzing, R. y Langevin, D., *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects* **167**, 189, 2000.

Cervantes-Martínez, A. y Maldonado, A., *J Phys: Cond Matter*, aceptado, 2007.

Cervantes-Martínez, A., Saint-Jalmes, A., Maldonado, A. y Langevin, D., *J Colloid Interface Sci* **292**, 544, 2005.

Dhara, D. y Shah, D. O., *Langmuir* **17**, 7233, 2001.

Dick Silvia, *Fire Service Hydraulics*, Second Edition, 423, 1976.

Folmer, B. M. y Kronberg, B., *Langmuir* **16**, 5987, 2000.

Gina M. Pilhofer, Hising-Chi Lee, Michael J. McCarty, Phil S. Tong, J. Bruce German, *Functionality of Milk Fat in Foam Formation and Stability*, *Journal of Dairy Science*, **77**, 2, 1994.

Goddard, E. D., *J Colloid Interface Sci*, 228, 2005.

José Miguel Rodríguez Mellado, Rafael Marín Galván, "*Físico Química de Aguas*", **309**, 1999

Resnick, Halliday, Krane, "*Física*" Editorial: CECSA, Cuarta edición, México D.F., 315., Volumen 1, 1998

Robert K. Prud'homme, *Foams: Theory: Measurements: Applications* Princeton University, **511**, **523**, 1996.

Weaire, Hutzler, "*The Physics of Foams*", Clarendon Press, 1999.

Wolfgang Kunze, *Technology Brewing and Malting*, 203, 1998.