

INFLUENCIA DE LA FORMULACION SOBRE LAS ESPUMAS

Jean-Louis Salager*, José María Andérez*, Ana Forgiarini*

Traducido del francés por María Gabriela Molina B.

Resumen: **Influencia de la formulación sobre las espumas**

Los principales pasos en la vida de una espuma son: formación, maduración y ruptura. Las reglas para seleccionar los surfactantes y los aditivos, así como las condiciones para la formación de espumas (efecto de la temperatura) son descritos y deducidos por los fenómenos físico-químicos que envuelven el ciclo de vida de la espuma.

La cinética de adsorción de los surfactantes y de los aditivos como la cohesión de los arreglos moleculares de los surfactantes en la superficie agua-aire son los principales fenómenos que explican el comportamiento de una espuma.

Palabras claves: **Formulación, físico-química, espuma, espumabilidad, estabilidad.**

Un cuarto de siglo ha transcurrido desde la publicación del libro J.J Bikerman, quien por mucho tiempo ha realizado textos de referencia en materia de espuma y se puede decir que ciertas cosas han cambiado. Hoy en día son diversos los campos en los cuales se utilizan las espumas, algunos de gran importancia industrial como en la flotación de minerales, en alimentos o en el petróleo. Se les utiliza frecuentemente por su textura y sus propiedades reológicas que combinan aquellas propiedades de un fluido y un sólido con una densidad extremadamente baja y un costo por lo general ventajoso con respecto a otras alternativas.

No se tratan las propiedades de las espumas pero se explicará lo que se necesita hacer en la práctica (es decir, en el momento de formular la solución espumante) para fabricar una espuma que sea, por ejemplo, abundante y relativamente estable.

En este artículo se va a tratar de poner en evidencia un estado del arte semi-empírico, que corresponde en sí en un saber hacer práctico fundado sobre razonamientos simples, hasta simplistas con respecto al nivel de ciertas investigaciones. Estos razonamientos permiten a la vez analizar la situación físico-química, orientar la formulación en las experiencias que se deben realizar para validar su gestión.

Se le llama formulación físico-química no solamente el escoger los diferentes ingredientes, a saber la naturaleza de los agentes espumantes y aditivos, sino también sus proporciones o concentraciones respectivas, así como la temperatura (y eventualmente la presión) que son susceptibles de afectar la físico-química del sistema. El interés primordial es la espumabilidad de la solución, es decir a la cantidad de espuma producida, y a la estabilidad de ésta, es decir su persistencia en el tiempo.

Las tres etapas en la vida de una espuma y los fenómenos asociados.

Es relativamente fácil diferenciar las tres etapas de la vida de una espuma. Estas etapas recubren mecanismos y fenómenos físico-químicos muy nombrados.

Se va a comenzar por examinar brevemente los fenómenos que están en juego en las tres etapas, las cuales se han definido como: i) La **formación de la espuma** (de algunos segundos hasta algunos minutos) ii) La **maduración de la espuma** desde la espuma húmeda a la espuma seca donde el espesor de la película es todavía grande respecto a la escala coloidal (de algunos minutos a algunas horas) iii) La **persistencia de las espumas** secas cuya estabilidad de la película depende de las interacciones coloidales (de varias horas a varios días dependiendo del caso).

Conferencia presentada en las Jornadas del Grupo Formulación de la Société Française de Chimie (<http://www.sfc.fr>) en Montpellier - Francia, 28-29 octubre 1998. Publicado en *L'Actualité Chimique*, abril 1999, pp. 10-21.

* Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida 5101, Venezuela. Telef.: +58(274) 240.29.54. Fax: +58(274) 240.29.57. Correo electrónico: frp@ula.ve Servidor: <http://www.firp.ula.ve>

1. Formación de la espuma.

Existen dos métodos para formar espumas. En el primero un gas previamente disuelto en un líquido se libera por un cambio físico por lo general por un descenso de la presión o un aumento de la temperatura. En el segundo caso un aparato mecánico permite introducir burbujas de gas en el seno del líquido, por lo general por agitación violenta o burbujeo.

Adsorción del surfactante en la superficie gas-líquido.

Tensoactividad.

Las burbujas que se forman representan un aumento del aire superficial gas-líquido. La nueva superficie que se crea por agitación está por tanto disponible para que se produzca la adsorción de un surfactante presente en el líquido.

Un surfactante es una sustancia cuya molécula posee un grupo hidrófilo y un grupo hidrófobo o lipofílico (el dodecibenceno sulfonato de sodio usado en los polvos para lavar la ropa o el oleato de potasio en los jabones o más aún el lauril sulfato de sodio de los champúes).

Una de las propiedades fundamentales de los surfactantes es la fuerte tendencia de adsorberse en las superficies o en las interfaces.

Una vez adsorbidas en la superficie, éstas moléculas tensoactivas producen un descenso notable de la tensión superficial que puede pasar de 72 mN/m por superficie aire-agua a 30 mN/m para una solución diluida de surfactante, y muchas veces hasta menos como es el caso de los surfactantes perfluorados. En lo que concierne las interfases agua-aceite, ciertos productos pueden disminuir su tensión a valores extremadamente bajos del orden de 0.001 mN/m. Entre más se disminuye la tensión más fácil se crea un área superficial o interfacial.

Separación del gas por gravedad. Acumulación de burbujas.

Sin embargo, la formación de un sistema disperso no es la única razón para estar bajo la presencia de tensoactivos. Luego que las burbujas se forman ellas se separan debido a la diferencia de densidad con la fase líquida.

Estas burbujas se amontonan unas sobre otras y en este proceso se forman películas entre las burbujas. Estas películas son sometidas a esfuerzos de estiramiento y es indispensable que ellas no se rompan, ya que la espuma se forma a partir de la acumulación de burbujas.

Efecto Gibbs-Marangoni

Es aquí donde el tensoactivo juega un papel determinante en lo que se conoce como efecto Gibbs-Marangoni. Cuando una película gruesa se forma entre dos burbujas y las burbujas se acercan a menudo estas se aplastan, la película está expuesta a un esfuerzo de estiramiento frecuentemente complejo, en el que el **área superficial gas-líquido aumenta rápidamente**. La concentración de surfactante adsorbido (denominado adsorción Γ en moléculas por unidad de superficie) tiende a disminuir en la zona estirada donde la película es más delgada que en las zonas vecinas. En consecuencia, la tensión superficial aumenta según la relación que permite calcular la elasticidad de Gibbs ϵ .

$$\epsilon = 2 \cdot \frac{d\gamma}{d \ln A} = -2 \cdot \frac{d\gamma}{d \ln \Gamma}$$

donde γ es la tensión, A, el área superficial y Γ la adsorción. El coeficiente 2 indica que la película está comprendida por dos superficies gas-líquido.

Como lo indica la figura 1, se tiene una diferencia de tensión entre la zona estirada de la película (tensión más elevada, menor grosor) y las zonas adyacentes (no estirada, tensión más baja). Esto produce un fenómeno denominado inestabilidad de Marangoni, el cual se puede observar en las cocinas cuando se le agrega una gota de detergente líquido a un fregadero lleno de agua, en la superficie quedan gotas de aceite flotando. El gradiente de tensión produce una fuerza dirigida desde la zona donde se encuentra el exceso de tensoactivo, es decir donde la tensión es baja, hasta la zona de alta tensión, que desplazan a las gotas de aceite.

En el caso de las películas estiradas entre la superficie libre y una burbuja, o entre dos burbujas el movimiento superficial se produce desde la zona vecina hasta la zona estirada; si la película es suficientemente delgada, este movimiento superficial se lleva a cabo desde el líquido hasta la parte delgada de la película, lo que restaura su espesor original, o bien impide que el estiramiento prosiga. Se asiste entonces a un mecanismo (denominado Gibbs-Marangoni) que confiere una cierta elasticidad a una película estirada entre dos burbujas.

El mecanismo Gibbs-Marangoni es por tanto el fenómeno sobre el que reposa la existencia misma de la espuma. En lo que concierne la noción de abundancia de espuma o más exactamente el poder espumante de una solución, es cuantificado por la espumabilidad, medido como el volumen de espuma formada en ciertas circunstancias dadas.

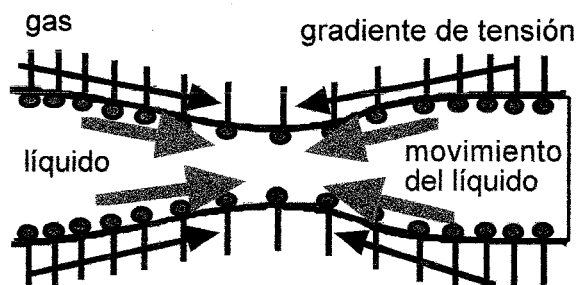


Figura 1 – Efecto Gibbs-Marangoni.

Máximo de espumabilidad en la CMC.

El gradiente de adsorción entre la zona delgada y la zona vecina se debe al gradiente de tensión correspondiente, el cual depende del equilibrio entre la superficie y la fase líquida, que se explica por la relación característica de la isoterma de Gibbs relacionada al equilibrio, la adsorción Γ a la tensión γ y a la concentración de surfactante en fase líquida C.

$$\frac{dy}{d \ln C} = -RTT'$$

A baja concentración de surfactante, la tensión superficial se parece a la del agua pura y por tanto no hay un gradiente de tensión apreciable por estiramiento de la película. Esto corresponde con las medidas experimentales que indican que la espumabilidad aumenta a medida que la concentración de surfactante se incrementa hasta la concentración micelar crítica (CMC), y que a continuación ésta tiende a invertirse como lo indica la figura 2.

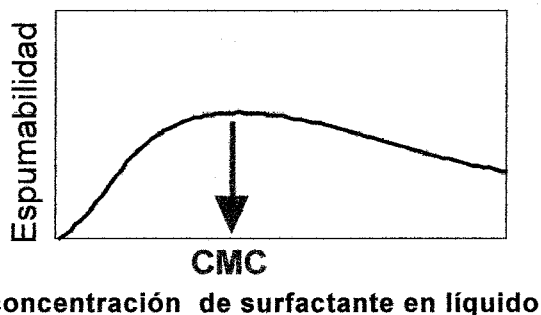


Figura 2 – Variación típica de la espumabilidad con la concentración del tensoactivo en fase líquida.

Efectos Cinéticos

La concentración a la cual la inversión espontánea se produce depende de parámetros cinéticos. En efecto ciertos surfactantes se adsorben más o menos rápido y ciertas micelas se degradan más o menos fácilmente.

Cuando se trata de mezclas de surfactantes es decir a la mayoría de los casos prácticos, la situación es aún más complicada, ya que hay surfactantes que se difunden más rápidamente que otros y que literalmente van a “precipitarse” en la superficie de las burbujas en las que se forman. Estos surfactantes pueden a continuación ser desplazados y reemplazados por otros “más lentos” por tanto tienen más tendencia a adsorberse, el intercambio se produce cuando la espuma está formada. Es evidente que la espumabilidad va a depender de los primeros surfactantes, así que los surfactantes “retardadores” actuarán sobre la estabilidad de la espuma formada. Como la acción de cada uno de ellos depende también de la concentración en el líquido y de su proporción en las micelas susceptibles a degradarse no es de asombrarse que el máximo de espumabilidad no se produce necesariamente a la CMC del primer surfactante.

2. Maduración de la Espuma

Una vez que la espuma se forma, súbitamente ésta sufre una degradación más o menos lenta, a una escala de tiempo de algunos minutos a algunas horas, en su transcurso entran en juego diferentes mecanismos: (i) la segregación y el drenaje gravitacional, (ii) la succión capilar y (iii) la difusión gaseosa intra-burbuja.

Segregación de burbujas y drenaje gravitacional del líquido.

Durante los primeros instantes se produce una **segregación gravitacional de las burbujas** del hecho que el empuje de Arquímedes es más fuerte sobre las burbujas grandes que sobre las pequeñas (figura 3, a la izquierda). El rearreglo relativo de las burbujas no se puede hacer fácilmente hasta que la espuma contenga una proporción volumétrica de líquido mínimo en el orden del 15-20 %. Por tanto, esto se produce sobre todo en los primeros momentos.

El **drenaje gravitacional del líquido** hacia abajo se produce durante toda la vida de la espuma, pero es evidente que es más importante en la espuma húmeda (figura 3, a la derecha).

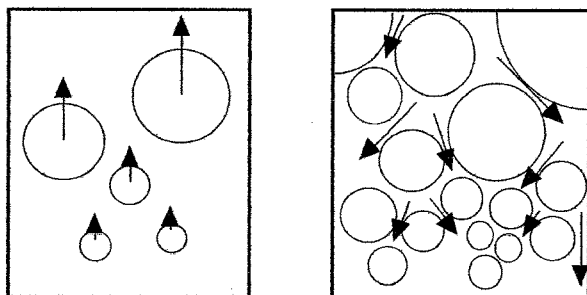


Figura 3 – Segregación de las burbujas y drenaje del líquido en la espuma húmeda.

Succión capilar

La proporción de líquido presente en la espuma disminuye rápidamente debido al drenaje del líquido hacia abajo, antes que nada por simple acción de la gravedad sobre el líquido que se encuentra en las burbujas, luego por fenómenos más complejos cuando las burbujas pierden su forma esférica para devenir poliédricas.

En éste momento el contenido de líquido no excede al 10% y continúa disminuyendo ya que la diferencia de curvatura entre los bordes de Plateau (figura 4) y la parte plana de las películas según la ley de Laplace producen un gradiente de presión. Esta es la fuerza motriz que desplaza el líquido del centro de las películas hacia los bordes de Plateau, gracias a un mecanismo llamado succión capilar. Este líquido es seguidamente drenado por la gravedad hacia la parte inferior de la espuma en los bordes de Plateau.

La espuma puede entonces comenzar a degradarse por ruptura de las películas relativamente delgadas (algunos micrómetros o de menor espesor), en particular si las condiciones favorables al efecto Gibbs-Marangoni no son satisfechas, o si no existen mecanismos de estabilización de perturbaciones de la película intra-burbuja. De todas maneras, la ruptura de las películas no se producen necesariamente durante esta segunda etapa y la espuma puede persistir y continuar su evolución lentamente.

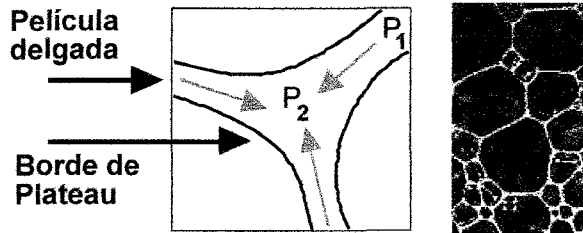


Figura 4 – Succión capilar del líquido del centro de la película hasta los bordes de Plateau

Difusión gaseosa intra-burbuja.

Cuando las burbujas son poliédricas, las películas intra-burbujas se comportan como películas planas de poco espesor, pero a causa de la ley de Laplace la presión es mayor en las burbujas pequeñas que en las grandes. En consecuencia, existe por lo general un gradiente de presión de una parte y de la otra de una película, que induce una difusión gaseosa a través de ésta película (figura 5).

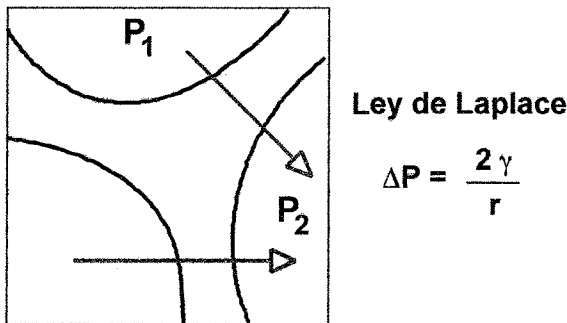


Figura 5 – Difusión gaseosa intra-burbuja.

Este fenómeno, llamado maduración de Ostwald, hace que las pequeñas burbujas se desinflen lentamente en las grandes y desaparezcan. Este es el fenómeno que dominó la evolución de las espumas a escala de tiempos intermedios (algunos minutos a algunas horas). En otros términos, el número de burbujas disminuyen y las burbujas devienen grandes poco a poco sin que sea necesario que las películas se rompan (lo que se puede producir sin embargo al mismo tiempo). La figura 6

indica la evolución típica de una espuma por madurabilidad de Ostwald.

Este fenómeno es a menudo importante en la práctica. Y puede ser inhibido por la presencia de una capa adsorbida insoluble como la que forman las proteínas en la clara de huevo batidas a punto de nieve en la preparación de merengues. En este caso, la disminución del diámetro de una burbuja (que se desinfla en sus vecinas más grandes) produce el aumento de la adsorción (ya que las moléculas adsorbidas son prácticamente insolubles y el valor de la elasticidad ϵ es muy elevada). En consecuencia, se produce una reducción de tensión suficiente para compensar la diferencia de presión debida a la ley de Laplace.

Otra medida de bloquear la difusión intra-burbuja es de recubrir toda la superficie de partículas sólidas minúsculas (insolubles en el líquido) por ejemplo, los glóbulos de grasa de la leche en la crema batida llamada Chantilly o las partículas de asfaltenos en los petróleos brutos espumantes.

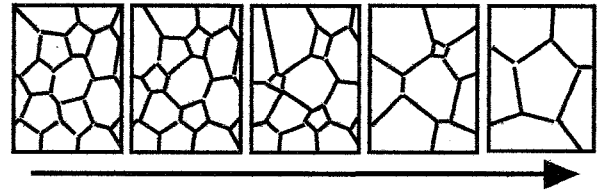


Figura 6 – Aspectos de la evolución de una espuma por difusión gaseosa intra-burbuja

3. Espuma persistente a películas delgadas

A medida que la película se adelgaza, la rapidez de drenaje disminuye, típicamente de manera proporcional al cubo del espesor de la película e inversamente proporcional a la viscosidad del líquido y al área de la película (Prud'homme et Khan, Ivanov). El drenaje por tanto, puede ser muy lento si el líquido contiene agentes viscosantes y si las burbujas poliédricas son de gran dimensión. Este efecto hidrodinámico no es el único, ni necesariamente el más importante.

En efecto, si el espesor de las películas intra-burbujas llegan a disminuir por debajo del décimo de micrómetro, típicamente cerca de los 200 Å, se observan entonces nuevos fenómenos que corresponden a las interacciones "coloidales" (es decir a muy poca distancia) entre las superficies.

Dos efectos se oponen:

- de una parte, las fuerzas intermoleculares atractivas de Van der Waals tienden a atraer las burbujas vecinas y por lo tanto a producir el drenaje de la película. Estas fuerzas actúan a muy poca distancia, prácticamente al contacto.
- de otra parte, existen diversas fuerzas que producen un efecto repulsivo y se oponen al acercamiento de las burbujas y por tanto al drenaje de las películas. Estas son debidas a la presencia de una capa adsorbida de tensoactivo sobre cada una de las superficies de una parte y de la otra de la película delgada.

Frecuentemente en las escuelas, se les refiere como fuerzas repulsivas o como presión de disjunción. La celebre teoría DLVO trata del efecto del balance de estas fuerzas sobre la estabilidad de partículas coloidales, y los conceptos que ésta presenta son cualitativamente aplicables a las películas delgadas intra-burbujas (Ivanov, Exerowa et Kruglyakov).

Repulsiones (fenómenos estáticos)

El primer tipo de fenómeno estático corresponde a diversos tipos de repulsión entre las superficies (figura 7). Aquella que actúa a mayor distancia es la repulsión eléctrica debida al movimiento de las capas disponibles de las dobles capas eléctricas producidas por la adsorción de surfactantes iónicos (Rosen).

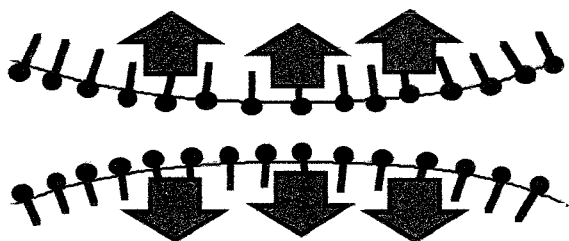


Figura 7 – Repulsión producida por la interacción entre las capas de surfactante adsorbido de una parte y de la otra de la película delgada.

A medida que la longitud de Debye es mayor, la distancia de repulsión aumenta; la presencia de electrolito, en particular polivalente, tiende a reducir la longitud de Debye y por tanto tiende a reducir la distancia a la cual la repulsión electrostática es suficiente para evitar el acercamiento de las superficies. En consecuencia, la presencia de un electrolito tiende eventualmente a acelerar el drenaje de la película intraburbuja.

Existen otros tipos de repulsiones, en particular la repulsión estérica entre las cadenas polieter de los surfactantes no iónicos o entre las partes hidrófilas de polímeros adsorbidos. Los dos tipos de repulsiones pueden producirse simultáneamente con polielectrolitos, los cuales también juegan un papel viscosante en el líquido.

En presencia de micelas o de otros objetos coloidales en el líquido, el adelgazamiento de la película no es de manera continua sino por etapas (Ivanov). Cada etapa lenta se produce cuando el espesor de la película corresponde exactamente a un múltiplo del diámetro de los objetos. Entre cada etapa lenta aparece una etapa rápida durante la cual el espesor de la película corresponde exactamente a un múltiplo del diámetro de los objetos. Entre cada etapa rápida aparece una etapa lenta durante la cual el espesor de la película varia mucho más rápido. Este curioso fenómeno ilustrado en la figura 8 se debe a la característica oscilante de la fuerza

de interacción entre las superficies que se aproximan, que pasan de repulsivas a atractivas, luego de nuevo a repulsiva, cuando su distancia pasa de un múltiplo del diámetro de los objetos al múltiplo inmediatamente inferior.

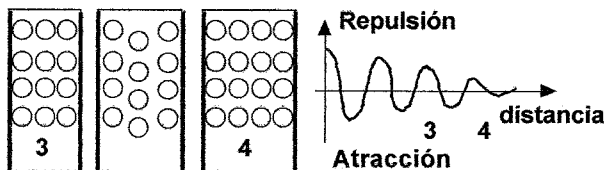


Figura 8 – Oscilación de la fuerza entre dos superficies que se aproximan cuando la película líquida contiene objetos coloidales sólidos.

Fenómenos Dinámicos de la superficie

Existen también fenómenos que no se producen si no hay un desplazamiento tangencial del líquido respecto a la superficie, es el caso del drenaje de una película delgada donde la mayor parte del líquido puede ser considerado suficientemente vecino de la superficie para interactuar con las moléculas que se encuentran adsorbidas. En este caso, un desplazamiento del líquido afecta las moléculas adsorbidas y viceversa.

La presencia de una doble capa eléctrica (Rosen) produce uno de los efectos electrocinéticos, llamados algunas veces electroviscosos, en el que el desplazamiento del líquido arrastra los contraiones que se encuentran en la capa difundida sin afectar los iones adsorbidos del surfactante (de signo contrario). Esto provoca una deslocalización de carga que induce un potencial, llamado potencial de flujo, el cual ejerce una fuerza sobre los iones desplazados para regresarlos a su posición y en consecuencia en las moléculas de líquido asociadas a estos iones (Levich).

Como corolario, el líquido no se desliza así de fácil como lo preveen las leyes hidrodinámicas y todo pasa como si estuviese más viscoso, de allí la denominación electroviscosidad (figura 9).

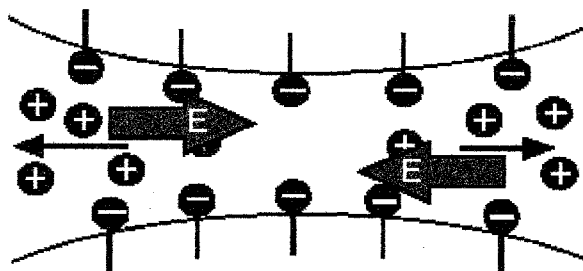


Figura 9 – Potencial de flujo y electroviscosidad.

Las sustancias adsorbidas en la superficie presentan a veces interacciones laterales con sus vecinos, en el mismo tiempo que las interacciones con las moléculas del líquido. De hecho, cuando el movimiento del fluido tiende a

arrastrar una molécula adsorbida y por lo tanto a producir una fuerza tangencial en la superficie, ésta fuerza se transmite a la molécula vecina y así sucesivamente, de la misma manera que los esfuerzos se transmiten en tres dimensiones al interior de un fluido gracias a la viscosidad (figura 10).

Las interacciones laterales frenan éste desplazamiento en la superficie, así como el movimiento del líquido de la película asociada a las moléculas adsorbidas. Este fenómeno puede interpretarse a partir del concepto de viscosidad superficial que rinde cuenta a la manera a la que el desplazamiento de una molécula adsorbida en la superficie induce el desplazamiento de las moléculas vecinas.

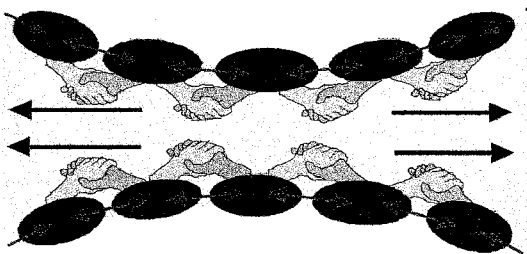


Figura 10 – Efecto de la viscosidad superficial.

Papel de la formulación (surfactantes y aditivos)

Surfactantes y Aditivos

El surfactante asume el papel principal en la formulación y persistencia de la espuma. En ésta óptica, se reserva entonces el término aditivo para todas las otras sustancias que sean co-surfactantes, los polímeros más o menos adsorbidos o los sólidos finamente divididos o los electrolitos disueltos en el líquido.

Estado del Arte

Se puede concluir de la sección precedente que no puede haber una espuma sin la presencia de surfactantes y/o aditivos, pues son estas sustancias las que intervienen en los nombrados fenómenos y mecanismos líquidos. Se puede pensar por tanto, que el papel del formulador consiste simplemente en seleccionar tal o cual sustancia para obtener tal o cual efecto y que no hay más misterio ni receta confidencial celosamente guardada de padre a hijo.

La realidad es toda diferente, hasta cien años después de los trabajos sobre capilaridad y las películas de jabón realizados por especialistas tan eminentes como Laplace, Plateau, Gibbs, Rayleigh, Van der Waals, Borth, por citar solo los principales.

La lección que se puede obtener del estado del arte actual en materia de espuma es extremadamente difícil, hasta imposible de saber cual de los nombrados fenómenos concomitantes posibles, es responsable del hecho que tal sistema produce mas o menos espumas que otro, o que una espuma sea más estable que otra. Sin embargo se puede resaltar algunas tendencias en materia de formulación.

Eficacia y Efectividad

Conviene de antemano diferenciar bien dos propiedades de una solución espumante que no se han definido todavía, a saber son eficacia y efectividad.

Se ha visto que la espumabilidad pasa típicamente por un máximo cuando se trazan sus variaciones en función de la concentración del surfactante (figura 2). Se indicó también que el valor máximo de espumabilidad es afectada por la concentración en general cercana a la CMC, a la cual el surfactante es más eficaz como agente espumante.

La **eficacia** es por tanto la concentración a la cual el máximo de espumabilidad es afectado, y ésta corresponde, en la mayoría de los casos, con las excepciones vistas previamente, a la CMC y varía por tanto como ésta; y se sabe que se puede reducir o aumentar a voluntad en función de las obligaciones de costo, de toxicidad o de otras consideraciones (Rosen).

Al contrario la **efectividad** mide la importancia del efecto producido, es decir la cantidad de espuma, la cual varía con la concentración y el tipo de surfactante. La figura 11 indica la variación de la tensión y de la espumabilidad en función de la concentración de surfactante para dos sistemas catalogados como A y B.

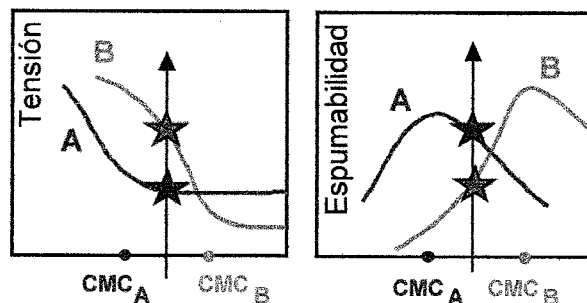


Figura 11 - Variación de la tensión superficial y de la espumabilidad en función de la concentración de surfactante para dos sustancias A y B.

Las curvas de tensión indican que el surfactante A posee una CMC más baja, pero la disminución de tensión que ésta produce a su CMC es menor que el correspondiente al surfactante B a su CMC respectiva.

Como se indica en el gráfico a la derecha de la figura 11 la máxima espumabilidad (a la CMC) de B es superior a la de A. Es claro que A es más eficaz, por lo que B es más efectivo, y es por tanto este último es mejor agente espumante. Resta a saber de todas formas si se está listo a

umentar la concentración hasta el valor correspondiente a la CMC de B para concretar ésta ventaja.

Si ahora nos situamos en la concentración indicada por la flecha vertical para realizar una experiencia de espumabilidad, se está tentado a concluir lo contrario, diciendo que A es el mejor espumante, ya que es éste el que produce mayor espuma a esta concentración. Se puede observar fácilmente el riesgo de mala interpretación de los resultados experimentales si no se comprende bien las sutilidades de la fenomenología.

La primera parte estuvo consagrada en examinar el papel que juegan los surfactantes con cada uno de los efectos que pueden intervenir en la vida de una espuma y como sus efectos influyen en las propiedades de ésta. Ahora se avanzará un poco en sentido a la previsión de la fenomenología.

Se debe de antemano escoger una propiedad a maximizar y ya que la eficacia es ciertamente fácil a optimizar por su relación con la CMC, se escogerá la espumabilidad.

Características y efectos investigados

-En lo que concierne a la primera etapa de formación, durante la cual se desea producir el máximo de espuma, se investigará con el fin de satisfacer las siguientes condiciones (las cuales de antemano no son independientes):

1) **Disminución de la tensión superficial** para facilitar la deformación y la ruptura mecánica de las burbujas. Se buscará por tanto un buen surfactante, que sea soluble en el agua, de manera que esté disponible cerca de la superficie en el momento en que ésta se forme.

2) **Aumento del gradiente de tensión** a fin de favorecer el efecto estabilizante de Gibbs-Marangoni en el momento en que las burbujas se aglomeran para formar la espuma. De nuevo, hará falta un buen surfactante en que la tensión mínima (a la CMC) sea la más baja posible. Es recomendable también utilizar un producto de CMC relativamente baja de manera de alcanzar el mínimo de tensión a la concentración más baja posible (buena eficacia y menor costo).

3) **Aumento de la adsorción**, es decir, del número de moléculas adsorbidas por unidad de superficie que está por lo general ligada a la cohesión de las moléculas y a la fuerza motriz hidrófoba que empuja a las moléculas a adsorberse. Se buscará la manera de obtener una fuerte cohesión (y eventualmente una interacción atractiva) sin caer en los problemas de insolubilidad. Se remarcará que hay de todas maneras un límite, ya que una cohesión demasiado fuerte puede ser nefasta a la resistencia de la capa adsorbida (lo que produce el que sea quebradizo en vez de quedarse elástico).

-En lo que concierne las segunda y tercera etapas de la vida de la espuma se tratará de mejorar la estabilidad, por

una parte controlando la maduración de Ostwald, y, por otra parte, inhibiendo o retardando los mecanismos de drenaje de las películas líquidas.

4) **Compactación extrema** de la capa adsorbida en superficie para producir una barrera física a la difusión gaseosa. Esto puede provocar diferentes bloqueos de orden mecánico como el depósito de sólidos finamente divididos, de polímeros naturales o sintéticos, o de cristales líquidos, o la gelificación parcial o total del líquido (disminución considerable del coeficiente de difusión del gas).

5) **Bloqueo de la maduración de Ostwald** gracias a la adsorción de sustancias que producen un fuerte valor de elasticidad ϵ , que permite compensar el gradiente de presión de Laplace, como es el caso de las proteínas desnaturalizadas.

6) **Aumento de la viscosidad del líquido**, con el fin de reducir la rapidez de drenaje hidrodinámico de las películas relativamente gruesas, es decir a temprana vida de la espuma. Esta condición puede ser satisfecha de manera simultánea a la condición [4] si se utilizan polímeros a la vez hidrosolubles y surfactantes, lo que es totalmente posible. Se notará de todas formas que entre más viscoso es el líquido, más difícil será éste para formar la espuma por agitación mecánica.

7) **Aumento de las repulsiones entre las superficies** de una parte y de otra de una película delgada. Se puede hacer un llamado a los efectos electrostáticos estéricos, entrópicos y osmóticos, o la combinación de ellos. Se tendrán en cuenta particularmente los efectos que se producen a distancia relativamente grande.

8) **Retardo del drenaje de las películas delgadas** por un fenómeno dinámico metiendo en juego la capa de líquido vecino de la interfase como la electroviscosidad o la viscosidad superficial.

9) **Estabilización o inhibición de las causas** susceptibles a romper prematuramente una película gruesa o fina. Estas pueden ser de naturaleza física como la presencia de una pequeña partícula hidrófoba en la película acuosa o de un fragmento de sustancia (sólida o líquida) susceptible de extenderse en la superficie gas-líquido, o de naturaleza físico-química como la presencia de sustancias tensoactivas en la fase gaseosa (alcohol, éter) que reducen considerablemente la elasticidad de Gibbs.

Es la mezcla de estos efectos que conviene administrar para mejorar la formulación.