

Espumes sòlides i líquides: principals característiques i aplicacions

Norma Merchán

Departament de Química Física, Universitat de Barcelona

A/e: Normam@gmail.com

Les espumes, tant líquides com sòlides, presenten un conjunt de propietats fisicoquímiques que han propiciat que amb el temps s'hagin anat desenvolupat un important nombre d'aplicacions de materials en forma d'espuma, tant en productes d'us quotidià com ara el pa o l'espuma d'afaitar, com en aplicacions més específiques com les espumes extintores d'incendis o d'espumes per a la separació d'impureses en minerals. En aquest treball es presenta un breu resum de les característiques més rellevants de les espumes, així com de les seves aplicacions.

Foams, either liquid or solid, show a large number of interesting physico-chemical features that are at the origin of important technological applications that range from everyday products, such as bread or shaving foams, to the more specialized fire extinguishing foams or their use in impurity separation processes for minerals. In this article we review the most salient features of foams as well as of their main applications.

Una visita a qualsevol supermercat ens permetrà constatar que s'hi pot trobar un ventall cada vegada més ampli de productes en forma d'espuma, que van des de les clàssiques espumes d'afaitar fins al pa o els taps de suro, passant per diverses postres en forma de mousse o la característica espuma de les cerveses. A part dels seus usos més coneguts en la indústria alimentària, les propietats fisicoquímiques de les espumes fan que les seves aplicacions siguin nombroses en camps tan variats com ara en la detergència, l'extinció d'incendis, les espumes polimèriques usades com a aïllants tant tèrmics com acústics o com a materials capaços d'amortir cops.

L'ampliació del mercat dels productes en forma d'espuma es produeix en el moment en què es troben nous mètodes de formació i d'estabilització que permeten obtenir espumes duradores i homogènies amb les propietats intactes i controlables. En molts casos la presència de l'espuma és una pura qüestió de màrqueting per a la satisfacció del client, per exemple en moltes de les preparacions alimentàries sorgides de les cuines dels restaurants d'alta gastronomia, però la capacitat de les espumes per adherir-se a les superfícies les fa molt útils per actuar com a sabons o extintors d'incendis. En la indústria s'usen també per a la separació d'impureses en minerals mitjançant processos de flotació i en la indústria tèxtil com a transportadors d'agents de neteja ja que permeten reduir considerablement la quantitat d'aigua necessària i el volum de la brossa.

Què és una espuma?

La primera pregunta que sorgeix en intentar comprendre, des d'un punt de vista científic, les propietats de formació i estabilitat de les espumes, és, però, què és realment una espuma. Què tenen en comú uns materials aparentment tan diferents com l'espuma d'una cervesa i el suro? Una inspecció visual de qualsevol espuma ens permet deduir que es tracta d'un sistema format per dues fases, una de condensada (que pot ser líquida o sòlida) i una de gasosa que es troba dispersada (en forma de bombolles) en la primera. Així doncs les espumes, ja siguin sòlides com el suro o el pa, o líquides, com l'espuma de la cervesa, estan formades per cel·les que contenen el gas dispers, separades entre elles per una estructura formada per una sèrie de canals interconnectats que contenen la fase condensada. A aquesta part de l'espuma que està tota unida se l'anomena *fase contínua* i pot ser un sòlid, un líquid, una mescla de líquids o una solució homogènia. L'estabilitat a llarg termini de l'espuma depèn en gran manera de les propietats i, per tant, de la composició de la fase condensada.

Pel que es refereix a les propietats globals de l'espuma, el fet de contenir un gas encapsulat en les cel·les els confereix una densitat relativament baixa, que les fa molt útils per ser usades en tècniques de separació. A més d'una baixa densitat presenten també una gran superfície per unitat de massa, cosa que permet usar-les per a la flotació de minerals separant el material de rebuig del mineral pur per adsorció del rebuig sobre la superfície de les bombolles.

A la fase gas se l'anomena normalment *fase dispersa* mentre que a la condensada (sòlida o líquida) se la denomina *fase dis-*

persant. Per caracteritzar una espuma cal tenir en compte alguns factors com ara la polidispersitat de l'espuma, és a dir, la distribució de grandàries de les diferents cel·les que contenen el gas. Aquesta pot variar notablement: observant l'espuma formada per un detergent rentavaixelles podem distingir fàcilment bombolles de grandàries molt diferents. Si mirem però l'espuma compacta d'una cervesa Guinness, veurem que, tot i que hi ha petites diferències, pràcticament totes les bombolles semblen ser de la mateixa mida.

Si es mira l'estabilitat podem dir que les espumes són inestables ja que la fase condensada (líquida o sòlida) està completament en contacte amb un gas, per tant, en una interfase, que és la zona més inestable de qualsevol dissolució. Tal com s'explica més endavant aquesta inestabilitat fa que les espumes líquides evolucionin de manera que el líquid que compon la fase dispersant dreni per efecte de la gravetat i que la seva presència en la fase dispersant vagi disminuint amb el temps. Així doncs, es passa de tenir una espuma amb una proporció alta de líquid (*espuma humida*) a tenir una espuma amb una baixa proporció de líquid (*espuma seca*). Per poder retardar aquest procés i estabilitzar l'espuma s'afegeixen agents surfactants a la fase líquida que actuen sobre la superfície i fan disminuir la tensió superficial. En el cas de les espumes sòlides, l'estabilització es produeix en el moment de la solidificació de la fase dispersant. Aquest procés provoca que el gas quedi atrapat entre les lamel·les del sòlid de manera que obtenim una espuma sòlida, estable, mentre ho sigui el sòlid que forma les parets de les cel·les.

Com es forma una espuma?

Com en el cas d'altres sistemes col·loïdals, les espumes es poden formar de dues maneres diferents: per dispersió o per condensació. En l'obtenció d'espumes per dispersió petits volums del gas s'introdueixen de forma externa en la fase condensada, per exemple per bombolleig. Depenent del sistema triat es podrà obtenir una espuma més o menys homogènia. Un exemple típic és la preparació de la nata de pastisseria, on es dispersen bombolles d'aire en la nata líquida per l'efecte mecànic de l'agitació amb unes varetes. En l'altre mecanisme de formació, la condensació, la fase gas s'introdueix inicialment en la fase condensada dissolta a nivell molecular i posteriorment es «condensa» en aquesta en forma de bombolles, per mitjà d'algun mecanisme de tipus calor o reducció

de pressió. La formació de la corona d'espuma en un got de cervesa és un exemple clàssic d'aquest segon tipus de mecanisme de formació d'espumes.

A fi i efecte d'estudiar les propietats de les espumes és necessari disposar de procediments que assegurin una certa reproductibilitat de les espumes formades. Això s'aconsegueix controlant tant la composició de la fase condensada com la grandària de les bombolles. Per poder controlar aquesta grandària el millor és emprar espumes formades per dispersió, ja sigui fent bombollejar el gas dins del líquid amb un tub capil·lar, o be bombollejant-lo a través d'una paret porosa (*spar-ging*). Quan es bombolleja el gas a través d'un capil·lar, si el flux és constant i baix, és relativament fàcil produir mostres monodisperses. Normalment es col·loca el tub a la base del recipient de manera que es minimitzin les possibles fluctuacions produïdes en el flux a causa del líquid que envolta el capil·lar. Si s'augmenta el flux de gas al capil·lar, el procés d'emissió de bombolles es bifurca i produeix bombolles de mides alternes. Si es continua augmentant, aconseguim espumes polidisperses. També es troben espumes per dispersió que són sempre polidisperses. Aquest és el cas de les espumes formades per agitació on una gran massa de gas es fragmenta repetides vegades. En aquest cas la polidispersitat està afitada ja que en dividir les bombolles diverses vegades s'arriba a tenir un rang definit per la grandària de les bombolles.

Moltes de les espumes que trobem actualment en la indústria són formades per condensació. Aquest mètode pot produir espumes bastant homogènies ja que les bombolles creixen fins a una mida determinada a mesura que pugen cap a la superfície del líquid (això és fàcil de veure en l'espuma d'una cervesa). La situació és força diferent en el cas d'una espuma d'afaitar que també està formada per condensació. En aquest cas les bombolles són molt petites i no tenen tendència a pujar ja que es veuen frenades a causa de l'alta densitat de la fase líquida. Aquest tipus d'espumes estan a un pas de l'espuma sòlida ja que en elles la fase líquida és tan densa que pràcticament es pot considerar sòlida.

En el cas de les begudes carbonades quan s'obre l'ampolla, el CO_2 , produït durant la fermentació en el continent i solubilitzat sota pressió, s'allibera en forma de bombolles que creixen i s'ajunten les unes amb les altres per ascendir fins a la superfície formant una espuma. Des del punt de vista de la química física direm que abans d'omplir l'ampolla, la dissolució està

sobresaturada i l'excés de gas forma una fase dispersa en reduir la pressió externa. La formació de bombolles s'inicia amb un procés de nucleació en el qual s'agreguen algunes molècules de diòxid de carboni de les que hi ha a la dissolució. Aquesta agregació comporta, però, una energia d'activació. En alguns llocs de la superfície del recipient (impureses, fissures de la copa, etc.) l'energia d'activació és més petita que en l'interior del líquid i, per tant, les molècules del gas s'ajunten amb més facilitat. Aquest fet ha portat a algunes marques de cervesa a dissenyar gots on es ratlla el fons amb un làser a fi d'obtenir uns llocs de nucleació que permetin generar una espuma controlada, ja que en cas contrari la quantitat i la qualitat de l'espuma depèn molt de l'edat i l'estat del got. Quan no hi ha impureses, les bombolles es formen preferentment en les fissures del recipient. Per tant, per obtenir una bona corona d'espuma és preferible una gerra de ceràmica a una de vidre.

En qualsevol dels casos esmentats, al principi les bombolles estan separades per capes gruixudes de fase dispersant (durant la formació de l'espuma). En aquestes condicions es pro-

duiran bombolles esfèriques. En pujar les bombolles, la pressió externa (hidrostàtica) disminueix i les bombolles augmenten el seu diàmetre i es redueix la pressió interna: la mateixa quantitat d'aire ocupa ara més espai. Aquesta pressió serà de totes maneres sempre major que l'externa. Aquesta diferència de pressió ha de ser compensada per les lamel·les, capes de líquid entre bombolles. Quan les bombolles han arribat a la superfície i s'han agregat per formar la corona d'espuma, amb el temps la gravetat, per drenatge, anirà transformant aquestes espumes humides amb bombolles esfèriques en espumes seques, és a dir, amb baixa proporció de líquid respecte de la quantitat de gas. En aquest estadi és freqüent observar el fenomen de la coalescència. En cas que les lamel·les que separen les bombolles s'aprimin més enllà d'un cert llindar, s'observa la formació d'una única bombolla a partir de dues bombolles veïnes. En les espumes seques la geometria de les cel·les passa de ser esfèrica a polièdrica i el sistema es divideix en dues regions ben diferenciades amb l'espuma a la part superior i una reserva de líquid a la inferior.

Processos implicats en la desestabilització de les espumes líquides

L'experimentació ha mostrat que el fenomen de l'espumació no es dona en un líquid pur, sinó que cal que en el medi hi siguin presents substàncies superficialment actives. Per poder dispersar un gas en un líquid i que es formi una espuma mínimament útil s'han de complir les condicions següents:

- La fase líquida ha de poder expandir la seva àrea superficial de manera que formi una membrana al voltant de les bombolles de gas.
- El líquid ha de tenir les propietats reològiques i superficials necessàries per retardar l'aprimament de les lamel·les que porta a la coalescència.
- Les propietats del líquid han de ser tals que retardin la difusió del gas a través de les lamel·les per passar d'unes bombolles a les altres o a l'atmosfera.

Malgrat que les espumes no són sistemes termodinàmicament estables i més tard o més d'hora acaben condensant, és a dir, se separen en dues fases, de cara a les aplicacions es pot dir que una espuma és «estable» si roman durant un cert temps

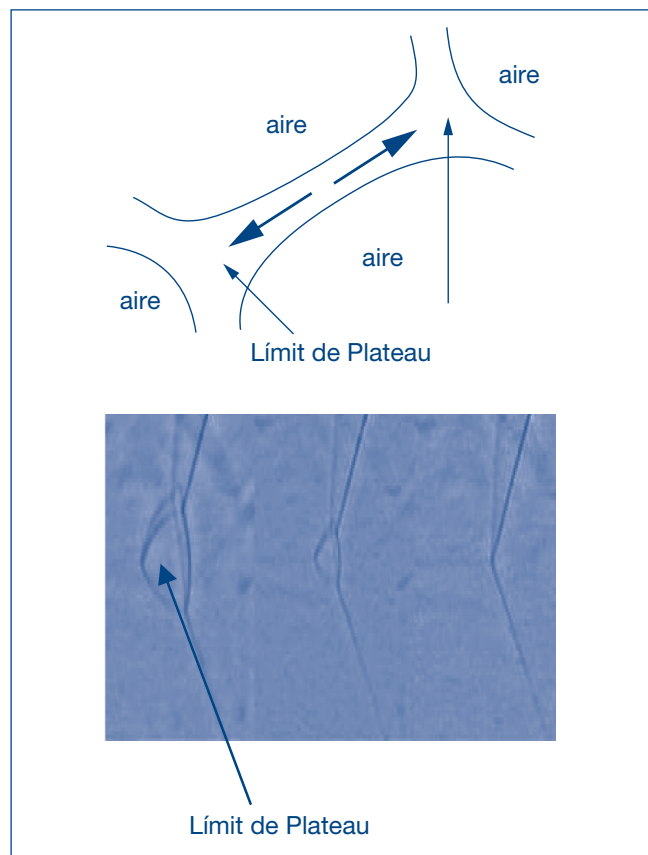


FIGURA 1. Drenatge de líquid cap al límit de Plateau.

sense desfer-se, mantenint les seves propietats fisicoquímiques més o menys constants durant aquest període. Per trencar aquest estat d'estabilitat relativa cal alguna acció externa que trenqui les bombolles. De la discussió anterior es desprèn, però, que els dos factors principals que afecten l'estabilitat de les espumes són el drenatge del líquid per les unions entre bombolles i la ruptura de les membranes líquides que uneixen les bombolles. La pèrdua de líquid per drenatge depèn de la viscositat del líquid i de la gravetat, mentre que el trencament de les lamel·les es deu majoritàriament a pertorbacions aleatòries, mecàniques, tèrmiques o a la presència d'impureses ja sigui en la mescla o en el recipient.

A continuació es descriu amb més detall cadascun dels mecanismes que afecten l'estabilitat d'una espuma:

- *Drenatge gravitacional.* El líquid pesa molt i té tendència a baixar per acció de la força de la gravetat i, per tant, a aprimar el gruix de les lamel·les que separen les bombolles de gas. Aquest efecte és més acusat com més gran és la proporció líquid-gas, és a dir, quan tractem amb una espuma humida. En aquests sistemes, la proporció de líquid disminueix ràpidament i la pèrdua de líquid fa que la lamel·la arribi a una grandària crítica d'entre 5 i 15 nm, gruix a partir del qual la làmina de líquid no pot suportar la pressió del gas de la bombolla i es produeix la ruptura. Aquest efecte és l'única causa de desestabilització en el cas d'espumes no estables. La disminució de la proporció de líquid condueix a una espuma seca amb bombolles de forma polièdrica. És en aquest moment quan apareix el segon fenomen de desestabilització.
- *Drenatge de la pressió capil·lar.* Aquest fenomen es produeix sempre que hi hagi moltes bombolles en contacte en una espuma, però és especialment acusat quan s'ha arribat a l'estadi d'espuma seca o polièdrica. Quan tres o més bombolles es troben juntes tendeixen a adoptar una forma polièdrica, de manera que la paret que separa dues bom-

bolles es quasi plana mentre que la corba entre bombolles és molt forçada. A aquesta part se l'anomena *regió de múltiple contacte* o *límit de Plateau* i la curvatura mateixa fa que actuï com un èmbol capil·lar, empenyent el líquid entre bombolles cap al límit de Plateau, i d'aquesta manera aprima el film que separa les bombolles i provoca finalment la coalescència o la ruptura de les bombolles i el trencament de l'espuma en últim terme.

- *Difusió del gas o maduració d'Ostwald.* Quan una bombolla és petita, la pressió al seu interior és elevada, mentre que en créixer aquesta pressió va disminuint. Durant l'envelliment (maduració) de l'espuma les bombolles grans creixen i les de volum més petit acaben per desaparèixer, la causa d'aquesta maduració és la diferència de pressió entre les bombolles que provoca una difusió de gas de les bombolles petites (pressió elevada) a les més grans (pressió baixa). La maduració d'Ostwald té lloc quan dues bombolles de mida diferent estan en contacte, el gas que les forma passa de les petites a les grans. Com a resultat la bombolla gran creix i la petita desapareix, això esdevé continuament en una espuma polièdrica, ja que les parets de les bombolles són molt primes i la difusió del gas és fàcil. Aquest problema es pot minimitzar si s'aconsegueix una espuma monodispersa on la grandària de totes les bombolles (i, per tant, la seva pressió interna) són similars.

Malgrat que tots tres fenòmens es donen conjuntament en la desestabilització d'una espuma, una vegada les lamel·les han arribat a un gruix de pocs centenars de nanòmetres el drenatge gravitacional es torna negligible i l'acció del drenatge per la pressió capil·lar i la maduració d'Ostwald és predominant.

Factors que influeixen en l'estabilització de les espumes líquides

Per poder assegurar *a priori* que una espuma serà més o menys estable, s'han de complir una o diverses de les condicions següents:

1. La fase líquida ha de ser molt viscosa. Això permetrà frenar el drenatge hidrodinàmic i dotar l'espuma d'un «matalàs» que amorteix els cops ja siguin aleatoris (provocats pel moviment brownià de les molècules) o provocats externament.

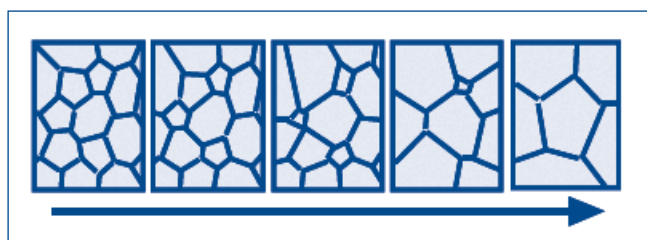


FIGURA 2. Evolució temporal de l'estructura d'una espuma.

Si el líquid que envolta les bombolles és molt viscos, és a dir, té resistència a fluir, l'efecte de la gravetat es veurà disminuït i per tant l'espuma trigarà més a col·lapsar (desapareixer). En el límit de densitats molt elevades s'acaba obtenint espumes sòlides en les quals el problema del drenatge no existeix.

2. Hi ha efectes de superfície com el de Gibbs-Marangoni que també actuen com a «cura» de les superfícies de les lamel·les aprimades per la pèrdua del líquid. Quan s'adsorbeix un tensioactiu, la tensió superficial baixa (aquest és l'efecte habitual) fins al punt de saturació superficial, quan no hi cap més tensioactiu a la superfície. A aquesta adsorció fins al punt de la saturació se li diu *efecte Gibbs*. Per altra banda, la tensió superficial instantània (dinàmica) en una superfície acabada de formar és sempre superior a la d'equilibri i, per tant, durant un temps els surfactants presents en la dissolució s'adsorbiran a la superfície per reduir la tensió superficial. El temps necessari per arribar a l'equilibri per difusió superficial es coneix com a *efecte Marangoni*. Aquests dos efectes són generalment complementaris i es coneixen conjuntament com a *efecte Gibbs-Marangoni*.

El resultat combinat dels dos fenòmens és el següent: en produir-se el drenatge es forma una nova superfície amb una concentració de surfactant menor que la que hi havia, per tant augmenta la tensió superficial local i per compensar aquesta diferència de pressió es crea un gradient de tensió superficial al llarg de la lamel·la causant que el líquid flueixi des de les regions de baixa tensió superficial fins a les noves superfícies més estretes oposant-se així a l'estretament de les lamel·les. Això suposa un factor addicional d'estabilització ja que implica un transport de solvent que s'oposa al drenatge gravitacional.

3. Repulsions electrostàtiques i estèriques entre interfases adjacents degudes a l'adsorció de surfactants iònics, no iònics o polimèrics que s'oposen al drenatge amb efectes reductors de la pressió. Si a la superfície s'adsorbeix un tensioactiu iònic entre dues bombolles es produeix un efecte de repulsió que evita la coalescència d'aquestes. Es forma una doble capa elèctrica a la interfase que pot interaccionar amb la interfase oposada com a forma de rebaixar la pressió. També es donen altres efectes d'estabilització ja que un grup iònic necessita un alt grau de solvatació i per tant arrossegara al seu voltant un elevat nombre de molècules que ajuden a rebaixar la pressió. L'efectivitat de aquestes subs-

tàncies iòniques com a agents espumants va unida a la naturalesa del contraió associat: com més soluble sigui en el medi més bon espumant serà el surfactant iònic.

Les espumes comestibles estan estabilitzades normalment per proteïnes o surfactants de baix pes molecular (lípid), encara que també podem trobar barreges de tots dos. Aquestes dispersions estan estabilitzades per dos mecanismes incompatibles. Les proteïnes formen una capa condensada viscoelàstica de molècules immòbils que interaccionen en la interfase quan les proteïnes que són adsorbides a la superfície prenen configuracions (formes tridimensionals) significativament diferents de les que tenen en dissolució. El resultat és la formació d'una capa relativament densa i parcialment estructurada sobre la superfície, cosa que imposarà una certa rigidesa a les parets de les bombolles i produirà un increment en l'estabilitat final de l'espuma. Les espumes estabilitzades per proteïnes, però, es desestabilitzen en presència de lípids quan aquests s'adsorbeixen competitivament en la interfase, ja que trenquen la interacció proteïna-proteïna. Els lípids quan actuen com a surfactants de baix pes molecular, desplacen les proteïnes de la interfase, cosa que dona com a resultat inestabilitat de l'espuma i finalment el col·lapse. No es pot, per tant, tenir una espuma estabilitzada simultàniament per proteïnes i per tensioactius.

4. Un altre factor que contribueix a l'estabilitat de les espumes és el retardament de la difusió del gas des de les bombolles petites fins a les grans, és a dir, evitar la maduració d'Ostwald. Això es pot aconseguir utilitzant tots els efectes esmentats anteriorment ja que alenteixen l'aprimament de les lamel·les i, per tant, dificulten la difusió de gas entre bombolles. En aquest punt s'ha de tenir en compte que la naturalesa del gas també és important per evitar la seva difusió i, per tant, la coalescència de l'espuma: una espuma formada per nitrogen és més estable que una formada per diòxid de carboni, ja que aquest és més soluble en els líquids que el nitrogen.

No es pot establir una relació directa entre l'estructura d'un surfactant i el seu poder d'espumació ja que no hi ha una relació directa entre la capacitat d'un surfactant per produir espuma amb la seva capacitat d'estabilitzar-la. La capacitat d'un surfactant d'actuar com a agent espumant depèn de la seva efectivitat per reduir la tensió superficial de la solució, les seves característiques de difusió, i l'elasticitat que aporta a

les superfícies. La quantitat d'espuma que es pot aconseguir estarà relacionada amb el producte de la tensió superficial i la nova àrea superficial formada durant el procés d'espumació. És fàcil veure que com més baixa és la tensió superficial de la solució, més gran serà l'àrea superficial formada per una mateixa manera de formar l'espuma. Però la persistència de l'espuma és tan important com la seva formació.

Aplicacions de les espumes líquides: l'espuma de la cervesa

Un cop esmentades breument les característiques principals de les espumes i de la seva estabilitat, en aquesta secció pasarem a parlar d'algunes de les aplicacions més usuals de les espumes, i comentarem amb més detall alguns fenòmens relacionats amb l'espuma de la cervesa.

Quan s'obre una ampolla de cervesa s'allibera un gas (diòxid de carboni en la majoria dels casos) que està dissolt en el líquid a pressió elevada. Per tant, en llevar el tap, la pressió disminueix bruscament, procés que provoca l'alliberament del gas que puja en forma de bombolles cap a la superfície del líquid formant la coneguda corona d'espuma. El diòxid de carboni contingut a les bombolles es produeix de forma natural durant les reaccions químiques que porten a la formació de la cervesa, encara que avui en dia tant a la cervesa com a altres begudes carbòniques se'ls afegeix una quantitat addicional de gas de manera artificial. La cervesa a part d'estar formada majoritàriament per aigua, entre els seus components conté etanol, que redueix les tensions a la interfície líquid-gas i ajuda a formar l'espuma en el cas de les cerveses tradicionals. Les cerveses sense alcohol també en contenen, encara que en quantitats molt inferiors, i, per tant, en aquest cas el mètode d'estabilització de l'espuma és diferent. No obstant això, un excés d'etanol a la beguda pot produir l'efecte contrari ja que disminueix el poder estabilitzador de la malta (constituent en general de la cervesa), cosa que en provoca la precipitació. Com que generalment els consumidors de cervesa demanen que aquesta tingui una espuma forta i duradora, els fabricants hi afegeixen estabilitzants de l'espuma i també, en funció del tipus d'espuma desitjat, dissolen a la beguda nitrogen ja que amb aquest gas s'aconsegueix una espuma de bombolles més petites i estables (és el cas de la cervesa Guinness, famosa per la seva espuma densa i consistent). S'ha de tenir

en compte, però, que l'addició de nitrogen altera el gust de la cervesa fent-lo més suau, i la picor característica de la cervesa desapareix.

Una alternativa per millorar l'estabilitat de l'espuma és afegir-hi agents o sals estabilitzants. Aquestes inclouen principalment sals de ferro juntament amb agents reductors per evitar l'enfosquiment de la cervesa. Les sals de ferro, níquel i zinc juntament amb certs polipèptids d'alt pes molecular també ajuden en l'estabilització de l'espuma, encara que en aquests casos és molt important tenir en compte la toxicitat de les sals, ja que s'han arribat a produir enverinaments per cobalt (actualment aquest tipus d'additius han estat prohibits per les autoritats sanitàries).

Una mesura de la capacitat d'una solució per formar espumes és l'espumabilitat. Alguns tipus de cervesa se serveixen amb una corona d'espuma que, idealment, hauria de durar fins que es consumeixi completament la beguda. Com a mesura de l'espumabilitat s'utilitza en aquest camp el test de Rudin, i s'obté una mesura quantitativa de l'estabilitat de l'espuma en forma del valor de retenció de la corona (HRV, *head retention value*). La cervesa esbravada es col·loca en tub de vidre de 350 mm de llarg i 27 mm de diàmetre fins a una marca a 100 mm de la base. A la base hi ha un aglomerat de vidre (filtre) porós a través del qual es bombolleja diòxid de carboni (*sparging*), s'ajusta el flux fins que l'espuma arriba a la marca de 325 mm de la base en seixanta segons, en aquest moment es para el flux de gas i es mesura el temps que triga el líquid a arribar de la marca de 50 mm a la de 75 mm. Aquest temps serà l'HRV i com més gran sigui més estable és l'espuma. Els alginats, les gomes de xantè i la goma aràbiga augmenten la viscositat del líquid i, per tant, augmenten l'HRV, s'ha de tenir en compte, però, que qualsevol producte que afegim a la cervesa produeix un canvi en el seu gust, generalment un tast més suau. Els cervesers també usen com a mesura de l'estabilitat de l'espuma el mètode de NIBEM. En aquest, la cervesa se serveix en una cubeta i després es bombeja CO₂ a través d'un orifici estàndard fins que es forma una espuma. Després de la formació de l'espuma es determina la posició de la interfase amb una sonda que mesura conductivitats i que està connectada a un motor de manera que el senyal de la sonda serveix per controlar el moviment del motor i mantenir la sonda en contacte amb la interfase durant el col·lapse. El mètode de NIBEM és molt sensible al moviment de l'aire a la part superior de l'espuma, que pot destruir-la.

El cerveser ha d'aconseguir que l'espuma tingui la consistència tradicional de la cervesa que està tractant de fer. Un excés d'espuma causarà problemes en el procés de fabricació. La cervesa té proteïnes que actuen com a surfactants naturals, encara que en alguns casos aquests no són suficients i de vegades en funció de la consistència i durabilitat desitjades per a l'espuma s'han d'afegir surfactants addicionals. Els efectes més negatius sobre l'espuma de la cervesa són els produïts pels olis i greixos que es troben a la vora del got a causa del menjar ja que poden destruir l'espuma en qüestió de segons.

L'estabilitat i el gust de l'espuma són factors importants a l'hora de qualificar la qualitat de una cervesa. Com ja s'ha dit la presència de lípids pot afectar aquestes propietats. Aquests lípids poden provenir del mateix procés de fabricació o bé introduir-se en l'acte de la consumició. Els estudis de la cervesa han demostrat que el lípid afegit quan es consumeix provoca un descens en l'estabilitat de l'espuma però que si la cervesa es manté emmagatzemada durant vint-i-quatre hores l'estabilitat es recupera. Una possible explicació per a aquest fenomen és que quan es deixa el lípid un temps suficient en la dissolució forma complexos amb els altres compostos de la cervesa, cosa que redueix l'efecte negatiu d'aquests. Aquest efecte negatiu també es pot combatre afegint proteïnes que complexin els lípids aliens a la cervesa, com per exemple la puroindolina del blat (PIN). Es creu que la PIN actua unint els residus lliures dels lípids de tal manera que no poden desestabilitzar l'espuma.

En el cas d'una altra coneguda beguda alcohòlica que conté diòxid de carboni, el cava, l'espuma ideal és una que es formi ràpidament amb bombolles petites, humida, i que col·lapsa ràpidament, idealment hauria de romandre com un collaret de fines bombolles en el menisc que forma la superfície del cava.

Altres aplicacions de les espumes líquides

Espumes en el menjar. A la cuina es preparen molts aliments en forma d'espuma pel mètode tradicional de batre o d'agitar un líquid, per exemple les clares d'ou muntades a punt de neu. En aquest cas l'espuma es forma ràpidament gràcies a les proteïnes que conté l'ou. Aquestes proteïnes que ajuden a la formació de l'espuma només es troben a la clara de l'ou ja que al

rovell hi trobem greixos que actuen com a antiespumants. Per contra l'estabilitat de la nata, un altre exemple clàssic d'espuma alimentària, s'atribueix al àcid grassos que conté la llet, que s'agregen mantenint l'estabilitat de les bombolles d'aire formades mecànicament dins de la llet. El gelat és una estructura que des del punt de vista fisicoquímic encara és molt més complexa ja que és una espuma i una emulsió a la vegada. A part de la tècnica tradicional de batre o agitar un líquid, a la cuina actual s'obtenen moltes preparacions en forma d'espuma per dispersió de diòxid de carboni emprant els anomenats *sifons d'espuma*.

Flotació de minerals. La separació del ferro de les seves impureses es pot fer utilitzant espumes. Una capa de ferro finament disgregada es deixa suspesa en un líquid espumant, que s'agita, i la separació es produeix a causa de la diferència en la mullabilitat de les diferents espècies: una partícula amb baix tant per cent de metall té un caràcter hidrofílic i, per tant, es mulla i drena a través de l'espuma, els components amb continguts de metall alts tenen un cert caràcter hidrofòbic i, per tant, no es mullen i no drenen romanent a l'espuma. Aquest procés també es pot aplicar al carbó ja que el carbó en si és hidrofòbic; per tant, es pot separar de les partícules no desitjades mitjançant flotació.

Espumes extintores d'incendis. Aquest tipus d'espumes ataquen el foc en els tres fronts fonamentals per a la seva propagació. Primer exclouen l'oxigen de la zona de combustió, segon refresquen el combustible per sota del punt d'ignició, i finalment atrapen el vapor de combustible a la superfície del líquid. La capacitat de les bombolles per ascendir també es pot aprofitar en aquesta aplicació quan l'incendi es produeix en un recipient profund, l'espuma es bombeja al fons del continent i conforme va ascendint l'incendi s'apaga. Les espumes extintores han de romandre el màxim de temps possible ja que existeix el perill que l'incendi apagat es torni a encendre. Per tant, com més temps romanguin per sobre de les cendres millor. Aquesta característica, en termes d'estabilitat de l'espuma, significa que el drenatge ha de ser molt lent. A més, tenint en compte la seva aplicació, ha de tenir una alta resistència a la calor i, per tant, una fracció líquida relativament gran. Com més augmenta la fracció líquida, però, més petita és l'àrea de cobertura que es pot produir per unitat de temps ja que hi haurà menys bombolles per unitat d'àrea perquè hi ha més líquid a les lamel·les. Per tant, s'haurà de triar l'espuma més adient en cada cas. Les es-

pumes de baixa i mitjana fracció líquida cobreixen una àrea gran per unitat de temps però tenen una resistència a la calor més petita. Les d'alta fracció líquida tenen per contra una àrea d'expansió petita. El fet que el gas usat a les espumes extintores d'incendis sigui en gran part aire té l'avantatge que la gent que ha estat ruixada amb elles encara pot respirar a sota.

Espumes en l'extracció de petroli. Normalment s'injecta aigua a la fossa on es troba el petroli, i aquest sura fins a la superfície, aquesta tècnica deixa, però, als porus de la roca aproximadament un 50 % del petroli sense recuperar. Per recuperar el petroli que queda s'han d'utilitzar tècniques que alterin la força de tensió interfacial, però afegir aquests productes químics encareix notablement el procés d'extracció. Per no encarrir excessivament el producte final es pot usar una espuma per distribuir-lo ja que permet cobrir més superfície amb menys producte. L'espuma ha de tenir una mida de bombolla més petita que el porus de la roca on ha d'entrar per tal d'extreure el petroli. Cal tenir en compte també que quan es produeix el drenatge i disminueix la fracció líquida l'espuma passa a tenir un comportament no newtonià i augmenta la seva viscositat.

Espumes de detergent. En parlar d'espumes l'exemple més evident que ens ve a la memòria és la generada pels detergents. Les molècules constituents dels sabons i detergents tenen una extremitat hidrofílica i una altra hidrofòbica, són tensioactius i, per tant, si introduïm aire en el líquid on hi ha el detergent s'acaba formant una espuma. Quan es renta, l'extremitat hidrofòbica se situa rodejant la brutícia formada per àcids grassos i col·loca les extremitats hidrofíliques en contacte amb

l'aigua. Les partícules de brutícia queden encapsulades pel detergent i formen gotes suspeses a l'aigua, quan l'aigua està neta les extremitats hidrofòbiques no tenen afinitat pel dissolvent, per tant, formen films prims anomenats *membranes*. Si entra aire en les membranes aquestes es corben formant bombolles. Per corbar les membranes és necessari aplicar una força, com més curvatura més força s'ha d'aplicar. La curvatura de les bombolles deriva de la pressió del gas que hi ha al seu interior. La formació d'espuma per a un sabó és, per tant, un procés secundari del rentat i una mesura de la netedat del dissolvent en el qual està dissolt.

Alguns exemples d'espumes sòlides i les seves aplicacions

Les espumes sòlides, pel que fa a la seva estructura, són molt més variades que les seves anàlogues líquides. De totes maneres són tant o més importants en la indústria que les líquides. La majoria dels seus usos deriven de la seva baixa densitat, encara que també es poden combinar amb altres propietats com ara una baixa conductivitat tèrmica o elèctrica per usar-les com a aïllants.

A les espumes sòlides hi ha una fase sòlida connectada en la qual el gas està dispersat. En aquest cas s'usa el terme *cel·lular* quan el material conté cel·les polièdriques tancades, com si resultés de la solidificació d'una espuma líquida. Típicament en aquest tipus de materials dues cel·les comparteixen una cara, tres es troben en una aresta i quatre en un vèrtex. Habitualment, els materials cel·lulars tenen al-

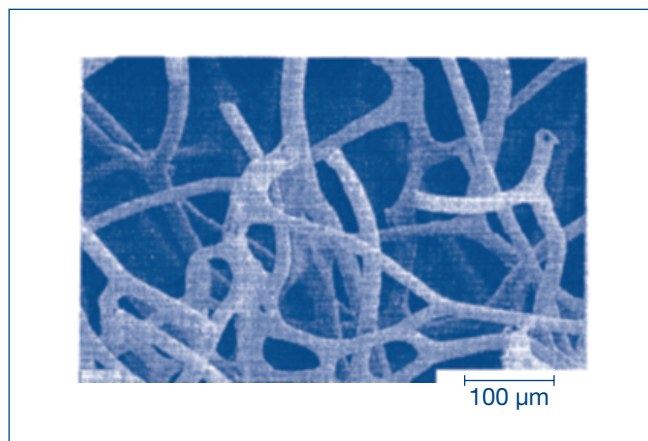


FIGURA 3. Esponja de mar.

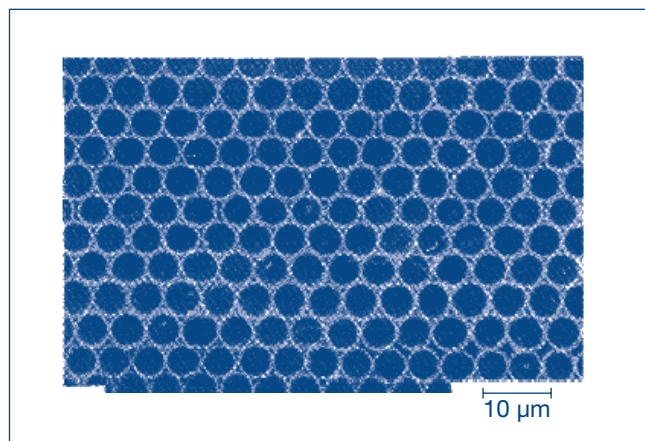


FIGURA 4. Secció tangencial d'un material cel·lular absorbent dels xocs.

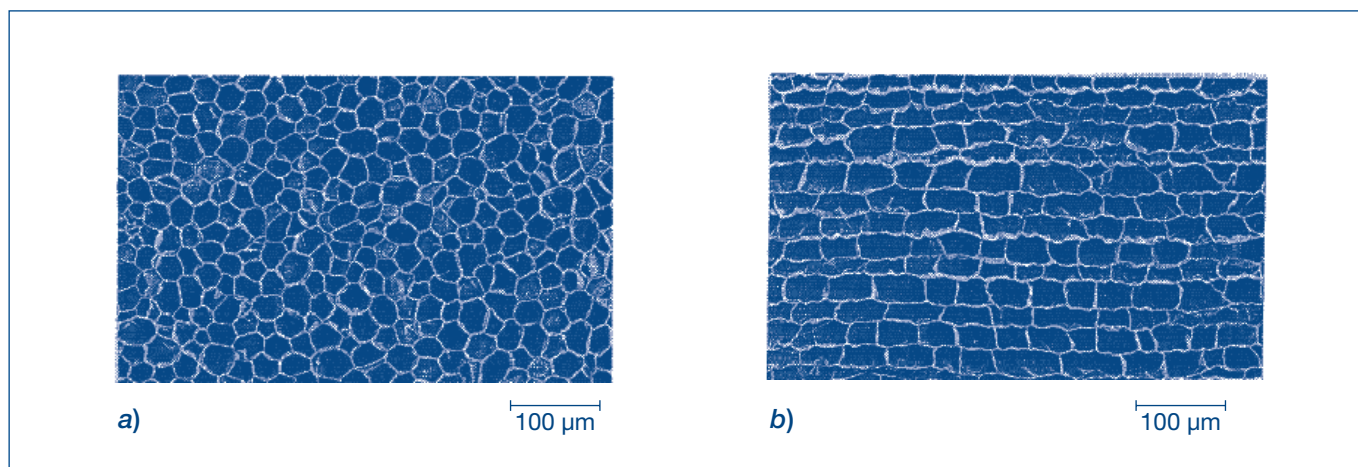


FIGURA 5. a) Secció tangencial del suro, perpendicular al radi de l'arbre. b) Secció del suro que conté el radi de l'arbre.

gunes cel·les obertes i, per tant, la fase gas està interconnectada al llarg de tot el material. Encara que no es pugui classificar un material com a cel·lular perquè les cel·les no siguin clarament identificables, de vegades s'usa també aquesta denominació per a alguns materials naturals com és el cas de les espumes.

Els materials cel·lulars formats per cilindres buits o esferes es preparen industrialment com a absorbents dels xocs, i a més han demostrat la seva eficàcia al laboratori com a models cel·lulars per a l'estudi del comportament de compressió.

El suro és una espuma sòlida natural, prové de l'escorça de l'alzina surera. Una característica estructural remarcable del suro és que com a espuma és molt anisotròpica, és a dir, no és igual en totes les direccions de l'espai. En el pla horitzontal sembla similar a les espumes bidimensionals isotròpiques, iguals en totes les direccions, però en la dimensió vertical les cel·les presenten unes dimensions sensiblement majors. El suro té unes propietats característiques que el fan molt útil per a diverses aplicacions. L'entramat del suro conté un elevat percentatge d'aire, prop del 89 %. Per tant, té una densitat molt baixa d'entre 0,10-0,20 kg/dm³. Les cèl·lules del suro són impermeables als líquids i gasos, gràcies a la presència de la suberina. Aquesta propietat, unida a la baixa densitat, fa que el suro sigui ideal per usar-lo en pesca i com a flotador en general. La seva impermeabilitat també contribueix a augmentar la seva capacitat d'aïllament. Posseeix una gran capacitat per suportar grans pressions sense sofrir deformacions permanents, fet que el fa idoni per ser usat com a tap d'ampolles de vi i de cava.

Espumes metàl·liques

Una espuma metàl·lica és una estructura cel·lular consistent en una fase contínua sòlida metàl·lica, generalment alumini, i una fase dispersa gasosa atrapada als porus del sòlid. Pot presentar una forma de cel·les tancades on l'aire està aïllat en cadascuna de les bombolles o una estructura contínua de bombolles, cas en què s'anomena *espuma de cel·les obertes*. Generalment un 80 % del volum de les espumes metàl·liques està format per les bombolles d'aire.

Una espuma metàl·lica de cel·les obertes té una estructura similar a la de l'espuma de poliuretà i normalment s'usen com a intercanviadors de calor i també en la indústria aeroespacial.

Les espumes metàl·liques de cel·les tancades es van començar a desenvolupar el 1990 i es formen principalment injectant un gas o un agent espumant en un metall fos. La mida

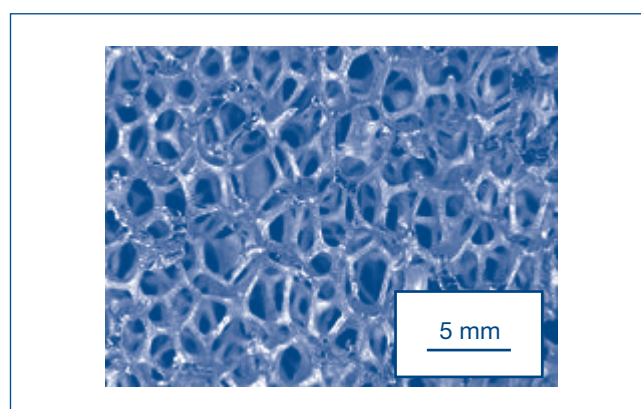


FIGURA 6. Espuma metàl·lica de cel·les obertes.

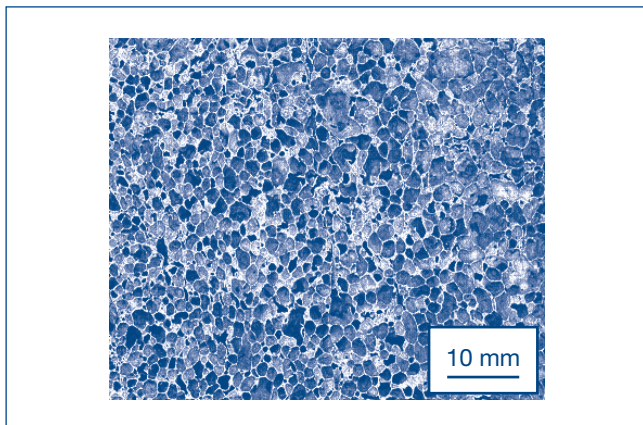


FIGURA 7. Espuma metàl·lica de cel·les tancades petites.

dels porus o mida de cel·la és gran, entre 1 i 8 mm. Aquest tipus de materials s'usen com en el cas de les espumes polimèriques com a absorbents dels cops, amb l'avantatge que poden aguantar càrregues més grans. Al contrari de les espumes polimèriques, les metàl·liques mantenen la deformació després del cop, i per tant només es poden usar un sol cop. Es tracta d'uns materials lleugers i durs, que encara no han estat àmpliament aplicats.

Bibliografia

- 1) WEAIRE, D.; HUTZLER, S. *The physics of foams*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- 2) HIEMENZ, P. C.; RAJAGOPALAN, R. *Principles of colloid and surface chemistry*. 3a ed., revisada i ampliada. Nova York: Marcel Dekker, 1997.
- 3) MYERS, D. *Surfaces, interfaces, and colloids: principles and applications*. 2a ed. Nova York: Wiley-VCH, Cop., 1999.

Autora

Norma Merchán és llicenciada en química per la Universitat de Barcelona. Actualment és membre del Grup d'Estructura Electrònica al Departament de Química Física de la Universitat de Barcelona, on ha començat la seva tesi doctoral. Aquest treball sobre les espumes fou realitzat durant el seu darrer curs de llicenciatura dins de les activitats desenvolupades a l'assignatura química d'interfases i col·loides impartida pel professor Francesc Mas.