



MALEÏTS FILAMENTS DE PLASTILINA...

Claudi Mans i Teixidó

Departament d'Enginyeria Química
Facultat de Química · Universitat de Barcelona

LA PREGUNTA DEL POLÍTIC AL TÈCNIC

L'hotel Prestige...

—*Ja ho havia captat, ja.*

... del passeig de Gràcia de Barcelona va tenir una mala inauguració. Feia pocs dies —el 13 de novembre de 2002— que el vaixell del mateix nom havia tingut l'accident, en un mar amb vent de força 8, a unes 28 milles nàutiques de la costa. Catorze dies després va anar al fons del mar a 133 milles —250 km— de la costa de Fisterra, amb tota la catàstrofe ecològic-mediàtic-política que va arrossegar. I encara avui, cada vegada que passo per davant de l'hotel, no puc deixar de pensar en un nom maleït per sempre. Com la paraula *colza*. Com la paraula Seveso, o Bhopal, o Txernòbil. Paraules que han deixat de referir-se a allò que realment són, per convertir-se en símbols de catàstrofe i destrucció. Com Frankenstein, associat al monstre.

—*Frankenstein no era el monstre, sinó el doctor que el va crear. El monstre no tenia nom. Malgrat això, després hi va haver una pel·lícula que aquí es va dir «La novia de Frankenstein», però realment*

era la parella del monstre, no del doctor.

Sí, ja ho sé. Frankenstein és també el nom de diverses petites ciutats alemanyes, i per descomptat hi ha moltíssima gent que se'n diu de cognom. Però és un nom maleït, com Prestige.

Parlem del Prestige. I del galipot.

—*Del què?*

Del *chapatote*, que és com n'hi deia tothom¹. Però sembla que en català s'hauria de dir galipot, que és com un màstic derivat de la resina de pi i que servia per calafatar diverses peces dels vaixells de fusta. I, per analogia, els experts diuen que se n'ha de dir galipot. És derivat del francès.

—*Home, un punt de raó ja tenen. El galipot surt dels pins, i el chapatote del petroli, que a fi de comptes és falgueres i dinosaures juràssics ben trinxats i fermentats... Tot ve de la biosfera. Tot natural.*

Tot natural, efectivament. Tot-hom recorda els «*hilillos de plastilina*». Deixem a part que la plastilina no flueix en forma de filaments². El que sí que hi flueix és el *blandi-*

blub, aquell producte verdós de tacte fred i viscos, que llisca com un llimac humit que et deixés la bava per la mà.

—*Para ja, que sembla que llegeixi un tros de novel·la realista del dinou. Doña Emilia Pardo-Bazán escrivia així, «anguilas de viscosa piel, rebullentes entre la sangre de las lampreas, que eran desolladas...», etc., etc.*

No crec que Doña Emilia escrivís això. Sembla *gore*.

—*Si no deia exactament això, deia coses similars.*

Deixem a Doña Emilia i anem a Don Mariano, que també és gallec, i, ves per on, jo crec que el dia de la

¹ El terme *chapatote* surt per primer cop al diccionari de la Real Academia de la Lengua el 1884, amb el significat de «*brea natural que se encuentra más o menos líquida en las islas de Cuba y Santo Domingo y en otros puntos del globo*». Avui es defineix com a «*asfalto más o menos espeso que se halla en Méjico y las Antillas*».

² Es pot fer un màstic semblant a la plastilina —hi ha qui n'hi diu *pastelina*— barrejant farina (100), sal (50), àcid tartàric (10), aigua (100), oli (20) i colorant, en calent. Cal conservar-ho tapat perquè es va assecant.

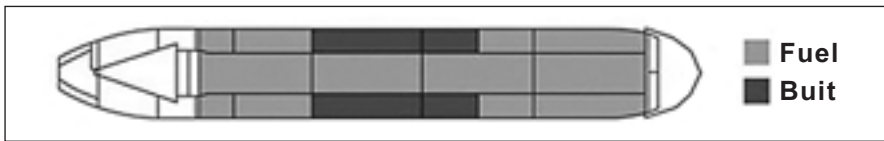


Figura 1. Plànol simplificat del Prestige. Les zones fosques són les no ocupades inicialment pel fuel. Les de la part inferior del dibuix es van inundar i van provocar la inclinació del vaixell. Font: ABS.

plastilina va dir el que ell creia que era la veritat, va dir el que li havien dit els seus experts.

—Doncs sí que eren experts...

No sempre se sap tot, i inclús les coses que creus saber potser no les saps bé i que pots estar equivocat. No devia consultar experts de les refineries, que són els que realment saben com es comporten els productes del petroli. T'explicaré, pas a pas, el que jo crec que va passar i per què es van equivocar. Però no entraré en el tema ecològic, del que no en conec els detalls, ni en les valoracions polítiques del cas, tot i que en tinc la meua opinió. Jo aniré als filaments de plastilina.

El Prestige era un vaixell construït el 1976 al Japó, i registrat a Libèria. El propietari era l'empresa Universe Maritime Ltd., de Grècia, i anava amb bandera de les Bahames.

—No entenc res. D'on era, realment?

Aquesta pregunta, en un vaixell, no té sentit. És com en Pelegrí Pelegrí, que deia a Jaime Bores, presentador de televisió: «¿Qué me está preguntando? ¿De dónde soy o de dónde vengo?»³. La major part de vaixells de càrrega del món tenen aquest galimaties. I no em preguntis què vol dir galimaties. Ve d'un tal Maties, que tenia un gall, i... No t'ho dic, que em desvio. A més, d'on fos el Prestige és igual. Feia 243,5 m de longitud, 34,4 m d'ample i 18,7 m de puntal, que és l'alçada del casc. Un únic casc d'acer al carboni, i la disposició dels

dipòsits era la típica dels petrolers: dipòsits paral·lelepípedics separats per parets d'acer, distribuïts al llarg del buc formant una estructura matriu (figura 1). Els dipòsits feien l'alçada del vaixell: l'equivalent a una casa de sis-set pisos. Podia portar fins a 81589 tones, però aquell dia només en portava 76973, perquè hi havia alguns compartiments laterals buits.

—Què portava el Prestige?

Uns 180 milions d'euros en forma de fuel, o *fuel oil*. El fuel no és un destil·lat directe del petroli, sinó un producte que és la barreja de diferents residus de processos de refinaria, un cop hem tret fins on ha estat possible les fraccions més volàtils i el betum asfàltic⁴. En resum, coses negres, que fan pudor i estan plenes de compostos de sofre. Del fuel de més qualitat n'hi diuen *fuel oil* n° 1 BIA, que vol dir «*de bajo índice de azufre*» perquè en té com a màxim un 1 % en pes. El del Prestige era *fuel oil* n° 6, o *bunker C*, en terminologia dels EUA. Era molt més pesat —més viscos, més sofre, més densitat— que el n° 1. S'ha de mantenir calent, perquè si no la viscositat augmenta molt i queda com un *mazacote*.

—Escolta, què és un *mazacote*?

Un *mazacote* és moltes coses: les cendres de la barrella (*Salsola soda*) quan ha cremat, de les que s'extreia el carbonat de potassi, o una massa enganxosa procedent de la fabricació del sucre, o la barreja d'aigua, pedres i ciment per fer formigó... Una pasterada, en paraula més genuïnament catalana.

—I una pasterada, què és?

Mira el diccionari, que per a això és, no et puc estar explicant cada paraula. Tornem al fuel. Químicament era una barreja d'hidrocarburs saturats (23 %), aromàtics (54 %), resines asfàltiques (12 %) i asfaltens (10,3 %), amb un 2,6 % de sofre. Poc soluble en aigua, i molt poc volàtil: a 350 °C només destil·la un 14 % del total. Era la barreja d'un 14 % d'una fracció C9-C16 aromàtica —un fuel n° 2— i la resta era una altra fracció C17-C40. De la mostra de fuel del Prestige que van analitzar els del Cèdre —entitat del govern francès especialitzada en les catàstrofes marines, i que va fer un seguiment detallat d'aquesta— es va veure que a 3 °C i a la pressió de 400 bar, equivalent a uns 3800 m de profunditat⁵, tenia una densitat de 1012 kg/m³. I més dens que l'aigua dolça. Això ha de sorprendre els que pensen que tots els fluids orgànics⁶ són menys densos que l'aigua.

—I per què flotava, doncs?

Perquè era més dens que l'aigua dolça però menys que l'aigua salada d'allà on es va abocar, que té una densitat d'1,045.

³ Rigorosament cert, com tot el que s'escriu en aquestes lliçons. Devia ser cap el 1995. L'entrevista en versió oral i escrita és a <http://www.deuvosguard.com/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=52>.

⁴ Allò que s'acostuma a dir asfalt s'ha de dir betum asfàltic, en terminologia UE. L'asfalt és la barreja de 5 % de betum i 95 % d'àrids —pedres— que forma la capa de rodadura de les carreteres. Químicament no té res a veure amb el quitrà, que prové del carbó, i havia fet la mateixa funció.

⁵ El Prestige es va partir en dos trossos. La proa es va enfonsar fins a 3820 m de fondària, i la popa a 3545 m.

⁶ Quan un/a metge/ssa o un/a infermer/a parla de fluids orgànics no es refereix pas a fuel oil, sinó a... bé, ja sabeu què vull dir.

Les dades de viscositat són molt més difícils de mesurar, i més discutibles. El fuel calent tenia una viscositat a 50 °C de 0,85 Pa·s. Però, en canvi, fred a 3 °C deien que tenia un valor de 500 Pa·s. I al fons del mar, a 350 bar, no hi ha equips que ho mesurin. Es va haver de determinar el valor a 150 bar i extrapolar mitjançant simulacions matemàtiques a pressions superiors (Martínez Boza et al, 2005). Van determinar una viscositat aparent amb el fluid quiet de 18000 Pa·s, divuit milions de centipoises, i amb el fluid en moviment de 3 milions. Preguntes.

—*Moltes. En quines unitats mesures la viscositat? Que ja no es mesura en poises i centipoises?*

No, en el Sistema Internacional es mesura en pascals-segon, Pa·s, que equivalen a mil centipoises. És a dir, que a 50 °C és una mica fluid, i en canvi a 3 °C és pràcticament sòlid. Per tal que et facis una idea, l'aigua a 20 °C té una viscositat de 0,001 Pa·s.

—*I això que has dit de que la viscositat en moviment és diferent de la viscositat amb el fluid parat. La viscositat depèn de si el fluid es mou o no?*

Doncs hi ha fluids que sí i fluids que no, depèn. L'aigua o l'alcohol no. Però hi ha fluids molt viscosos que *els costa d'arrencar*, però quan s'estan movent ja els és més fàcil d'accelerar-los: amb menys esforç en tenen prou. Les pintures, per exemple. Aquest és un tema molt complex, però que es resumeix dient que el valor de la viscositat en ell mateix dona una mica d'informació, però que és molt important dir com s'ha fet la mesura, si amb el fluid en moviment o amb el fluid parat. I no seguim per aquí, que ens enredaríem. De tota manera, amb els valors tan elevats de viscositat mesurats, el fluid era quasi impossible de que el bombegessin, ni en

el cas de que hi hagués bombes que arribessin allà baix.

El vaixell feia catorze dies que navegava procedent de Sant Petersburg (Rússia) i Venspils (Letònia), i anava a Gibraltar i Singapur. I, no se sap ben bé per què —o, més ben dit, jo no sé ben bé per què— sembla que es va omplir d'aigua de mar algun tanc buit, es va inclinar i va perdre la navegabilitat. Quan anava a la deriva, amb risc de que acabés partint-se pel mig, devien intentar avaluar els riscos pels diversos escenaris possibles, que diuen els militars. I una de les preguntes que devien fer els polítics als tècnics era si el fuel, un cop enfonsat el vaixell, fluiria o no cap a la superfície. Allà baix, a 3500 m de fons, hi ha una temperatura de 2,6 °C. Devien fer algun assaig i van pronosticar que el fuel congelaria i, per tant, que no fluiria. Que, com a màxim, al començament, fluiria una miqueta, els famosos filaments de plastilina. Ho van dir el 28 de novembre, nou dies després de l'accident inicial.

Van errar-la totalment.

PER QUÈ NO ES VA CONGELAR EL FUEL

Què creus que vol dir congelar?

—*Que un líquid passa a sòlid, com quan es forma un glaçó, salat o no*⁷.

Com un glaçó, no. Un glaçó és una substància pura, però el fuel és una barreja, i aquestes barreges no tenen un punt de congelació definit. És com l'oli quan es refreda, que comença a cristal·litzar a una temperatura, però no tota la barreja. O com quan la cera calenta es va refredant, que passa de fluid total a sòlid total de forma contínua. Els dos comportaments són similars, però en l'oli fred se separen cristallets greixosos visibles i en la cera no.

Una barreja de molts components com l'oli, la cera o el fuel tenen tota una gamma de punts de congelació o de fusió, i es van endurint progressivament.

—*I per què deien que es congelaria, doncs?*

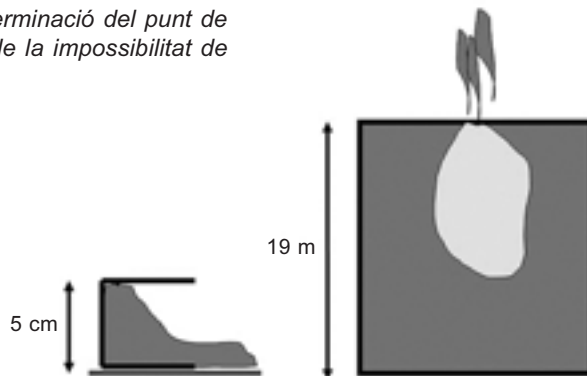
Les substàncies com el fuel, o qualsevol fracció de petroli, es caracteritzen mitjançant assaigs empírics d'utilitat pràctica. Hi ha un assaig que pretén caracteritzar precisament quan és que *congela* una barreja complexa. L'assaig es diu precisament «assaig de punt de congelació». En anglès *pour point*, que vol dir punt d'abocament, i amb aquest nom descriu una mica millor el tipus de mesura. En resum, aquest assaig determina a quina temperatura la substància és prou viscosa com perquè no s'escampi quan es tomba el recipient.

—*Quan fem allioli sabem que està ben travat si la mà de morter es queda ben drete al mig i no cau.*

Exacte! L'assaig és similar. El morter amb l'allioli es pot posar cap per avall i no cau, però en sentit estricte no podem dir que l'allioli està congelat. Doncs la prova del punt de congelació és similar. Hi ha molts dissenys d'aparells que el determinen, tots normalitzats, com els ASTM D97, D5985 o D5950. Tots els assajos es basen en refredar progressivament la mostra —en salts de 3 °C o 1 °C— i anar sotmetent-la a un moviment o agitació o abocament. I quan s'arriba a una certa temperatura la superfície de la mostra no es mou, o costa molt d'agitar, o no es vessa. Llavors es diu que aquella temperatura és el punt de congelació de la substància, o *pour point*. La diferència és que en l'alli-

⁷ Aquí el lector interlocutor fa referència a l'article «Glaçons salats», publicat a NPQ al número 410 de 2002. Se'l deu haver llegit.

Figura 2. Esquema de determinació del punt de congelació, i visualització de la impossibilitat de canviar d'escala.



oli la viscositat va augmentant perquè es va formant una emulsió, i en el cas del fuel la viscositat va augmentant perquè anem baixant la temperatura.

El valor de *pour point* donat pel certificat de qualitat de l'empresa d'inspecció de Letònia era de 6 °C. Les proves que es van fer aquí amb el fuel van determinar que el punt de congelació era de l'ordre de 8-10 °C, valor raonable pel tipus de producte que era. L'aigua del voltant estava a 2,6 °C, i la hipòtesi era que quan el fuel es refredés es congelaria –augmentaria molt la viscositat– i no es vessaria.

—No està mal pensat, sembla.

Sembla bé, però està malament. El motiu de l'error és una mica subtil, i espero que el comprenguis.

—«La duda ofende», que diuen.

No t'enfadis, és una frase feta. Mira, quan un oli o una cera congelen, a mida que es refreda la barreja es va formant progressivament fase sòlida que es barreja amb la fase líquida. La viscositat de la fase líquida es va incrementant perquè es va refredant, i a més, a mida que es va refredant, hi van havent més cristallets de sòlid dispersos pel líquid, que contribueixen també a l'increment de viscositat global de la barreja: la barreja s'estructura per dins, és com si quallés, i es fan més difícils els moviments d'unes molècules respecte de les altres. L'as-

saig de punt de congelació simplement mesura una apreciació de en quin moment es deixa de moure la barreja. Però és un assaig simplement *empíric*, sense cap significació termodinàmica. Això vol dir que les conclusions que es treguin de l'assaig són aplicables a situacions físiques similars, però no poden ser extrapolables a altres casos.

—No sé si ho entenc. O, directament, no ho entenc.

Imagina't que fem un assaig de punt de congelació refredant paulatinament un pot de fuel de 5 cm de diàmetre que anem tombant sobre el costat, fins que veiem que el fuel no flueix (figura 2). En aquest moment, el fluid està sotmès a l'acció de la gravetat, i més concretament, la seva base és a la pressió hidrostàtica deguda al producte de l'alçada del fluid, 0,05 m, per la diferència de densitats entre el fuel i l'aire: 997 i 1 kg/m³, respectivament. Total, 50,55 kg/m². I aquest valor ve contrarestat per la viscositat global del fluid, que en frena el flux. És com si estiguessin en equilibri la gravetat, que vol que el fluid s'escampi, i les forces internes de viscositat i autoadhesió del propi fluid, que frenen el flux. Això deixant al marge les forces d'adhesió a la paret i la tensió superficial del líquid. La temperatura del fuel quan ja no flueix és el valor del punt de congelació, fet segons aquest dispositiu. Si la prova la féssim amb un pot que tingués més diàmetre, la pressió hidrostàtica seria més gran i, a la mateixa

temperatura que abans, el fuel fluiria: les forces intermoleculares que frenen el flux són les mateixes, però la pressió hidrostàtica és més gran. Faria falta una temperatura més baixa per impedir que el fuel fluís.

—M'estàs dient que el punt de congelació depèn del pot que fem servir?

Exactament. Imagina-t'ho amb l'allioli. Un morter d'allioli no s'escampa, però una banyera d'allioli s'escamparia.

—Però no hi ha banyeres d'allioli.

Com que no? Els fabricants de maioneses i alliols comercials, com et penses que els fan? Una fila enorme de gent allà remenant en morters i després omplint els pots amb culleretes?

Aquests assaigs depenen de l'aparell que s'usa, i per això estan normalitzats tan estrictament. De fet, el valor del punt de congelació mesurat d'aquesta manera, com la major part d'assaigs similars, només és un valor orientatiu de com es comporta la substància, però l'extrapolació del comportament a altres condicions és molt delicada.

Imagina't ara el vaixell al fons del mar amb un forat a la coberta. El fuel vol sortir cap amunt per la diferència de densitat entre el fuel i l'aigua (1012 i 1045 kg/m³, respectivament, allà sota), i l'alçada total impulsora és ara tot el gruix de fuel de dins del dipòsit: 19 metres d'alçada (figura 2). La pressió hidrostàtica diferencial ara és de 418 kg/m², vuit vegades més que abans. Per tant, el *pour point* determinat abans amb el sistema de l'abocament no seria extrapolable, perquè el sistema no és mecànicament equivalent. Aquí hi ha més força de cisallament, i faria falta una temperatura més baixa del fuel per evitar que fluís. Ho vas captant?

—Una mica. Amb l'allioli ho entenc més.

Posaré un altre exemple culinari, a veure. Et semblarà que no hi té res a veure, però sí. Imagina't que vols fer un pollastre al forn, i saps que, en el teu forn, un pollastre d'un quilo tarda una hora a fer-se. Quant tardarà a fer-se el teu pollastre de dos quilos?

—No ho sé. Jo crec que més d'una i menys de dues.

Efectivament. Hi ha la llei empírica dels dos terços, que diu que la relació de temps és la relació dels pesos elevat a 2/3. Això voldria dir que tardaria aproximadament un 60 % més que el pollastre d'un quilo, és a dir, una hora i 35 minuts. Un pollastre de dos quilos no té unes mides dobles del d'un quilo, sinó les mides del d'un quilo multiplicades per l'arrel cúbica de dos, aproximadament un 25 % més grans. L'energia calorífica arriba per la superfície, però ha de penetrar cap al volum, i es pot calcular —no és simple— que la llei dels dos terços és una bona aproximació al temps requerit per aconseguir una cocció similar en tots dos pollastres. La geometria tota sola no permet deduir-ho.

Posaré un altre exemple diferent. Ara fa anys, en un riu espanyol hi havia un problema d'espumes, que es posaven molt de manifest en els saltants d'aigua. Van detectar que hi havia detergents a l'aigua degut a un abocament sistemàtic. Es van fer estudis per tal de calcular quina era la quantitat màxima de detergent que havia de tenir l'abocament per evitar el problema. Per provar-ho, van fer una maqueta del riu, per tal de fer proves a escala de laboratori. Així van determinar quina era la màxima concentració de detergent tolerable que no produís espumes a la maqueta. Però es va veure que, malgrat haver reduït la concentració de detergent a l'abocament fins al valor que s'havia determinat de

l'experiment, les espumes seguien produint-se. I és que l'espuma es produeix perquè hi ha una acció mecànica d'agitació de l'aigua degut al salt. I una maqueta geomètricament equivalent no és mecànicament equivalent: a la maqueta l'agitació generada pel petit salt és molt menor que a la realitat, i els resultats de l'experiment no són en absolut extrapolables. Per evitar les espumes, caldria que la concentració de detergent fos molt més baixa al riu, perquè en el riu hi ha molta més agitació que a la maqueta.

—Ara sí que ho entenc. Les maquetes no serveixen sempre.

Efectivament. El canvi d'escala és una necessitat fonamental a la indústria, i hi ha moltes tècniques empíriques i teòriques destinades a aquest objectiu. I en el cas del Prestige no sembla que s'apliquessin raonablement.

Però això no és tot.

PER QUÈ NO HI HAVIA TEMPS QUE ES CONGELÉS EL FUEL

Ja hem vist que, per tal que el fuel no fluís a fora, hauria calgut una temperatura més baixa que la que l'assaig simple del punt de congelació determina. Però, a més, calia que el fuel es refredés a una velocitat raonable. Si no, podria haver passat —i va passar— que, mentre s'anés refredant, la massa de fuel hagués anat sortint, i, quan s'hagués arribat a la temperatura de solidificació, ja fos tot fora.

Jo crec que al començament van estimar molt malament el temps que tardaria en refredar-se el fuel del Prestige. Inicialment estava a uns 50 °C, i el vaixell es va enfonsar fins als 3500 m on l'aigua estava a uns 2,6 °C. Quant temps tarda en refredar-se de manera que el producte pràcticament congeli? El càlcul no

és senzill, però es poden fer estimacions simples aproximades.

Quan fas patates bullides amb pell i tens pressa, per refredar-les les poses sota l'aigua de l'aixeta, i ja es poden agafar amb la mà i les pots anar pelant. Però a dins està calent i bullent, i passa força temps fins que l'interior s'ha refredat prou, perquè la patata només es refreda per conducció de la calor cap a l'exterior. La velocitat de refredament —el que sigui aquesta magnitud, però ja ens entenem— depèn de molts factors. De quins?

—A primera vista, sembla que dependrà de la temperatura de l'aigua, quan més freda més de pressa, i de la mida de la patata: quan més gran més lent. Com allò que has explicat del pollastre.

Molt bé. I de què més?

—De la forma de la patata. Si és esfèrica tarda més que si és allargada, perquè aquesta perd calor més fàcilment per la superfície. En la patata allargada tot el material patata és, en mitjana, més prop de l'aigua.

És una bona manera de dir-ho. I de què més depèn?

—No se m'acut res més.

Doncs de l'agitació de l'aigua. Si l'agitem, i millor si l'anem renovant, es refredarà més ràpidament. Tot això ho va estudiar en Fourier⁸ ara

⁸ Joseph Fourier (Auxerre 1768 - Paris 1830) va donar suport a la Revolució Francesa, que va estar a punt de guillotinar-lo, com a Lavoisier. Va acompanyar a Napoleó a la campanya d'Egipte. A Grenoble, d'on va ser professor, va desenvolupar la teoria de la propagació de la calor als cossos sòlids, que li va reportar un premi el 1811. Per resoldre els seus models matemàtics va inventar les sèries que porten el seu nom i que són la base de l'anàlisi harmònica, aplicada a molts camps de la física i la química.

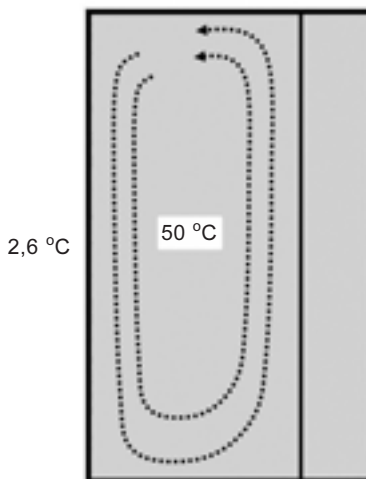


Figura 3. Moviments convectius simplificats en un tanc lateral del Prestige quan es refreda.

fa dos-cents anys, i va arribar a unes equacions complexes que permeten calcular a quin ritme varia la temperatura d'un punt d'un objecte sòlid quan està submergit en un fluid agitat. Són equacions complicades que només són vàlides per a geometries simples, com una esfera, un cilindre o un paral·lelepípede, o combinacions d'aquestes geometries. Doncs ara imagina't que calculem quant temps tardaria a refredar-se per conducció pura una massa paral·lelepípedica de fuel de 85 metres de llarg, 19 metres d'alt i uns 35 d'ample, inicialment a 50 °C, i envoltada d'aigua a 2,6 °C. Es tracta de que tota la massa es refredi fins a una temperatura per sota del punt de congelació (8-10 °C) que havien determinat amb l'assaig, i que ja hem vist que era un valor erroni. Doncs bé, si suposem que l'aigua de fora no és agitada, i que la massa de fuel està quieta, resulta que tardaria moltíssim temps.

—Molts dies?

Molts. Més de dotze anys!

—No pot ser, s'han equivocat.

Això és el que donen els càlculs. Sembla exagerat, i ho és. És que hi ha una hipòtesi molt falsa en tot això.

Hem suposat que el fuel no es mou, és a dir, que el refredament té lloc només per conducció. Però realment a dins dels tancs s'anirien generant moviments convectius. La massa en contacte amb la paret que toca l'aigua es refredarà, augmentarà la seva densitat i anirà fluïnt avall al llarg de la paret, i el fuel calent pujarà pel centre del tanc i anirà substituint el fuel fred. Es genera així un corrent convectiu circular que agita paulatinament la massa global del fuel, i fa que es refredi més de pressa. A més, també es perd calor per la tapa superior i per la base, que generen moviments convectius addicionals que s'enllacen amb els anteriors. Molt complicat. Mira la figura 3. Tot plegat fa que el temps estimat de refredament es redueix fins a uns sis mesos o un any, dependent de l'agitació de l'aigua de fora. També és molt temps, però menys.

—És cert tot això?

No hi ha manera de saber-ho. Les equacions teòriques estan ben establertes i són aplicables a molts camps de la ciència i de la tècnica, des del refredament dels planetes fins al temps de cocció de les hamburgueses, i sempre funcionen. Ara, ningú ha comprovat que en el cas del Prestige fossin certes, no hi havia ningú allà amb termòmetres. Però, si funcionen en la convecció del magma terrestre, per què no haurien de funcionar allà?

L'error important, però, és que en el millor dels casos el fuel seguiria fluïnt durant mesos fins que no s'hagués refredat tot. I amb el cabal de les fuites de fuel que hi havia, s'hauria perdut una quantitat importantíssima d'aquest producte.

—I com és que es van equivocar tant?

Jo crec que van imaginar-se que el fuel de la tapa es congelaria ràpidament i impediria que l'altre fuel més profund, i més calent, seguís

sortint. Devien esperar que es formaria una crosta superior, com en la lava dels volcans. Però no va passar això, ni molt menys. Van seguir sortint els famosos filaments de fuel, que feien perdre al mar unes 125 tones al dia. Ara en parlarem.

ELS MALEÏTS FILAMENTS DE FUEL

La temperatura del fuel que abandonava el Prestige era de 9,8 °C, com va determinar el submarí tripulat *Nautilus* que enviaven allà. No és que el fuel estigués a aquesta temperatura, sinó que aquesta és la temperatura un cop s'havia refredat una mica amb l'aigua circumdant. Des del submarí van retratar també els famosos filaments de fuel que abandonaven el vaixell. Aquests s'estrenyien fins arribar a un valor de gruix aproximadament constant.

Aquest és un fenomen molt interessant. Mira, ves a la cuina i obre l'aigua de la pica amb un cabal força fi. Procura que l'aigua surti ben regular, sense turbulències, ben cilíndrica. Què has vist?

—Doncs dues coses: que l'aigua s'estreny des que surt de l'aixeta, després hi ha un tram que sembla de diàmetre constant, i al final es trenca en gotetes. I he vist també que l'aigua quan pica a la pica, i valgui la redundància, fa com un espai en que no es veu, i uns centímetres més enllà fa com una corona d'aigua. Què és això?

Ui, això darrer és un altre tema. Experimenta amb el fenomen, posahi el dit al mig d'aquesta corona a veure si se t'acut què passa, i un dia en parlarem. Tornem als filaments. Aquest filet d'aigua caient és com el filament de fuel pujant. Físicament és el mateix: un fluid a través d'un altre. En l'aigua, el fluid dens i de poc cabal creua l'aire. En el Prestige un fluid menys dens i de

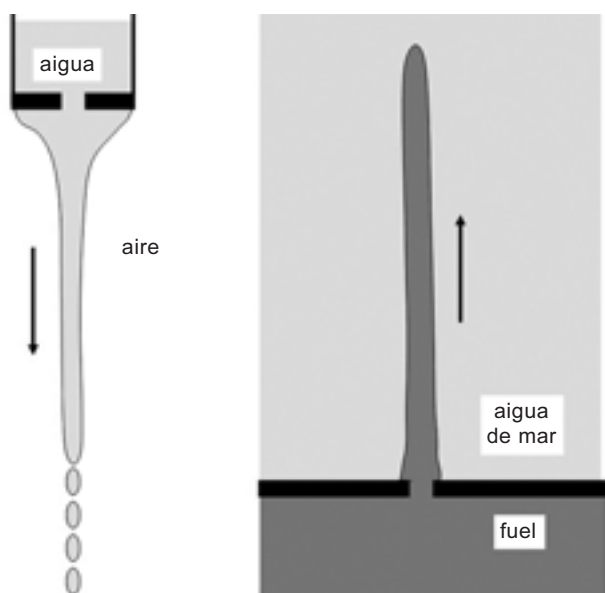


Figura 4. Comparació entre el flux d'aigua en una pica domèstica i els filaments del Prestige.



Figura 5. Filaments del Prestige. Font: Ifremer.

poc cabal —el fuel— creua l'aigua en sentit contrari. Mira les figures 4 i 5. Una mica més complicat, realment, perquè el fuel és més calent que l'aigua de mar, i al mateix temps que creua l'aigua li va cedint calor. Però es pot demostrar matemàticament que pocs centímetres després de sortir del vaixell el filament ja té un diàmetre constant, i no arriba a estar tot ell a la temperatura de l'aigua de mar fins al cap d'uns centenars de metres. I, per altra banda, com que el fuel és tan viscos, puja força lentament, i tarda de l'ordre d'un dia sencer a recórrer els 3800 m de làmina d'aigua i sortir a la superfície. Això si hi surt, perquè si la mar és agitada una part s'emulsiona amb l'aigua de mar formant la *mousse de xocolata* i neda per allà al mig. El filament, quan puja va a uns 5 cm/s, a pas de tortuga.

—*Tortuga terrestre, perquè els quelonis marins naden molt àgilment. A més, si parlem de pas de tortuga ha de ser una tortuga terrestre. Les marines no van a passes, van a braçades. Però només si són parella. Ho captes...?*

No sé si et perdono un acudit tan horrorós. En fi, per frenar els fila-

ments van dissenyar uns sistemes de sacs de pedretes de barita o grànalla metàl·lica, o tapes metàl·liques o campanes d'acer, que es posaven a sobre de les fissures i frenaven el flux de fuel. I així s'hauria quedat, si no haguessin decidit de treure el fuel d'allà baix.

—*I per què el van treure?*

Perquè la corrosió marina anava actuant i al cap d'uns vint anys el casc s'hauria corroït i un dia hauria deixat anar tot el fuel d'allà sota de cop, en el pitjor dels casos. Bé, es podria haver posat tot el vaixell sota un sarcòfag impermeable, però aquesta solució fou finalment desestimada.

L'EVACUACIÓ FINAL

El 13 de febrer de 2003 el Comitè Científic Assessor nomenat pel govern espanyol per fer propostes sobre el Prestige va recomanar que, per treure el fuel romanent, la primera opció aconsellada era el bombeig, i la segona, el confinament del fuel mitjançant un sarcòfag dipositat a sobre del vaixell. Repsol YPF, empresa a la que se li va encarre-

gar de desenvolupar el procediment, va optar per una tercera solució: l'extracció mitjançant llançadores mòbils.

Amb diferents tècniques es va determinar que al vaixell hi quedaven 13900 tones de fuel, moltes menys que les 30000 que inicialment pensaven que hi havia. Repsol YPF va dissenyar un fuel sintètic de propietats similars al fuel del Prestige, per tal de poder experimentar en terra i fer proves dels equips.

Van fer realment una operació tecnològicament molt avançada, que els ha servit per desenvolupar una tecnologia de manipulació a altes profunditats, tecnologia útil en la prospecció i explotació de jaciments marins. Van dissenyar uns dipòsits flexibles —en deien llançadores— que s'havien de posar sobre el vaixell, s'havia de fer un forat controlat a la part superior del casc, i deixar fluir el fuel lliurement cap al dipòsit.

Després d'una prova inicial el 12 d'octubre de 2003 amb una llançadora de material flexible, que va extreure 125 tones de fuel, van optar per llançadores rígides d'alumini, de 350 m³, d'una alçada de 23 m i un



Figura 6. Una llançadora rígida abans del seu ús. Font: Repsol YPF.

diàmetre exterior de 5,4 m (figura 6). Van fer forats de 70 cm de diàmetre al casc, per on sortia un flux que els primers dies permetia omplir una llançadora en 8 hores. La llançadora plena de fuel pujava sola per la menor densitat del fuel. Es van fer 51 viatges a partir del 5 de juny de 2004. Al final de l'operació ja es tardava 3 dies en omplir-se una llançadora. Vegeu-ne una descripció a Hernán et al (2005), disponible a la web de Repsol, amb pel·lícula i tot.

També és molt interessant el procediment de buidatge de les llançadores. Una bomba de disseny especial injectava aigua al fuel i feia una barreja que ja es podia bombear, i ho portava al buc-tanc Odin. L'extracció es va acabar l'11 de setembre de 2004, i van extreure en total 13700 tones de fuel, que van enviar el 3 d'octubre a una refinaria per ser processat i aprofitat. Van injectar al buc submergit una barreja amb nutrients N, P i K –com a les plantes del jardí...– per tal d'afavorir els processos de bioremediació naturals, perquè prèviament havien comprovat la presència d'abundants bacteris degradadors d'hidrocarburs.

Tot aquest procés de buidatge va permetre guanyar a Repsol el Platts

Global Energy Award com a millor projecte mundial en enginyeria de l'energia de 2004.

—*Escolta, el fet de que un any i nou mesos després de l'enfonsament seguís fluint el fuel és una prova dels errors d'estimació fets en calcular el pour point i el temps de refredament, no?*

Sí, però és fàcil parlar un cop sabem com acaba. Tu, resa perquè mai hagis de donar un dictamen amb urgència i en absència de dades fiables...

BIBLIOGRAFIA

Les webs citades eren disponibles en el moment d'escriure aquesta lliçó, el març de 2006.

Girin, Michel (2003). *La marea negra del Prestige*. Ed. Associació Catalana de Comunicació Científica, Barcelona.

Hernán, R.; A. del Corral, C. Berenguer, R. Páez, J. Sparrowe, J. Moro (2005). *The Ultra-Deep Prestige Fuel Recovery Project*. Presentació a la Offshore Technology Conference, Houston, May 2005. Doc. OTC 17534.

Martínez-Boza, F. J., M. J. Martín-Alfonso, P. Partal, C. Gallegos (2005). *Temperature-pressure viscosity model for heavy petroleum fractions*. Comunicació al simposi Vertimar-2005, Universidad de Vigo, 13-18/7/05. <http://otvm.uvigo.es/vertimar2005/>.

<http://csicprestige.iim.csic.es/>. En aquesta web hi ha diversos informes oficials del Consejo Superior de Investigaciones Científicas sobre la catàstrofe del Prestige, i els informes del Comitè Científic Assessor que es va nomenar.

www.ciemat.es/websea/swish_000c.cgi. El CIEMAT és el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas del Ministerio de Educación y Ciencia d'Espanya. Es va encarregar de fer diversos dictàmens tècnics, especialment a través del seu Departamento de combustibles fósiles (2002 i 2003). Molts hi són encara disponibles.

www.eagle.org/NEWS/press/dec2-2002.html. Web de l'empresa inspectora ABS (*American Bureau of Shipping*) sobre la descripció inicial de l'accident.

www.ifremer.fr. Web de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer. Propietaris del Nautille, submarí usat per taponar les fuites de fuel del Prestige.

www.le-cedre.fr. Web del Centre de Documentation de Recherche et d'Experimentation sur les pollutions accidentelles des eaux. Molta documentació de l'accident del Prestige pel que fa a la contaminació generada.

www.repsolypf.com/esp/todosobrerepsolypf/saladeprensa/prestige/prestige.asp?PaginaID=53565&Nivel=3. En aquesta web hi ha un vídeo de 24 minuts sobre la recuperació del fuel amb les llançadores. 