



ARAGÓ DENS

Claudi Mans i Teixidó

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

L'autopista Barcelona - Mataró fou la primera que es va construir —el 1968— a Catalunya i Espanya. A Barcelona, el ministre Federico Silva Muñoz va dir aquelles paraules: «*La tradicional laboriosidad y tenacidad de los catalanes se bastará para conseguir y satisfacer esa justa demanda...*». Traduint: «*Si voleu autopistes, pagueu-vos-les vosaltres*». I aquí tenim les autopistes de peatge, i així fins avui. Al seu pas per Badalona l'autopista va dividir la població en dues parts, que no es comunicaven més que per alguns passos per sota, i, després, per un pont elevat per a vianants. Als veïns del barri de la Salut els obligaven a donar una gran volta per la carretera de l'escorxador, i amb manifestacions i altres protestes van reivindicar una comunicació més curta. Al final els la van fer, en forma d'un túnel estret de forma cilíndrica. Immediatament va sortir l'acudit polític: «*A los vecinos que no queremos pasar por el tubo nos obligan a ir al matadero*».

Els tubs, conduccions o canones! El doctor Granados¹, el meu professor de Química Orgànica, també parlava de *tubos*, per menysprear-los. Als estudiants que havíem triat l'especialitat de Química Tècnica sempre ens deia: «*Lo importante no son los tubos, sino lo*

que pasa por dentro de los tubos». Estic segur que el Dr. Granados no devia saber que el que acaba havent-hi dins dels tubs depèn en certa manera de com circula per dins dels tubs, perquè en moltes reaccions químiques el grau de conversió depèn de l'agitació.

En aquest article parlarem de passar pel tub i de què passa quan es passa pel tub.

FLUIDS FLUIDS

Mira la foto de la figura 1. No hi veus un problema?

—*No, quin problema hi veus? Sí, el carrer d'Aragó va dens, però i què. Moltes vegades hi va.*

El problema és que per dir que un carrer va buit, diuen que va *fluid*, i per dir que va ple diuen que va *dens*. Analitza el sentit original d'aquestes paraules. És que no pot haver-hi un fluid dens?

—*Tens raó. El mercuri és un fluid dens.*

Molt bé. Hi ha fluids densos i fluids poc densos, de la mateixa manera que sòlids densos i sòlids poc densos.

—*El que passa és que m'estàs enredant. La paraula «fluid» pot ser usada com un nom i com un adjectiu. Quan tu preguntes si hi ha algun fluid dens, l'uses com a nom, però quan diuen que el carrer d'Aragó va fluid ho fan servir com a adjectiu.*

També tens raó. Un fluid és una manera abreujada de dir «un cos fluid», és a dir, que pot fluir. En sentit estricte, un fluid és una substància que sota l'acció d'una certa força circularà. Hi ha fluids que amb molt poca força en tenen prou per circular, per exemple els gasos i els líquids de poca viscositat. En canvi d'altres necessiten grans forces per ser moguts, com les salses, els xiclets, el betum asfàltic... Podríem dir que són fluids poc fluids.

—*Fluids poc fluids. És com dir «grans poc grans», he he he...*

No, no és el mateix encara que ho sembli. Una cosa és un gra, i l'al-

¹ Ricardo Granados Jarque (Barcelona 1917 - 2006). Deixeble del Dr. José Pascual Vila, fou catedràtic de Química Orgànica a Valladolid (1946 - 1956) i Granada (1956 - 1967) abans de venir a la Universitat de Barcelona, a la facultat de Química, de la que fou degà entre 1974 i 1976, i després passà a la de Farmàcia. Es jubilà el 1987.



Figura 1. Carrers densos i fluids.

tra l'adjectiu gran, malgrat que els plurals respectius siguin iguals: però poden haver-hi grans grans i grans petits. En canvi, el concepte de fluïdesa té com a contrari el de solidesa: poden haver-hi fluids fluids i fluids poc fluids, però no poden haver-hi fluids sòlids. Almenys en llenguatge habitual.

—*I en llenguatge no habitual sí?*

Bona pregunta. Gairebé sempre que s'aprofundeix en un tema es compliquen les coses, hom es fa un garbuix i coses que semblaven impossibles passen a ser possibles, i coses que semblaven trivials es converteixen en complicades. Aquí s'entrecreuen dues maneres de descriure la matèria: la que mira especialment el tipus de comportament macroscòpic, i la que es fixa en l'estructura atòmicomolecular. Un sòlid en sentit macroscòpic és un material que manté la forma sota l'acció de la gravetat. Però pot ser perfectament que sigui una substància sense ordre intern, amorfa, com un líquid d'alta viscositat. Això seria un exemple de matèria condensada no ordenada, típica dels líquids, fluids sense gaire ordre estructural. La plastilina, el betum asfàltic fred, o un vidre, els podem descriure com a fluids sòlids.

Però tornem on érem. Un líquid o un gas poden ser molt o poc fluids, però això no té res a veure amb la seva densitat. Una substància pot ser poc densa i poc fluida, com l'oli d'oliva (0,918 kg/L a 15 °C i una viscositat a 20 °C de 84 mPa·s). O pot ser molt densa i alhora força

fluida, com el mercuri: 13,54 i 1,526 a 25 °C, respectivament. L'acetona és poc densa i molt fluida (0,306 i 0,785). I, finalment, hi ha líquids densos i poc fluids, com el vidre o un metall prop del seu punt de fusió.

—*Que no es mesurava en centipoises, la viscositat?*

Sí, es pot mesurar en centipoises (cP), però actualment la unitat del Sistema Internacional de viscositat és el pascal-segon, Pa·s. El seu submúltiple, mPa·s, equival a un cP.

Els cartells de trànsit de la figura 1 cometen l'error de fer pensar que dens i fluid són característiques contraposades, quan no ho són. I és que els de trànsit sempre s'han caracteritzat per fer servir paraules impròpies per referir-se a la circulació.

—*Ja hi som. Ja te'ls has carregat...*

I amb raó. Segueix llegint.

EL VOLUM DE TRÀNSIT

Si escoltes la informació del trànsit que donen les emissores de ràdio a primera hora del matí, o quan hi ha una operació sortida o una operació retorn, sempre parlen del *volum* de trànsit en una carretera, de la *densitat* de circulació, de la *fluïdesa* del trànsit. Tot termes erronis.

—*Et preocupa molt això? Perquè usin termes impropis deixaràs d'anar pel carrer d'Aragó?*

No, no és això. És que em molesta que es facin servir termes impropis havent-n'hi de correctes. Com quan els locutors esportius parlen de la *línia medul·lar* i volen dir la línia mitja. O quan els polítics o els periodistes parlen del *mínim comú denominador*, expressió que no vol dir res.

—*El mínim comú denominador sí que s'estudiava. És el valor mínim que és comú a diverses fraccions. Per extensió, s'aplica a allò que com a mínim tenen en comú diferents persones o grups socials. Per exemple, «el mínim comú denominador dels partits catalans és el seu respecte al sistema democràtic».*

Doncs t'equivoques. Barreges les coses, i això passa perquè l'adjectiu *comú* és comú a dues expressions diferents. A l'aritmètica que devies estudiar hi havia —i hi ha— el màxim comú divisor *mcd*, el mínim comú múltiple *mcm* i, a part, el denominador comú de dues fraccions. De dos números com el 4 i el 6, el seu màxim comú divisor és 2, i el seu mínim comú múltiple és 12. Un concepte que conté el terme *màxim* —el *mcd*— i que és més petit que un concepte que conté el terme *mínim* —el *mcm*— és a primera vista paradoxal, però és així. Quan polítics i locutors parlen del *mínim comú denominador* realment al que es refereixen és a la *intersecció* de dos o més conjunts. Però no ho corregirem des d'aquí, perquè aquestes lliçons no les llegeixen ni aquests polítics ni aquests locutors.

Per on anava?

—*Deies que et molestava una cosa que ja has dit.*

Gràcies. Sí, em molestava el que he dit. I a més, m'interessa aquest tema perquè això del trànsit permet una analogia clàssica amb tot el tema de circulació de fluids, en diferents aspectes, i crec que val la pena explotar-la una mica. Som-hi.

LA CIRCULACIÓ PELS CARRERS I LES CANONADES

—A Saragossa hi ha una zona de carrers que n'hi diuen el Tubo. I no hi circulen vehicles sinó vianants. També hi circulen molts fluids, cerquesa i d'altres...

Efectivament. Hi feien uns entrepans de calamars molt bons. Per allà a prop hi havia el Plata²...

—No et tornis nostàlgic, ara.

Ni parlar-ne. I menys per recordar activitats tan absurdes com tot allò que jo feia quan era per allà.

Tornem a les molècules. Un carrer ample d'un sol sentit de circulació és una bona analogia d'una conducció per on hi circulen fluids, per exemple el carrer d'Aragó, de Barcelona. L'analogia té diferents limitacions, naturalment. La principal diferència entre els carrers i els tubs és que la mida d'un vehicle comparada amb l'amplada del carrer és molt superior a la dimensió relativa de les molècules que passen per una canonada. La circulació dels vehicles s'assembla més aviat a la circulació de la sang per dins dels capil·lars, on un hematies té quasi el mateix diàmetre que el capil·lar. Però, bé, prescindim d'aquest aspecte, per ara.

La segona diferència entre circulació de fluids i circulació de vehicles és que els conductors tenen un projecte d'itinerari, mentre que les molècules no.

—Hi ha conductors que no sembla que sàpiguen on van, canvien de carril, tomben sense avisar...

La tercera diferència és que els vehicles tenen motor propi, i les molècules no. És a dir, l'energia cinètica se la fan els vehicles ells mateixos a costa del carburant del vehicle. En canvi els fluids avancen

per les canonades perquè se'ls ha comunicat energia al començament, mitjançant una bomba o un compressor, o perquè tenen energia potencial acumulada i van caient per la canonada, com en el cas d'aigua que impulsarà una turbina. En tot cas, les molècules van topant les unes amb les altres, de forma més o menys aleatòria.

La quarta diferència és geomètrica; les vies de circulació tenen només dues dimensions: ample i llarg; en canvi les canonades de circulació de fluids tenen tres dimensions.

—Hi ha una altra diferència. Als carrers d'una ciutat hi entren i en surten vehicles per tot arreu, i en canvi en una conducció o canonada només entra fluid pel començament i en surt pel final.

Aquesta és una diferència important. Però, bé, la comparació la farem només en trams de carrer entre encreuaments, i així hi haurà una única entrada i una única sortida. També podríem imaginar un tram d'autopista, però allà hi ha una diferència important, com després t'explicaré.

—Encara una altra diferència és que als carrers hi ha a vegades vehicles mal aparcats...

Doncs mira, a les conduccions hi ha una cosa similar: l'embrutiment de les conduccions, el *fouling* que n'hi diuen, degut a incrustacions. Això fa que el diàmetre real de la conducció es faci més petit.

—No serà tant...

A vegades sí. Jo he vist al Museu da Água de Lisboa la secció d'una conducció d'aigua, en la que el diàmetre inicial de més de 50 cm havia quedat reduït a menys de 15. Tot era calç. Impressionant. I en certs forns el sutge adherit també redueix el diàmetre efectiu de la con-



Figura 2. Secció d'un doble tub obstruït.

ducció, reduint no només el cabal de pas sinó la transmissió de la calor. Mira la figura 2, on es veu la secció d'un bescanviador de doble tub, d'uns 15 cm de diàmetre exterior. La quantitat de carbó dipositat amb el temps a l'espai anular entre els tubs va ser tan considerable que es va obstruir totalment i el tub interior es va descentrar.

—Espectacular!

Quan els vehicles circulen pels carrers, els del centre solen anar més ràpidament que els dels laterals. Pel centre hi solen anar els vehicles que han de fer llargs trajectes, però a més hi ha el fet psicològic de que el vehicle que va per un dels carrils del costat de la vorera va amb una velocitat relativa elevada, perquè al costat té la vorera, amb arbres, fanals quietes, i gent caminant, i això frena una mica.

—Al carrer d'Aragó no hi ha arbres.

Al carrer d'Aragó hi ha arbres. No a tot el carrer, però sí que n'hi ha a diversos trams. Però estigues al cas

² El Plata era un bar tronat amb un petit escenari, on hi havia actuacions de vedettes de tercera regional, que de tot el que tenien n'ensenyaven el que podien. El més interessant era mirar el públic i els tres músics.

del que et dic. Un vehicle que circula per la via de la vorera a 40 km/h, va 40 km/h més de pressa que el seu entorn de la vorera, que està parat. En canvi un que va pel centre, posem que va a 50 per fer que no se salti l'ordenança, només va 10 km/h més ràpid que els dels seus costats. Això passa també amb els fluids. Les molècules que circulen just per les parets de la conducció hi freguen i hi rasquen, i el resultat és que es frenen, i algunes molècules fins i tot estan adherides sense moure's de la paret. Les molècules que circulen més prop del centre, topen i rasquen amb les molècules que van pels seus costats, i l'efecte de bescanvi d'energia és menor. I les de la zona central van totes més o menys a la mateixa velocitat, amb poques interaccions entre elles: com més properes siguin les velocitats, menys interacció hi ha.

Per això a las conduccions es genera tota una gamma de velocitats, un *perfil de velocitats*, com es diu tècnicament, que és més ràpid pel centre i més lent a les parets. Hi ha dos grans modes de circulació. Quan el cabal és baix, les molècules van ben ordenades, una darrera l'altra, cadascuna per la seva via, i només algunes molècules canvien de carril. El resultat és un perfil de velocitats parabòlic, les més ràpides pel centre, les més lentes a les parets, i velocitats intermèdies per a les altres. En canvi, quan el cabal és més elevat, les de les parets segueixen anant més lentes, però les del centre es barregen, hi ha molts *canvis de carril*, i el resultat és més homogeneïtzació: el perfil de velocitats es fa més pla. El resultat és que quasi totes les molècules de la conducció van de mitjana a la mateixa velocitat.

D'aquestes dues formes de circulació se n'hi diuen règim *laminar* i règim *turbulent*, respectivament. Un fluid que circuli amb un cabal baix per una conducció de gran diàmetre ho fa probablement en rè-

gim laminar, mentre que el mateix fluid, si el diàmetre és més petit i el cabal més elevat, ho farà en règim turbulent.

Hi ha una expressió matemàtica que...

—*Ja hi som. No escriguis equacions.*

Una de sola. Dic que hi ha una expressió matemàtica que permet saber si un cert fluid circula en règim laminar o turbulent. L'expressió es denomina *nombre de Reynolds*, i és així:

$$\text{Reynolds} = \frac{\text{densitat} * \text{velocitat} * \text{diàmetre}}{\text{viscositat}}$$

—*Aquest Reynolds era el dels bolígrafs? O el del paper d'alumini de cuina?*

No. Tampoc era el pintor³. Osborne Reynolds (Belfast, Irlanda del Nord 1842 - Watchet, Anglaterra 1912) fou un enginyer i físic irlandès que s'inventà el seu nombre el 1883. Doncs resulta que quan un fluid circula amb un Reynolds inferior a 2100 va en règim laminar, i quan va a més de 10000, en règim turbulent. Entremig, depèn. Això ho va veure injectant una mica de fluid acolorit al centre d'una conducció i mirant com es dispersava.

—*2100 o 10000 què? Sempre queixant-te de que la gent no posa les unitats de les coses, i ara no les hi poses tu.*

2100 o 10000 res. El nombre de Reynolds no té unitats, és un valor *adimensional*. Sí, no t'estranyis, hi ha magnituds així. La major part de taxes, *ratios* o índexs que s'usen habitualment són *adimensionals*, però com que es donen en percentatges no ho semblen. Quan et diuen que la rendibilitat de determinada inversió és del 3 % vol dir que et donen tres euros per cada cent invertits, però aquesta

magnitud no té dimensions: no són euros.

—*Són euros que et donen per cada euro.*

Exacte, euro/euro, és a dir, sense dimensions. En el cas del nombre de Reynolds es compara la inèrcia del fluid (proporcional a la velocitat i a la densitat) i les forces que el frenen, és a dir, la viscositat. Una mica abstracte, però és així. Mira, les unitats de la densitat són kg/m³; les de la velocitat, m/s; el diàmetre són m; i les de la viscositat són —una mica estranyes— kg/(m·s). Si fas les operacions es cancel·len totes i no queda res. Adimensional. Hi ha molts altres números *adimensionals* que mesuren i comparen fenòmens. El nombre de Froude, el de Sherwood, el de Schmidt, el de Bond⁴...

—*El nombre de Bond deu ser 007...*

Gran acudit. Ja semblés jo...

—*I per què has dit abans que una autopista no era un bon exemple per fer l'analogia?*

Simplement perquè l'autopista, des del punt de vista de la circulació, no és simètrica. Els vehicles més ràpids van per l'esquerra, i els

³ A *Burlington House*, un conjunt d'edificis victorians de Piccadilly Street, al cor de Londres, hi ha la seu de la *Royal Society of Chemistry*. La primera vegada que hi vaig ser vaig veure al centre del pati una estàtua dedicada a Reynolds. Vaig estar-ne molt satisfet pensant que a la Gran Bretanya sí que honoren els científics vinculats a la tecnologia. Però la decepció va venir quan vaig veure que l'honorat era el pintor Sir Joshua Reynolds (1723 - 1792). I és que a la *Burlington House* hi ha també la *Royal Academy*.

⁴ El nombre de Bond (Bo) és la mesura de la relació entre les forces de tensió superficial i les forces gravitacionals d'un sistema. També es pot dir nombre d'Eötvös.

més lents per la dreta. No s'hi genera aquell perfil simètric. En certa manera és com la meitat inferior d'un dels perfils de velocitat de la figura 3.

—Tot això que dius ja no és tan cert. Ara hi ha molta gent que va pel centre de l'autopista i d'allà no es mouen. Quina ràbia que fan... I amb tot això encara no has dit com s'hauria de dir, segons tu, que una via de circulació està molt plena.

Jo t'ho diré, és fàcil. Un primer aspecte és referir-nos a quants vehicles hi ha en un moment donat a un carrer, al marge de si es mouen o no. És a dir, quin nombre de *partícules* hi ha sobre la superfície de la via. Imagina't una via de mil metres, i un sol carril de circulació, plena de vehicles de 4 m de llarg tocant-se. Hi haurà en total 250 vehicles, d'acord? Si el carril fa tres metres d'amplada, la superfície total de la via seria de 3000 m². Per tant hi ha 0,083 vehicles per metre quadrat. Aquesta unitat, vehicles/m², és una concentració superficial. És, en certa manera, l'equivalent a la concentració d'un fluid. Un fluid molt concentrat és aquell que en un metre cúbic de barreja hi ha molta massa de solut. Doncs aquesta concentració superficial indica una magnitud similar: en un quilòmetre quadrat de via hi ha molt de vehicle.

—D'acord, ja veurem on ens porta, tot això.

Però la magnitud anterior no ens diu res de si van de pressa o estan parats. Per exemple, en una autopista on hi ha una distància de cinquanta metres entre cotxes, la concentració superficial és només de 0,0067 vehicles/m². Però, que la concentració superficial sigui molt baixa, no vol dir que no hi passin molts cotxes: poden anar molt de pressa, i passar-ne molts, però separats. Això requereix una mesura de temps, és a dir, veure quants vehicles entren o surten per unitat

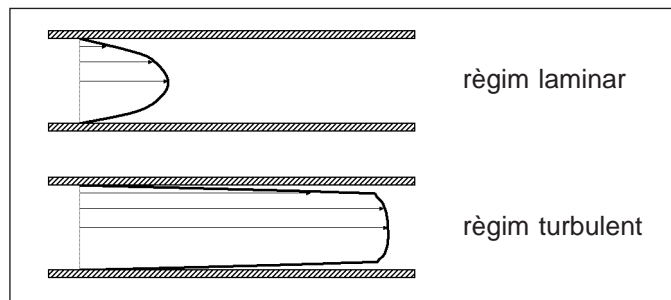


Figura 3. Perfils de velocitat. El règim laminar segueix una distribució parabòlica, i el règim turbulent una distribució de velocitats més ràpida però més plana.

de temps. Imagina que aquell conjunt de vehicles que omplien la carretera estan circulant tots enganxats, a 20 m/s, o 72 km/h. Per un punt donat, doncs, estarien passant 5 vehicles per segon. Però quan els vehicles estan circulant a aquesta velocitat no es toquen, sinó que estan separats, posem per uns 15 metres. El nombre de vehicles que realment passarà serà de, només, un vehicle per segon. Aquesta unitat es denomina *cabal*, i és com n'hi haurien de dir els homes i les dones del trànsit. «Per la Ronda de Dalt està circulant en aquest moment un *cabal* d'un vehicle per segon per carril».

En el cas dels fluids, es parla del *cabal* màssic o del *cabal* volumètric: els kilograms o metres cúbics que circulen per segon per un tub. Però en molts casos interessa saber el *cabal* que circula relacionat amb la secció transversal del tub, és a dir, els kilograms per segon i metre quadrat de secció. D'aquesta magnitud se'n diu la *densitat de flux* —o d'altres maneres—, i és l'anàleg del nombre de vehicles que circulen per carril i per segon.

—O sigui, que dir que la circulació és densa no estaria tan malament...

Per una vegada t'ho haig d'acceptar... sempre que es referissin a la densitat de flux...

Tinc una recança: m'agradaria posar totes aquestes magnituds en

el Sistema Internacional d'unitats. Deixa-m'ho intentar.

—Tu ves fent, i quan ho tinguis acabat en fas un altre article, que ja estic cansat de llegir...

Espera't, espera't. Em surt que com que un nombre de partícules —o de vehicles— es mesura en mols, estem mesurant una *concentració molar superficial*: els 0,083 vehicles/m² equivalen a $1,38 \cdot 10^{-29}$ mol/m². És a dir, 0,(28 zeros)138 mol/m², o, el que és el mateix, 13,8 attomol/Mm², que potser està més clar.

—Claríssim. Que et penses que t'ha seguit algú, amb aquesta elucubració? El que hauries de fer és calcular-ho en goms.

En goms?

—Sempre diuen que una cosa està plena de gom a gom. Doncs bé, quina concentració és aquesta de gom a gom? Va, investiga...

Doncs no ho sé. Algú sap què és un gom?

—Jo no. I els diccionaris no ho diuen. I, escolta, al començament has dit que el que acaba havent-hi dins dels tubs depèn en certa manera de com passa per dins dels tubs. Per què ho deies?

Ui, això és molt complicat. T'ho diré en poques paraules. La major part de reaccions entre les substàn-

cies són més ràpides i tenen lloc més fàcilment si estan ben barrejades. Si en una conducció la barreja avança en règim laminar, el grau de barreja és molt menor que si avança en règim turbulent. El disseny dels tubs de l'interior dels reactors químics, doncs, pot afectar la composició de la barreja final. Això un químic no ho sol tenir present, per-

què al laboratori es pot agitar tot a voluntat. Però a escala industrial les coses es compliquen, i el disseny de les conduccions i dels aparells determina la forma com estan en contacte les substàncies que reaccionen i els productes, i, per tant, en determina el rendiment de les reaccions. El químic ha de treballar de costat amb l'enginyer químic.

—O sigui, que per a tu allò important són els tubs?

No dic tant. El que dic és que allò important és saber que el que passa per dins dels tubs està influït també per com són els tubs.

—Deu ser allò que l'hàbit no fa el monjo, però ajuda a ser-ne... 🌀