

Les emprentes de corrent: de l'espeleologia a la hidrodinàmica

per Ramon Gabriel i Rodrigo

En el número 29 de (ciència) una breu nota us assabentava de la mort del nostre company i membre del consell de redacció Ramon Gabriel i Rodrigo. Uns dies abans havia llegit la seva tesi de llicenciatura al departament de química tècnica de la Facultat de Química de la Universitat de Barcelona. El seu treball versà sobre les emprentes de corrent, un tema que l'apassionava i al qual dedicava tot l'esforç i totes

les hores de què era capaç. Us oferim en aquest article un resum de les línies mestres del seu treball, esporgades de l'aridesa matemàtica i dels detalls experimentals. D'aquesta manera volem retre un sincer homenatge a una persona que havia consagrat la vida a la resolució d'un problema científic. El resum ha estat fet per S. Cervera i C. Mans, del citat departament.

Cada persona té un conjunt de coneixements que, en un moment determinat, aplica a les observacions que fa del seu entorn. Tothom sap, per exemple, que quan un líquid circula per sobre d'un sòlid, hi ha un fregament capaç d'erosionar aquest sòlid. Tots fem aquesta interpretació en observar les arrodonides formes de les pedres del llit dels rius. Però, probablement quedaríem perplexos si observéssim que a les coves, en determinades galeries per on se

sap segur que ha passat aigua, les parets són plenes d'unes ondulacions, unes crestes i valls. ¿Com és possible això, si la circulació de l'aigua sembla que hauria d'haver llimat i arrodonit les parets? Aquesta contradicció —aparent— entre aquestes dues observacions ha de tenir una explicació científica.

El coneixement científic progressa, com és ben sabut, a partir de l'anàlisi de dades ja existents, la formulació d'hipòtesis, l'experimentació ("fer

un experiment és fer una pregunta a la naturalesa") i la corroboració o rebuig de les hipòtesis formulades. Apliquem, doncs, aquesta metodologia a l'estudi d'aquests fenòmens, i mirem de teure'n conclusions.

1 - Les emprentes de corrent. El que en sabem

El primer registre documental d'aquest fenomen sembla ser el de J. de Malbos, el 1839, quan parla de les "petites ondulacions" que recobreixen les parets de les coves. Trutat, el 1885, les menciona també. Les *emprentes de corrent* són, morfològicament, de dos tipus: els *scallops* o closques de petxina, que són depressions poligonals, asimètriques i coalescents, i els *flutes* o plecs, que són solcs perpendiculars a la direcció d'avanç de la galeria, amb les crestes paral·leles. Tenen també altres denominacions en la bibliografia espeleològica, però les que aquí s'usen són les més habituals avui dia.

L'origen d'aquestes emprentes s'ha intentat explicar de moltes maneres. Trutat suposà que les emprentes de corrent de la cova de Lombrives (Ariège) eren degudes als "cops de gúbia del gel en moviment", és a dir, l'erosió per gel. Però Martel el 1908 considera que les emprentes són degudes a la dissolució química. Aquesta polèmica erosió-dissolució ha continuat fins avui, i cal afegir-hi encara altres tipus d'interpretació, com tot seguit es veurà.

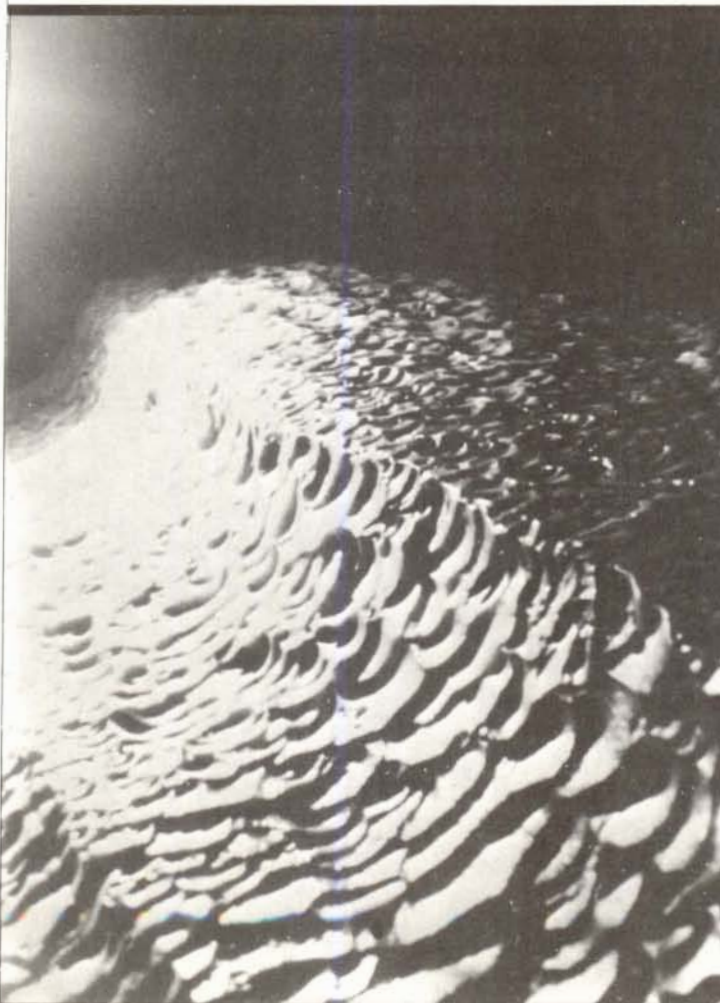


Figura 1
Flutes en la cova de la Mosquera. (Benda, Garrotxa)

Bock (Graz, Àustria), el 1913, estudià quantitativament les empremtes, relacionant-ne la longitud amb la velocitat del corrent d'aigua que les havia format. Rudnicki (1960) creà en el laboratori empremtes de corrent fent circular aigua sobre una placa de guix. Com més ràpid era el flux d'aigua, més empremtes obtenia per unitat de superfície. Però arribà a resultats absurds: per explicar les grans dimensions de les empremtes d'algunes coves caldria suposar velocitats d'aigua negatives... El nivell de la seva explicació no era prou profund.

Curl (1966) situà el problema a l'òptica dels principis bàsics de la mecànica de fluids i dels fenòmens de transport. El tema adquiriria, doncs, caràcter interdisciplinari i passava, dels àmbits purament geològics, a ser estudiat en un laboratori de química tècnica (Blumberg, a la Universitat de Michigan).

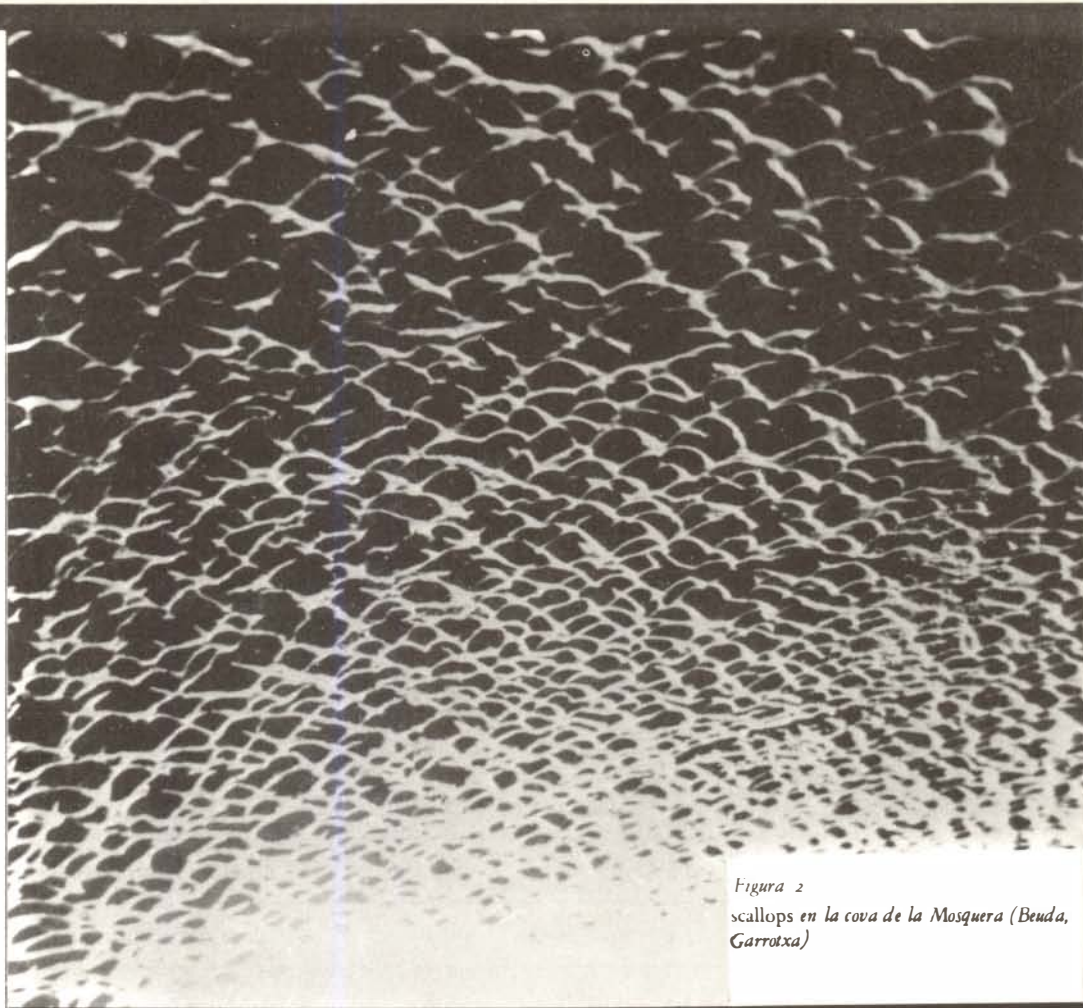


Figura 2
scallops en la cova de la Mosquera (Beuda, Garrotxa)

2- Interpretació a la llum dels fenòmens de transport

Imaginem un flux turbulent de líquid que circula per una canal que té una paret lleugerament soluble, i inicialment llisa. Una petita irregularitat que hi hagi a la superfície farà que el flux se separi de la paret, i hi incideixi un altre cop, però una mica més lluny, a dins de la concavitat o una mica més enllà. Això farà que la velocitat de transferència de matèria —la velocitat a la qual la paret es dissol— sigui alta en la zona en què el flux ataca la paret, i baixa en la regió de separació i de recirculació. Tendeix a formar-se una concavitat d'una dimensió característica. Aquesta concavitat

“modela” el flux del líquid, i fa que, una mica més lluny, es generi una altra empremta, de les mateixes característiques. La superfície, al final, acaba plena de crestes i depressions de perfil característic: són els *scallops* i *flutes*. Al cap del temps s'arriba a una situació en la qual —si el cabal del líquid no ha canviat— la forma i la magnitud de les empremtes no canvien, tot i que la paret es va dissolent.

La interacció fluid-paret és, doncs, una interacció entre les condicions fluidodinàmiques i la transferència de matèria. La paret és, inicialment, una condició límit del flux del líquid. Llavors, la transferència de matèria fa que la superfície canviï la seva forma, i això implica unes condicions límits del flux del líquid diferents; per tant, una modificació de la forma de fluir i una modificació en la forma d'atacar la su-

perfície. Al final, s'arriba a un estat de pseudo-equilibri, que és un estat particular de la interacció fluidodinàmica-dissolució: la superfície de les empremtes defineix quina distribució de la transferència de matèria és consistent amb aquesta forma de superfície.

El pas següent és abordar el problema en termes quantitativus. En línies generals, podem suposar que una dimensió característica de les em-

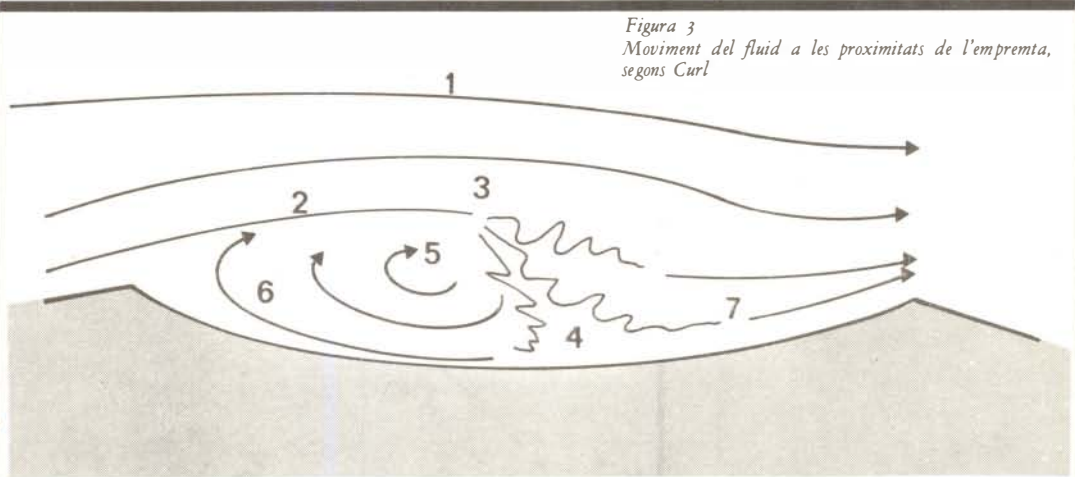
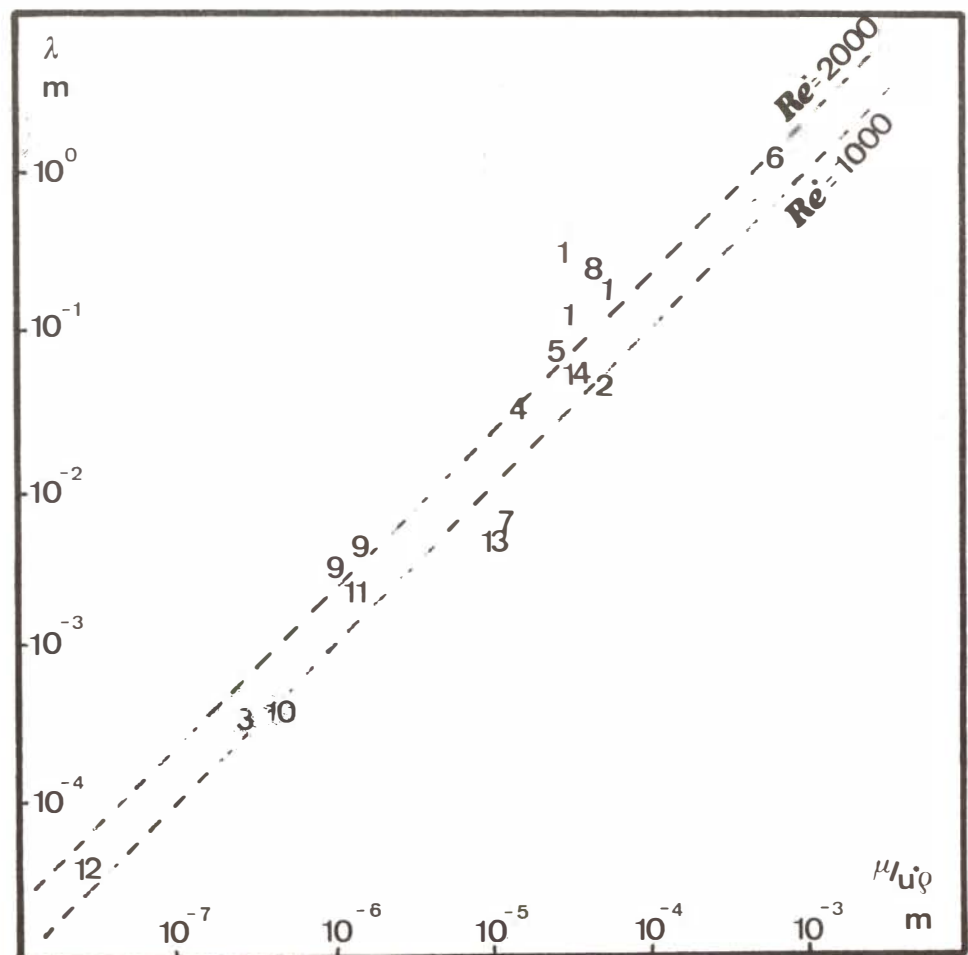


Figura 3
Moviment del fluid a les proximitats de l'empremta, segons Curl

- | | |
|---|---|
| 1- flux principal, turbulent | 5- flux recirculat |
| 2- el corrent es divideix a la cresta de l'empremta | 6- capa límit al pendent protegit del corrent |
| 3- es generen turbulències en el corrent laminar | 7- capa límit al pendent exposat al corrent |
| 4- la turbulència ataca la paret | |

| | FLUID | PARET | LLOC | REFERÈNCIA |
|----|---------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1 | aigua freda | granular | canal laboratori | Guy (1966) |
| 2 | aigua freda | granular | canal laboratori | Thomas (1979) |
| 3 | aigua calenta | magnetita | tubs caldera | Heimsch (1978) |
| 4 | aigua freda | guix | canal laboratori | Blumberg (1974) |
| 5 | aigua freda | calcari | naturalesa | Curl (1966) |
| 6 | aire | gel | naturalesa | Curl (1966) |
| 7 | aigua freda | partícules col·loïdals | dipòsits a cano- nades d'aigua | Wiederhold (1949) |
| 8 | aigua freda | gel | rius muntanya | Ashton (1972) |
| 9 | aigua tèbia | betum | canal laboratori | Brauer (1973) |
| 10 | aigua freda | coure | erosió tubs | Knutson (1972) |
| 11 | aigua freda | llautó | erosió tubs | Sick (1972) |
| 12 | aigua freda | alumini | erosió plaques lab. | Burton (1966) |
| 13 | aigua freda | guix | placa lab. ondulada | Gessner (1960) |
| 14 | aigua freda | guix | canal laboratori | Gabriel (1983) |



Relació general entre la dimensió d'empremta i les característiques del flux.

Fig. 5

Empremtes de corrent en una galera



premes —per exemple, la seva longitud mitjana, λ — dependrà de quines siguin les propietats del fluid que circula —i especialment la seva densitat ρ i viscositat μ —, i també dependrà de la velocitat amb què fregui el fluid sobre la superfície, u^* . La difusivitat del sòlid en el fluid, D , pot tenir també importància. El problema és complex, i de moment no podem escriure'n el model matemàtic resoluble, a partir de les equacions teòriques. En aquestes situacions és convenient d'aplicar les tècniques de l'anàlisi dimensional. Aquest procediment, en essència, agrupa les variables en termes sense dimensions, simplificant el problema: en lloc de cercar relacions entre variables, n'hi ha prou de trobar relacions entre grups de variables, de nombre molt més reduït.

Per al cas que ens ocupa, l'anàlisi dimensional ens porta a escriure una expressió del tipus següent:

$$\frac{\lambda \cdot u \cdot \rho}{\mu} = k_1 \left(\frac{\mu}{\rho D} \right) k_2$$

on k_1 i k_2 són constants que s'han de determinar experimentalment.

Per a un sistema constituït per aigua i paret calcària, per exemple, el valor del segon grup de variables —dit mòdul de Schmidt i representat per Sc — serà constant. Per tant, el primer grup de variables —dit mòdul de Reynolds, Re — també ho serà. Això implica que la longitud de les empremes serà inversament proporcional a la velocitat de fregament del fluid. La compro-

unes pautes analògues. Així mateix, l'aire manté amb les parets de les geleres una interacció experimental d'aquesta relació s'ha de portar a terme en dispositius experimentals de laboratori i, en termes generals, és satisfactòria. La importància d'aquestes deduccions és cabdal. L'anàlisi d'unes empremes de corrent donades ens donarà informació sobre els cabals d'aigua que les han format. Es podrà, doncs, obtenir informació sobre les condicions paleohidrològiques del corrent subterrani que va gravar les empremes, de gran interès geològic.

3-Vers la universalitat del fenomen

Les observacions i els estudis sobre les empremes de corrent no es limiten al cas anterior. Un altre sistema líquid-sòlid objecte d'atenció és el sistema aigua-gel; la cara interna de la capa de gel que cobreix un riu es desgasta amb

racció aerodinàmica —sublimació, amb formació també d'empremes de corrent. Els llits de sòlids granuloses no consolidats, en contacte amb un corrent fluid, generen també formes periòdiques similars a les empremes. Els llits dels rius, la sorra del mar prop de les platges en són exemples. L'origen, en aquests darrers casos, no és la dissolució.

I encara, en el camp industrial, trobem exemples d'empremtes de corrent en les incrustacions calcàries de les canonades d'aigua de refrigeració i d'altres instal·lacions. També s'observen casos de deformació plàstica de parets induïda per flux, amb pautes similars.

Què hi ha de comú en tota aquesta varietat d'empremtes? Aquesta és la qüestió primordial del científic en la recerca de la unitat en la diversitat. L'estudi de les empremtes de dissolució s'ha d'emmarcar en un context més general, que és el de la interacció entre una superfície sòlida deformable —per dissolució, per erosió, per deformació tangencial— i un flux turbulent que hi circula al damunt.

La constància dels valors de Re^* en les empremtes de dissolució té implicacions més universals. Comparem els diversos fenòmens citats, i encara d'altres. Quan representem gràficament la longitud d'una empremta de corrent davant el quocient de la viscositat cinemàtica (viscositat/densitat) i la velocitat de fric-

ció —és a dir, fent la correlació entre una característica de l'empremta i les característiques del fluid i de la manera com circula—, per a experiments i observacions procedents de diferents fonts i referits a sistemes ben diferents, observem una bona correlació, com es pot constatar de la figura adjunta. Malgrat que alguns treballs experimentals que hi figuren no subministren una informació prou precisa, i la representació donada té un marge d'error, és destacable la bona correlació entre dades tan diferents. L'interval de mesures comprèn un marge de cinc ordres de magnitud!

Els punts experimentals cauen tots entre uns valors de Re^* que oscil·len entre 1000 i 2000. No es pot donar encara una interpretació mecanicista del perquè, però l'ordre de magnitud de Re^* suggereix que l'explicació darrera de les formes de les empremtes de corrent es podria basar en unes estructures de flux que s'observen en passar el fluid del règim laminar al turbulent. Aquestes estructures són conegudes com a "explosions de la subcapa laminar" i són de

gran interès per caracteritzar la forma com flueix un fluid.

D'aquí es desprèn que l'interès últim en l'estudi de les empremtes de corrent és que, mitjançant aquest fenomen, es pot aprofundir en l'estudi de la turbulència. Aquest camp té aplicacions en àmbits absolutament diversos com les empremtes de corrent, les ondulacions de la pell dels dofins, l'estructura de les plomes de les aus, o els senyals creats a les rajoles que recobreixen la nau espacial Columbia podrien tenir una explicació coherent: la naturalesa adopta formes corresponents a estats d'equilibri de mínima energia, principi general en l'evolució de l'univers.

R. Gabriel i Rodrigo

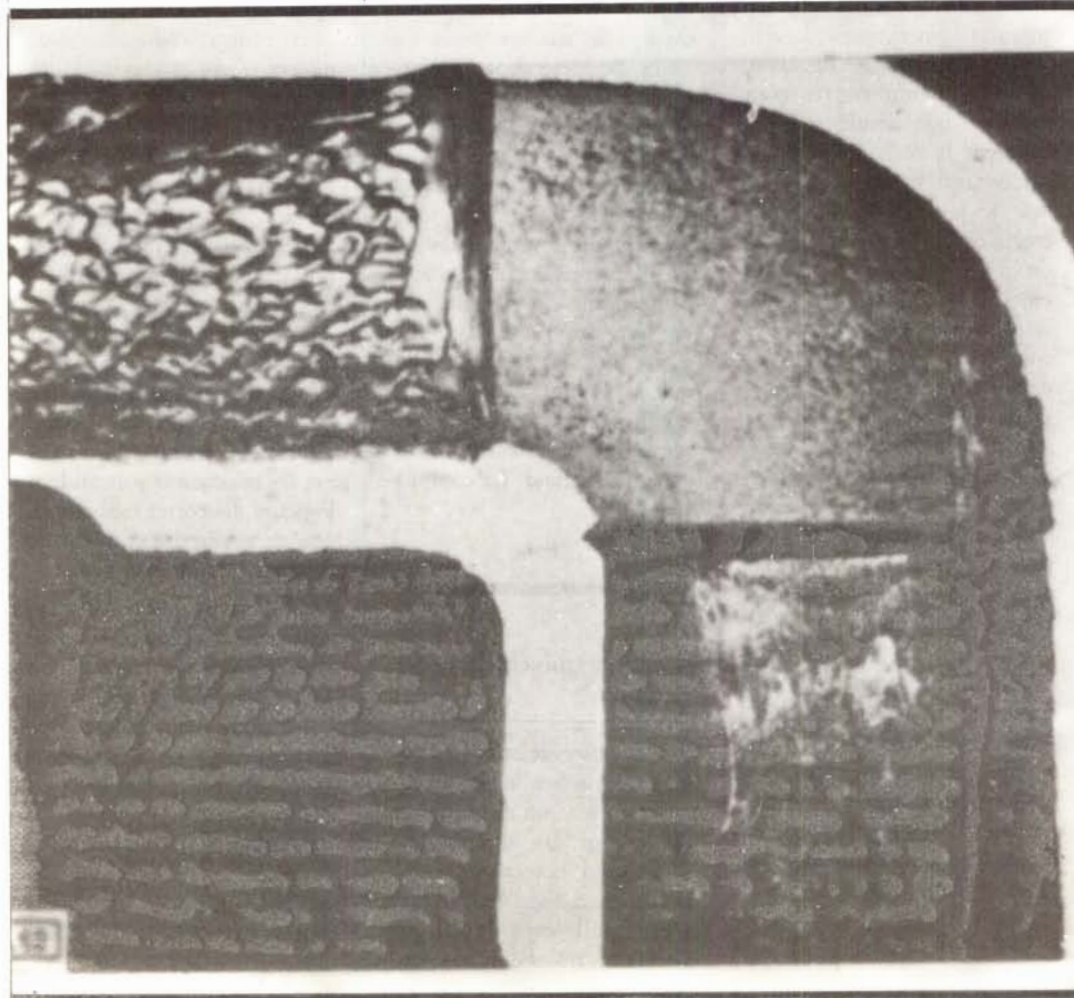


Fig. 6
Empremtes de corrent en una canonada