

Estudi microtermomètric dels filons de quars de les Esquerdes de Rojà, Massís del Canigó, Pirineu Oriental

per C. AYORA * y J. M. CASAS *

* Dpt. de Cristal·lografia i Mineralogia, Fac. Geologia, U. Barcelona

** Dpt. de Gemorfologia i Tectònica, Fac. Geologia, U. Barcelona

RESUM

Els materials pre-hercinians i el granit de Costabona estan travessats per un conjunt de filons de quars de fins a 15 km de longitud, coneguts com a "Esquerdes de Rojà". Aquests filons estan localment afectats per un sistema de bandes milonítiques i per un altre posterior de fractures. A partir de l'anàlisi microtermomètrica de les inclusions fluides primàries en quars, ha estat obtinguda una temperatura de formació de l'ordre de + 280° C per la major part del quars, i una temperatura de + 250° C per als monocristalls que omplen esquerdes i cavitats. Els filons s'haurien format a partir de solucions mineralitzants que contenen Na⁺, Ca⁺⁺, K⁺ i, en menor proporció, Mg⁺⁺, fins a una salinitat total de l'ordre del 20% en pes de la Na Cl.

SUMMARY

A 15 km long quartz vein system, known as Esquerdes de Rojà, is placed in prehercynian materials and in the granite of Costabona. The veins are locally deformed by a mylonite bands and by a younger system of fractures. Temperatures of formation around + 280° C for the quartz microcrystalline massive aggregates and slightly lower for vug filling crystals (+ 250° C) have been inferred from the microthermometry of fluid inclusions. The mineralising brines contain mostly Na⁺, Ca⁺⁺, K⁺ and a less amount of Mg⁺⁺, giving a total salinity up to 20% weight of NaCl.

INTRODUCCIÓ

El massís del Canigó-Carançà forma part del conjunt de domos i de sinforms, orientats WNW-ESE, i distribuïts al llarg de la zona axial pirinenca. Està format sobretot per un cos gnèssic estratiforme (els gneis del Canigó, Guitard, 1970) situat entre els metasediments cambro-ordovícics, que formen la part més externa del massís, i una unitat de micaesquistos amb metavulcanites, situada estructuralment sota els gneis, i que aflora a la part central del massís. Al vessant S (veure figura 1) els ortogneis del Canigó estan instruïts per un cos de granodiorita biotítica, la granodiorita de Costabona, que presenta una homogeneïtat de fàcies notable, un contacte net amb els materials encaixats i que talla les estructures regionals de deformació (esquistositat regional) dels gneis. Aquesta granodio-

rita es relaciona amb el conjunt de granitoids que en aquesta regió intrueixen posteriorment al clímax metamòrfic regional i les principals fases deformatives hercínianes (Autran et al. 1970). Juntament amb els gneiss encaixants i els metasediments que formen el vessant S del massís, la granodiorita està travessada per un conjunt de filons de quars de dimensions quilomètriques orientats WNW-ESE a ENE-WSW. El més llarg dels filons, en el qual principalment hem centrat aquest treball, s'estén al llarg de 15 km aproximadament, des dels voltants de la Portella de Roques Blanques a l'E fins al Pic de Tirapits al W. Aquest filó forma una carena rocosa que es coneix amb el nom d'"Esquerdes de Rojà". Els altres filons tenen dimensions més reduïdes, amb una longitud variable entre els 2 i 5 km, i es disposen paral·lelament entre ells (veure figura 1.C). Llur amplitud varia entre els 10 i els 25 m i s'aprimen en llurs terminacions. Llurs dimensions verticals són difícils d'avaluar, però a partir de les dades cartogràfiques disponibles, pot suposarse de l'ordre de 1 km per als filons de dimensions majors.

L'objectiu d'aquest treball és aportar noves dades sobre les característiques i evolució d'aquest conjunt de filons de quars, a partir de l'estudi estructural i de la microtermomètria de les inclusions de fluids atrapats en els quars.

DESCRIPCIÓ DELS FILONS DE QUARS

Els filons estan formats en llur major part per agregats de quars microcristal·lí blanc-translúcid. El quars presenta una textura hipidiomòrfica lleugerament heterogranular, amb una mida de gra que varia entre 1 i 6 mm (veure foto 2.1.). Els cristalls presenten extinció ondulant i algunes fractures plenes de cristalls de mida molt més petita. S'han reconegut també inclusions sincròniques de muscovita, que formen des d'agregats microscòpics fins a masses centimètriques gris-verdoses, sobretot a les terminacions dels filons són abundants els fragments de roca encaixant fortament alterats. Els filons presenten nombroses esquerdes, geodes i petites cavitats plenes, total o parcialment, per agregats drusiformes de monocris-

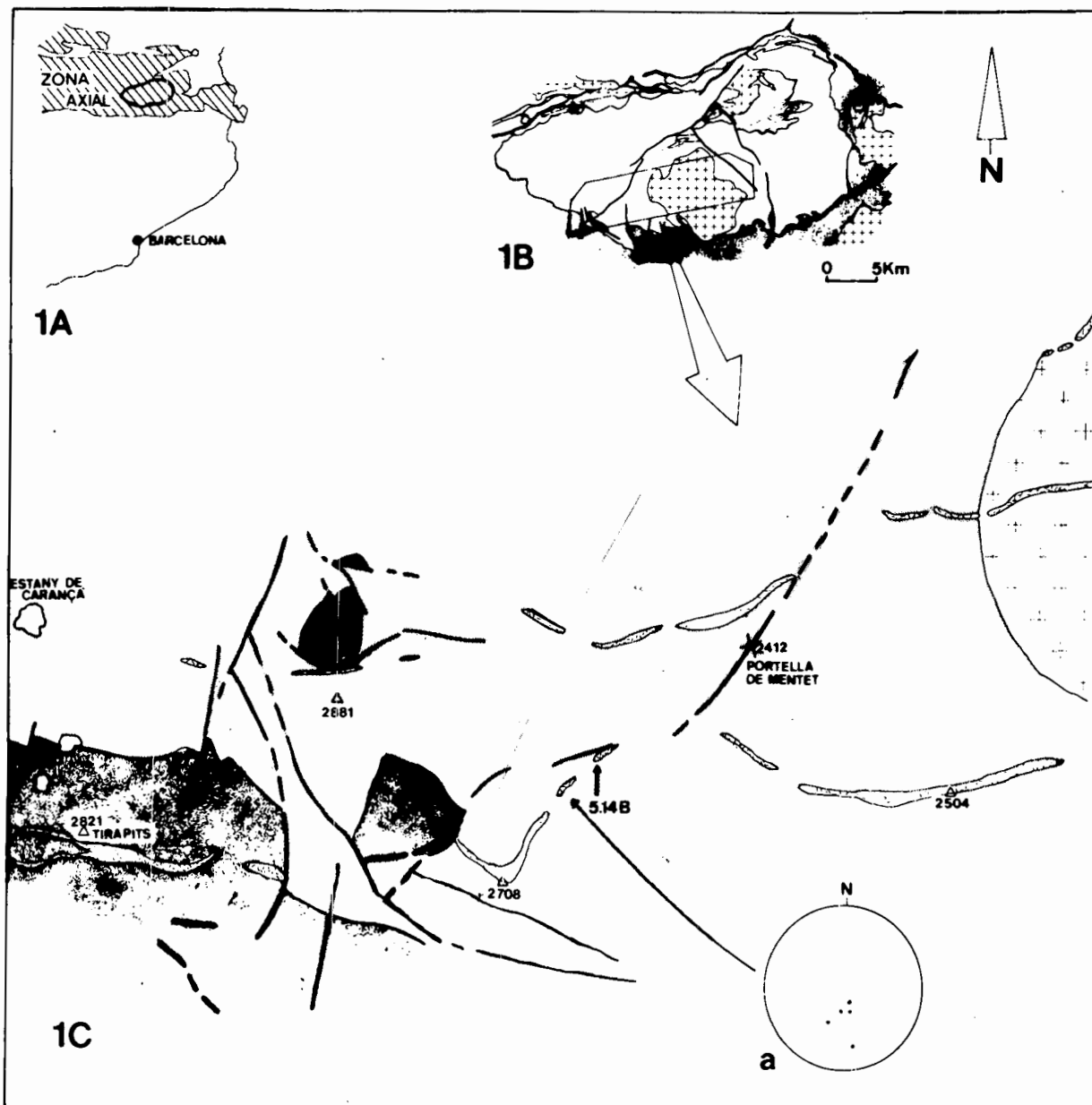
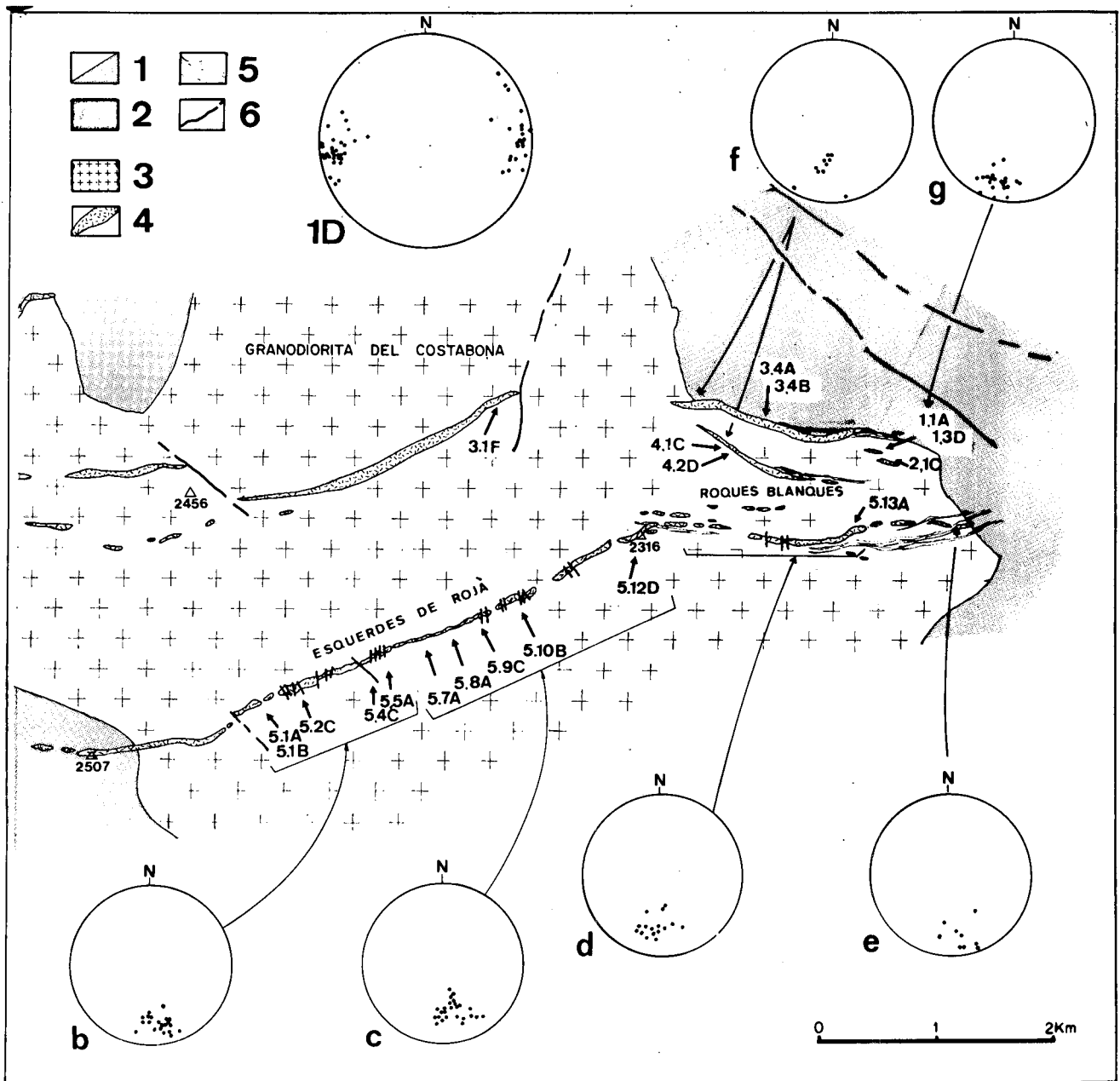


FIGURA 1.— Situació dels filons de quars de les Esquerdes de Rojà

1.A: Situació del massís del Canigó-Carança

1.B: Esquema geològic del massís del Canigó-Carança, segons Guitard (1970), modificat. Llegendes: 1.-- gneis del Canigó; 2.-- netasediments; 3.-- granitoids intrusions; 4.-- filons de quars; 5.-- bandes milonítiques; 6.-- falles.



1.C: Esquema geològic dels filons de quars estudiats (mateixa llegenda).

1.D: Orientació del sistema de plans N-S (hem. inf. 58 mesures) a-g. Orientació dels plans E-W (hem. inf).

talls de quars transparent a blanc-translúcid, i de mida variable fins a 5 cm. Al sector oriental estudiat alguns monocristalls tenen les cares prismàtiques lleugerament deformades.

Els filons no presenten zonació mineralògica ni estructural transversal aparent. El conjunt de filons està afectat per dos sistemes de plans mesoscòpicament identificables i que en certs casos estan associats a importants transformacions texturals del quars. Es tracta de dos sistemes de plans palesables geomètricament (fig. 1), i que presenten una distribució i un grau de penetrativitat variable.

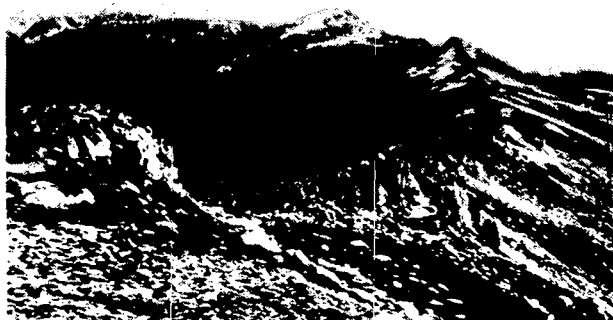
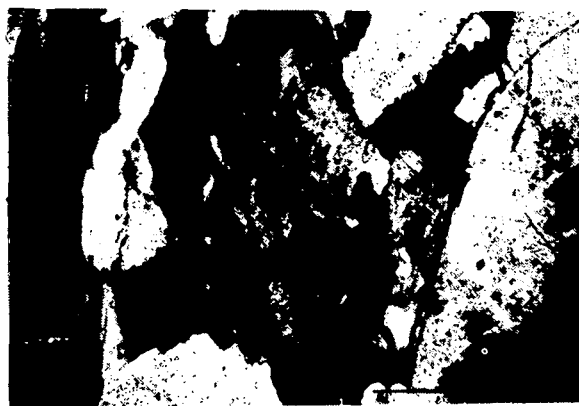


FOTO 1. - Aspecte de les Esquerdes de Rojà. Al fons el pic del Canigó.

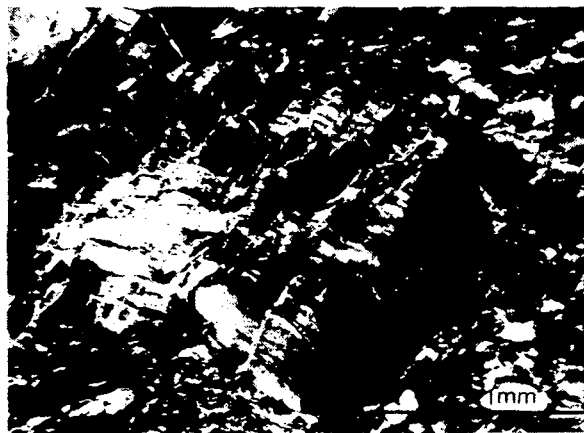
El sistema E-W

A tots els filons estudiats d'aquesta zona es reconeix un conjunt de plans subparal·lels orientats aproximadament E-W, amb un cabussament variable entre 40 i 80° N, i que es disposen aproximadament paral·lels al contacte entre els filons i les roques encaixants. L'ur direcció varia lleugerament en variar la dels filons als quals es troben associats, (fig. 1 D, diagrames a-g). Aquests plans són presents a tota l'amplària dels filons, i als materials encaixants propers als contactes. A escala mesoscòpica tenen un grau de penetrativitat variable i formen des d'una esquistositat espaiada fins a un conjunt de plans amb un espaiat decimètric a centimètric. Estan especialment desenvolupats a la terminació E dels filons, on tenen una orientació paral·lela a la de l'esquistositat milonítica que afecta a aquesta àrea la granodiorita de Costabona (fig. 1 D, diagrames d-g; fig. 2 de Casas, 1982).

El quars mostra un grau de deformació molt variable associat a aquest sistema de plans. Els cristalls de major mida assoleixen fortes extincions ondulants i estan travessats per nombrosos sistemes d'esquerdes i fractures. La intersecció d'aquests sistemes fa que els cristalls tinguin formes sigmoidals tota vegada que origina una notable



F.2-1



F.2-2



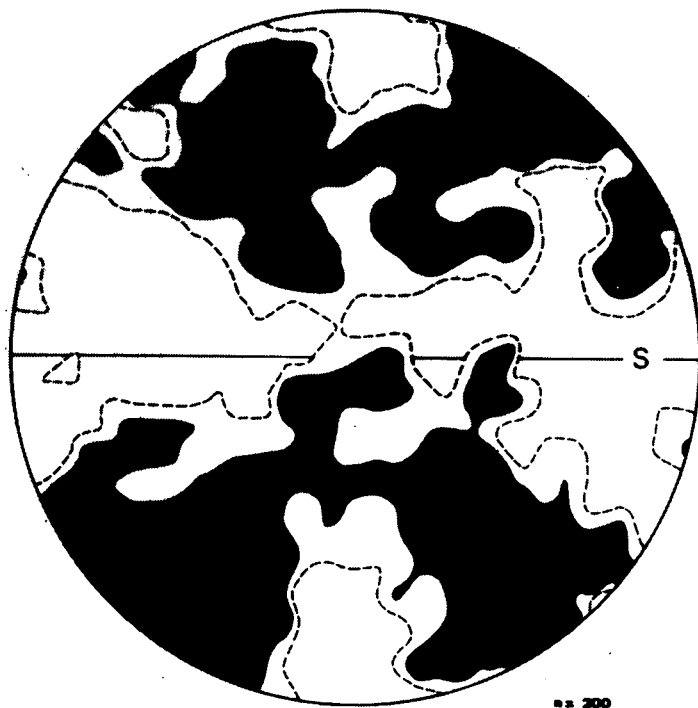
F.2-3

FOTO 2. - 2.1. Agregat heterogranular de quars poc deformat M-55A. (N.C.).

2.2. Porfiroclaste sigmoidal de quars afectat per diversos sistemes d'esquerdes i voltat de grans de mida molt menor. Terminació E de les Esquerdes de Rojà. (N.C.).

2.3. Quars amb textura protomilonítica, amb recrystal·lització incipient en les vores de gra M-512D. (N.C.).

reducció de la mida de gra (foto 2.2). A les mostres amb una textura protomilonítica s'ha reconegut una esquistositat anastomosada, desenvolupada irregularment i definida per la disposició dels cristalls de quars i per les inclusions de muscovita. No s'ha observat poligonització i la recristal·lització està restringida al creixement de nous grans de mida molt petita (entre 10 i 25 micres) a les vores de gra, a l'interior de les esquerdes i a les bandes d'extinció (foto 2.3). Es reconeix també una matriu criptocristal·lina composta per fragments de cristalls de quars i de muscovita i per quars recristal·litat, i dos sistemes de plans de crenulació extensiva (Shear bands) aparentment compatibles amb una extensió paral·lela a l'esquistositat. Els grans de quars presenten una orientació cristal·logràfica preferent i els eixos *c* es disposen formant dues girlandes encreuades, igualment poblades i simètriques respecte l'esquistositat (fig. 2.1).



El sistema N-S

Es tracta d'un conjunt de plans subverticals, amb una direcció propera a N-S. Es reconeixen dins els diversos filons encara que tenen una distribució més irregular que els plans descrits anteriorment. Són especialment en els sectors on els filons estan afectats per fractures subverticals, on arriben a formar un sistema de plans subparal·lels amb espaiat centimètric. Estan associats a esquerdes i diàclasis i en alguns casos a fractures de moviment horitzontal (fig. 1.D). En els casos on s'ha pogut establir relacions cronològiques, aquests plans tallen els E-W i, a diferència d'aquests, tenen un cabussament més constant (fig. 1.D). El quars afectat per aquest sistema de plans no mostra signes notables de deformació i conserva la textura hipidiomòrfica inicial.

Aquest conjunt d'observacions permet d'establir que els filons de quars registren en aquest sector dos esdeveniments deformators successius i responsables de la formació de meso i microestructures diferents. En primer lloc els filons serien afectats per un procés de milonització generalitzat, però d'intensitat variable, relacionable amb la deformació milonítica que afecta la granodiorita de Costabona. D'altra banda els filons registren una deformació de caràcter més fràgil, relacionable probablement amb una tectònica de fractura posterior.

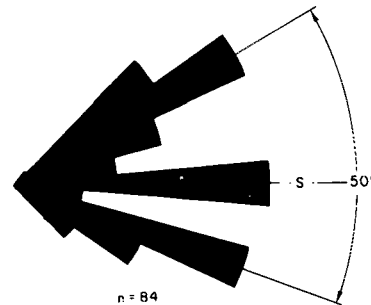


FIGURA 2.— Diagrames d'orientació dels eixos *c* (2.1) i de la disposició dels plans de shear bands (2.2) en quars amb microestructura protomilonítica (Portella de Roques Blanques). *S* indica l'orientació mitjana de l'esquistositat i *N* el nombre de mesures. Contorns 2.1: 0,5–1–2 i 4% (hem. inf.).

L'orientació de l'esquistositat milonítica, el caràcter heterogeni de la deformació (penetrativitat variable de l'esquistositat associada a bandes d'intensitat variable de la deformació dintre dels filons), així com el tipus de microestructura i l'orientació preferent dels quars als estadis protomilonítics, permet d'establir que aquesta deformació milonítica reconeguda als filons de quars és relacionable amb la deformació milonítica que presenta localment la granodiorita de Costabona en aquesta àrea.

INCLUSIONS FLUIDES

Per a l'estudi dels fluids de les inclusions han estat recollides mostres de quars a 25 punts diferents dels filons i han estat seleccionades al microscopi 20 mostres pertanyents a 18 d'aquests punts (fig. 1 i taula I). Atès que sobre terreny no s'ha apreciat cap zonació transversal dels filons no ha estat realitzat un mostreig sistemàtic normal a llur direcció. El material d'estudi està cons-

tituit per: 1) quars massiu microcristal·lí (mida de gra de 30 a 200 micres) blanc-traslúcid; 2) monocristall de quars provinents d'esquerdes, cavitats i geodes, de transparents a blanc-traslúcid, i 3) quars afectat intensament pel sistema de plans E-W.

Morfologia i tipus d'inclusions

L'estudi s'ha centrat sobre les inclusions de fluids amb caràcter primari, desestimant les inclusions associades a fractures posteriors. Algunes mostres contenen inclusions de muscovita i, rarament, un sòlid amb morfologia de carbonat. En alguns monocristalls procedents de cavitats han estat observades inclusions d'altres monocristalls de quars, que indiquen una certa inestabilitat mecànica en el moment de la deposició.

La majoria de les inclusions fluides observades són bifísiques (solució salina + bombolla gasosa) i molt poques presenten a més un sòlid cúbic probablement de NaCl (foto 3.1). No s'han reconegut a cap mostra inclusions trifàsiques riques en CO₂ (solució salina + CO₂ líquid + CO₂ gas), presents dins minerals d'altres filons de la zona (Ayora, 1978). La longitud major de les inclusions varia entre 10 i 150 micres i les de mida més gran es localitzen al quars més transparent.

Segons llur morfologia i el tipus de quars que les conté hem classificat les inclusions en tres tipus, que es corresponen amb els tres grups definits als assatjos microtermomètrics:

- I) Inclusions de forma irregular, distribuïdes al atzar o bé aliniades en bandes paral·leles no relacionables amb fractures, en mostres de quars massiu microcristal·lí (foto 3.1).
- II) Inclusions de forma irregular a més o menys geomètrica, distribuïdes a l'atzar o en bandes de creixement, en monocristalls de quars (foto 3.2).
- III) Inclusions allargades, amb vores dentades o no, en quars massiu i monocristalls deformats segons plans E-W. Aquestes inclusions presenten sovint una alineació i una orientació dimensional paral·lela aproximadament a aquest sistema de plans (fotos 3.3 i 3.4).

Temperatures d'homogeneització

Els assatjos microtermomètrics han estat realitzats amb una platina escalfable - refredable Chaixmeca (Poty *et al.*, 1976). Respecte les temperatures d'homogeneització pot destacar-se:

a) De la figura 3a, b i c, que mostra les temperatures d'homogeneització observades a les inclusions dels tipus I, II, i III respectivament, es dedueixen tres episodis, amb temperatura decreixent, en la història geològica dels filons:

– el quars massiu correspondria al primer episodi

Mostra	Th (°C)	T _g (°C)	T _{Eutèctica} (°C)	Notes
1.1 A	188.6 (13)	-14.0 (9)		M
1.3 D	171.6 (5)	-14.7 (8)		M
2.1 C	179.8 (14)	-22.0 (12)	-31 a -37.5 (3)	M
3.1F F	175.4 (12)	-16.8 (11)	-26 a -36 (4)	M
3.4A A	177.4 (9)	-23.2 (6)		M
3.4 B	163.0 (13)	-21.8 (11)	-30 a -38 (4)	G
4.1 C	150.0 (7)	-17.2 (4)	-47 (1)	G-ND
	124.8 (13)	-17.0 (9)		G-D
4.2 D	181.1 (2)	-33.2 (1)		M-ND
	134.2 (15)	-28.1 (7)	-44.7 (1)	M-D
5.1 A	200.1 (7)	-18.5 (2)		M
5.1 B	150.6 (11)	-16.7 (11)	-40 a -46 (9)	G
5.2 C	167.6 (14)	-19.4 (13)	-42 (1)	M
5.4 C	128.5 (10)	-18.0 (9)	-30 a -41 (6)	G-D
5.5 A	155.9 (10)	-28.3 (7)	-39 a -45 (3)	G-B
	159.0 (7)	-15.0 (5)	-42 a -47 (4)	G-V
5.7 A	143.1 (8)	-24.9 (6)		G
5.8 A	193.2 (5)	-10.5 (14)	-34 a -40.7 (3)	G-B
	191.3 (7)	-9.1 (6)	-41.2 a -42.6 (6)	G-V
5.9 C	179.6 (10)	-12.8 (8)		M
5.10 B	177.7 (14)	-18.2 (10)		M
5.12 D	164.3 (13)	-14.8 (12)	-25 a -34.5 (4)	M
5.13 A	164.4 (11)	-15.5 (11)	-36.5 a -42.8 (7)	G
5.14 B	201.9 (11)	-17.1 (6)		M

TAULA I.- Resum de les mesures termomètriques en inclusions fluides del quars.

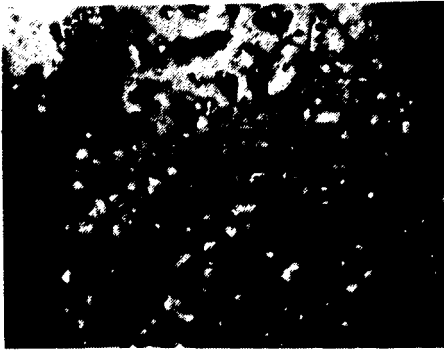
Els valors de temperatures són mitjanes aritmètiques del nombre de mesures expressat entre parèntesi (M=agregat massiu; G=monocristalls a cavitats i esquerdes; D=inclusions deformats; ND=id. no deformats; B=base d'un cristall implantat; V=id. vèrtex).

(inclusions de tipus I), amb un màxim de temperatures d'homogeneització (80 sobre 124 mesures) entre +165 i +190°C;

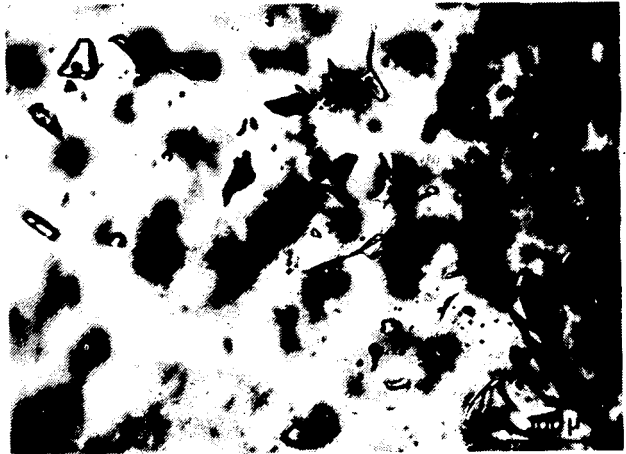
– el quars cristal·litzat en geodes, esquerdes i cavitats (inclusions de tipus II), correspondria a una fase posterior, amb un màxim de temperatures d'homogeneització entre +140 i 165°C (54 sobre 79 mesures). Les mesures realitzades en quars massiu i en monocristalls procedents del mateix punt de mostreig (Taula I) confirmen aquesta gradació de temperatures;

– el tercer grup de mesures correspondria a les inclusions de tipus III amb temperatures d'homogeneització una mica inferiors, entre +120 i +140°C (38 mesures a tres mostres) i estaria relacionat amb la deformació de les inclusions de tipus I i II.

Les temperatures d'homogeneització d'inclusions no deformats coexistents en mostres del mateix punt (+5m) són de l'ordre de +180°C, en una mostra de quars massiu (Taula I, mostra 4.2D) i de +150°C en una altra de quars drusiforme (mostra 4.1.C), resultant una temperatura menor d'homogeneització per al tipus III d'inclusions. Atès que no s'han observat diferències de salinitat d'aquestes inclusions, la disminució de la temperatura d'homogeneització pot ésser deguda a una reducció del volum de les cavitats, resultat de la deformació de les



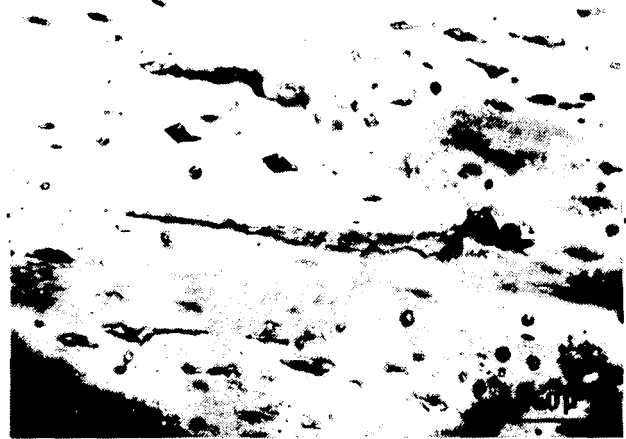
F.3-1



F.3-2



F.3-3



F.3-4

FOTO 3.- Aspecte microscòpic de les inclusions fluides.

- 3.1. Inclusions fluides de forma irregular en quars massiu microcristal·lí (tipus I). Observeu la presència d'una fase sòlida a algunes inclusions. M-212A. (N.P.)
- 3.2. Inclusions en monocristalls de quars (tipus II). M. 512A. (N.C.)
- 3.3. Inclusions allargades i orientades (tipus III). M-42D. (N.P.)
- 3.4. Detall d'una inclusió fortament elongada i amb vores aserrades M-42D. (N.P.)

inclusions durant el desenvolupament de l'esquistositat espaiada E-W (relació no comprovada totalment); aquesta reducció de volum implicaria un augment de la densitat del fluid i de la relació líquid/gas, amb la conseqüent desaparició del gas (homogeneització) a temperatures més baixes, sense necessitat de suposar barreges amb altres solucions més fredes i d'igual salinitat. Gratier (1982) descriu fenòmens experimentals de dissolució i arrodoniment d'inclusions en escalfar-les a T més grans de la d'homogeneització, augmentant així la pressió interna de llurs fluids. La densitat minvaria lentament a P elevades (possible escapament de fluids?). Malgrat les poques observacions que disposem pensem que en el nostre cas la morfologia de les inclusions, allargada i amb vores aserrades, no permet de suposar els fenòmens descrits per l'autor esmentat. Sense prou elements per a establir un mecanisme de deformació, en el nostre cas es

tractaria de deformacions degudes a un esforç diferencial extern sobre la inclusió i a T inferior a la d'homogeneització, el que permetria reduir el volum i augmentar la densitat de la inclusió. Per a provocar una reducció de volum corresponent a un descens de temperatures d'homogeneització de 20 a 50°C, a solucions de salinitat del 20% en pes de NaCl, es necessitaria sotmetre les inclusions fluides a esforços diferencials de l'ordre de 250 bars (Potter, 1977).

b) Per tal de tenir una idea aproximada de les temperatures reals de formació dels filons de quars cal considerar un increment de les temperatures d'homogeneització degut a la pressió confinant al moment de la deposició del mineral. Considerant una potència d'aproximadament 4000 m per els materials sobrejacentes (gneiss del Canigó, metasediments cambro-ordovícics i materials del Paleozoic superior probablement; densitat mitjana 2,7 g/cm³),

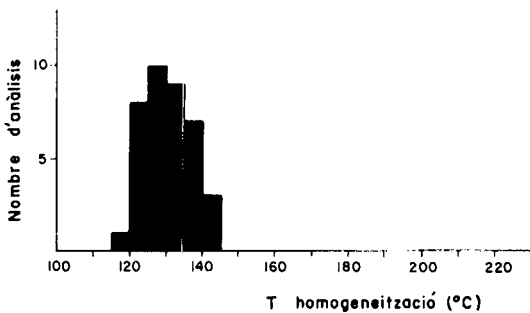
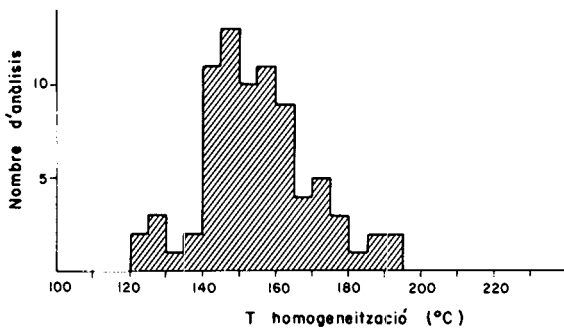
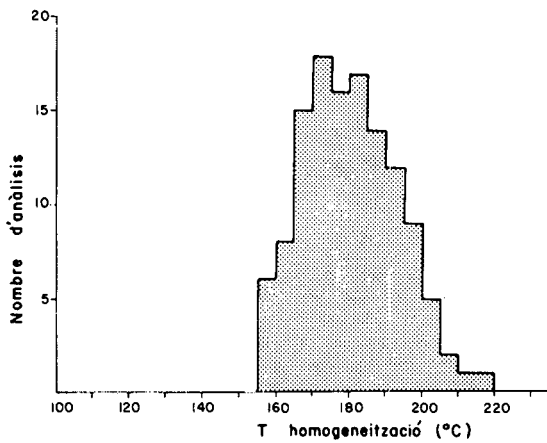


FIGURA 3. - Histogrames de temperatures d'homogeneització de: a) inclusions de tipus I; (124 mesures); b) inclusions de tipus II, (79 mesures) c) inclusions de tipus III (38 mesures).

i tenint en compte els efectes de les fases deformatives sinquistoses hercíniques, anteriors a l'encaixonament dels filons, s'ha deduït una pressió litostàtica confinant d'aprox 1 Kbar al moment de la deposició del quarz filonià. Guitard i Laffite (1958) arriben a conclusions semblants sobre la pressió confinant de la intrusió de la granodiorita de Costabona. Per a solucions amb una salinitat del 20% en pes de NaCl, aquesta pressió confinant correspon a una correcció de temperatures de l'ordre de + 90 a 100° (Potter, 1977). Com a conseqüència les temperatures reals dels diversos episodis de formació dels filons de quarz haurien de situar-se a + 290 a 260° C i + 260 a 240° C respectivament.

c) No ha estat observat cap indici de grabació tèrmica longitudinal dels filons, sinó que aquests mostren una gran homogeneïtat pel que fa referència a la distribució de les temperatures d'homogeneització (fig. 1C i Taula I).

a) Química de les solucions mineralitzant

Microtermometria

Les observacions microtermomètriques han estat realitzades prèvia congelació de les solucions per un corrent de N₂ líquid (Poty *et al.*, 1976). Aquestes observacions poden contribuir a subministrar algunes indicacions sobre la salinitat de les solucions.

a) Les temperatures de la primera fusió del sòlid NaCl · 2H₂O probablement (Crawford *et al.*, 1979), es troben compreses entre -25 i -47° C (taula 1). Són netament inferiors a -21° C, eutèctic del sistema NaCl · H₂O, pel que les interpretacions de salinitat deuen ésser realitzades forçosament en un sistema complex NaCl · CaCl₂ · MgCl₂ · H₂O. L'existència de KCl, l'altra sal comú a les solucions de les inclusions fluides en minerals (Roedder, 1972), té un capteniment semblant al NaCl i pot considerar-se, per aquests fins, com un sol component.

b) les temperatures observades de fusió del gel mostren una gran dispersió. Es distribueixen, com mostra la figura 4, entre -7 i -36° C (188 mesures), amb un màxim entre -14 i -19° C (95 mesures), el que equivaldria a un total de sals dissoltes de l'ordre del 20% en pes en NaCl, per una relació teòrica Mg: Ca de 1:3 (Crawford *et al.*, 1979).

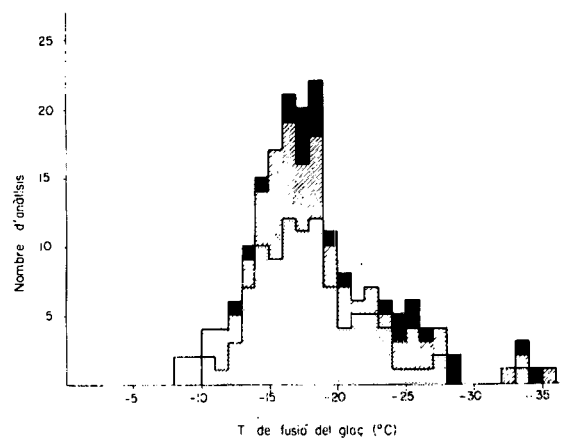


FIGURA 4.- Histogrames de temperatures de fusió del gel per a les inclusions de tipus I, (98 mesures); de tipus II (65 mesures); i de tipus III (25 mesures).

- c) Contràriament a les temperatures d'homogeneització, no existeix discriminació entre les inclusions dels tipus I, II i III anteriors respecte a llur salinitat (temp. de la primera fusió de sòlid i temp. de fusió del gel), que pot ésser considerada constant al llarg dels diversos episodis de la història dels filons.
- d) No hem detectat, tampoc, igual que amb les temperatures d'homogeneització cap tipus de zonació longitudinal en la distribució de salinitats, sinó que els diversos valors observats es distribueixen homogèniament al llarg dels filons mostrejats (fig. 1 C i taula I).

Mostra	Pes (mg)	mg catió/Kg mostra				Ca ⁺⁺ /Mg ⁺⁺	Na ⁺ /K ⁺	Na ⁺ + K ⁺
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺			
3.1F	500.0	33.8	3.4	34.6	13.5	37.2	2.6	1.3
4.1	656.2	9.1	n.d.	90.7	45.4	—	2.0	15.0
5.1 B	151.7	60.5	5.9	534.6	238.6	10.3	2.2	11.6
5.2(I)	1.384.4	36.5	2.2	51.0	7.3	16.6	7.0	1.5
5.2(II)	1.806.0	37.2	1.5	52.5	7.5	24.8	7.0	1.6
5.5A	078.8	100.5	10.1	804.0	502.5	10.0	1.6	11.8
5.7A	100.4	38.0	12.7	380.0	126.7	3.0	3.0	10.0
5.13	254.9	49.2	3.8	151.1	90.8	13.0	1.7	4.6

TAULA II.— Resultat de les anàlisis de fluids d'inclusions en el quars, obtinguts mitjançant trituració i llixiviació.

Anàlisi química de les solucions

S'han seleccionat monocristalls de quars transparents que contenen inclusions de fluids observables al microscopi, pertanyents a 7 punts de mostreig (taula II). La mostra 5.2. (I i II) correspon a un agregat semitransparent. L'observació microscòpica no ha revelat inclusions de sòlids dins el quars. La superfície dels cristalls ha estat netejada amb HCl concentrat i diversos rentats amb aigua destil·lada. Les mostres han estat triturades en un morter d'àngata. S'ha tractat d'evitar la formació de la fracció més fina, a fi de minimitzar la superfície de partícules de quars que absorbeixen selectivament els ions de la solució i provocarien descompensacions a les relacions entre ells invalidant el mètode. Els fragments de quars han estat llixiviats amb aigua destil·lada desionitzada, i s'ha afegit Ce^{+4} ($Ce(SO_4)_2$), a fi de reduir l'absorció dels cations a analitzar per la superfície dels fragments de quars (Roedder, 1958). Malgrat les precaucions adoptades, l'eliminació de l'absorció diferencial pels cations no ha pogut evitar-se segurament de forma completa (veure discussió a Roedder, 1958). El sòlid ha estat pesat i les solucions de llixiviació obtingudes (entre 10 i 15 cc), perfectament transparents, han estat analitzades mitjançant espectrometria d'absorció atòmica. Les aigües d'un segon llixiviats donen continguts catiónics inferiors al 8% respecte al primer llixiviats, estant Na^+ i K^+ lleugerament més concentrats en el primer. El tercer llixiviats ja no ha estat analitzat.

El resultat de les anàlisis es troben a la taula II. Les mostres 5.2. (I) i 5.2. (II) procedeixen de fragments d'un mateix agregat semitransparent de quars, barrejats i dividits a l'atzar. Llurs anàlisis mostren una bona reproductivitat del mètode descrit.

A més d'altres inconvenients menors, descrits per Roedder (1958), el mètode de trituració emprat ha deixat sense obrir la majoria d'inclusions de mida més petita, la qual cosa invalida els valors absoluts de les concentracions dels ions expressats a la taula II. Nogensmenys, a partir de les observacions microtermomètriques, es pot assumir l'homogeneïtat química de les inclusions primàries, independentment de llur mida, pel que podrien acceptarse com a vàlides, si més no des del punt de vista orientatiu, les proporcions relatives entre els ions expressades a la taula II.

DISCUSSIÓ D'ALGUNES HIPÒTESIS GENÈTIQUES.

La figura 5 mostra un possible esquema sobre la formació dels filons de quars de les Esquerdes de Rojà. S'han establert tres hipòtesis A, B i C sobre les condicions físiques extremes en la generació dels filons. S'ha suposat un gradient de pressió litostàtica de 270 bars/km. A les hipòtesis A i B s'ha suposat una certa inestabilitat de l'escorça, amb una activitat ígnia i anomalies geotèrmiques associades. Un gradient de l'ordre de 60° C/km, freqüent a situacions com l'esmentada (Serralades Bètiques, Hurtig i Oelsner, 1979), permetria explicar les temperatures de cristallització del quars d'aprox 280° C a 4 km de profunditat. A la hipòtesi C s'ha considerat la granodiorita totalment refredada; un gradient de 35° C/km, habitual a zones estables de l'escorça. La temperatura de superfície ha estat suposada de 20° C en tots els casos.

En aquest cas per dissoldre suficient quantitat de SiO_2 caldrien les condicions de P-T corresponents a una profunditat de l'ordre de 10 km. Atès que la solubilitat SiO_2 en H_2O a 370-380°C experimenta molt poca variació en passar de 1,6 a 2,7 Kbars (1,8 a 2g SiO_2 /kg H_2O , Weill i Fyfe, 1964), per als fins orientatius de l'esquema s'ha considerat la hipòtesi C juntament amb la B. Als càlculs sobre la solubilitat del SiO_2 ha estat considerada indistintament H_2O pura i solució salina, ja que el contingut en sals dissoltes no afecta sensiblement la solubilitat del SiO_2 (Holland, 1967). El coneixement insuficient que disposen sobre els filons en la vertical no ens permet afinar més en la distribució de les quantitats de quars a diferents temperatures i, per tant, determinar quina de les hipòtesis considerades ací és la més ajustada. Si l'homogeneïtat horitzontal observada es mantingués en profunditat, la hipòtesi A explicaria més satisfactòriament la proporció molt superior d'agregats massius de quars amb temperatures de formació entre 290 i 260° C (Fase I), en relació als monocristalls i agregats de temperatures quelcom inferiors (fase II).

Considerem tot seguit dues possibilitats teòriques sobre l'origen de les solucions mineralitzants; 1) Solucions

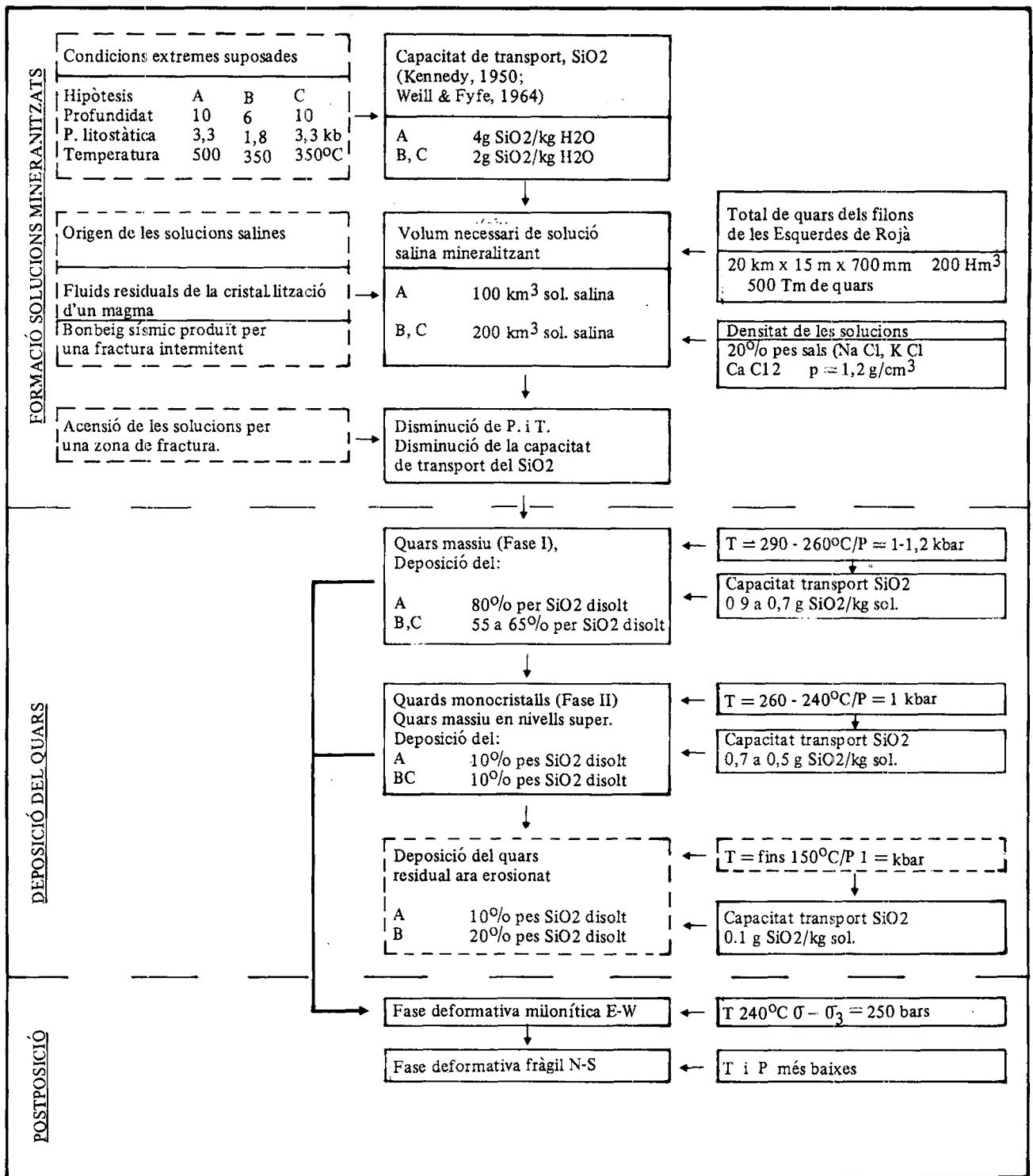


FIGURA 5.- Esquema sobre la possible evolució dels filons de quars de les Esquerdes de Rojà. Els quadres en línia discontinua indiquen suposicions no comprovades.

salines procedents de la cristallització d'un magma granodiorític; 2) solucions percolants escalfades i impulsades per l'acció d'una zona de fractura en profunditat.

Per a generar la solució salina necessària, 100 a 200 km³, (fig. 5), caldria suposar un mínim de 400 a 850 km³ (hipòtesis A i B respectivament) d'un magma granodiorític saturat en H₂O (12% en pes de H₂O, cas extrem, segurament menor) que ascendís des de 25 km, pressió d'anatexia dels materials de l'escorça (Burham, 1967), fins a la solidificació total (1% en pes H₂O, Guitard i Lafitte, 1958). La dificultat d'aquesta possibilitat teòrica no rau en el volum de granodiorita necessari, sempre imaginable en profunditat, sinó en l'absència de textures porfíriques, bretxes d'explosió, alteració hidrotermal generalitzada i altres evidències que permetien suposar l'ebullició i concentració de gran part de l'aigua i sals dissoltes a les darreres fases de cristallització (Burham, 1967). La dificultat més gran d'aquesta possibilitat teòrica rau, però, en la morfologia rectilínia, homogeneïtat longitudinal dels filons i absència d'una gradació tèrmica i/o de salinitats al llarg d'alguns quilòmetres (fig. 1C, taula 1). Tampoc no s'observa el camp de filons trenats normalment associat a un cos igni d'aquestes característiques.

La segona possibilitat genètica es basa en el model de bombeig sísmic proposat per Sibson *et al.* (1975). Aquest model està basat en la deformació dilatant produïda al voltant d'una zona potencial de fractura, com a conseqüència de la formació d'una xarxa d'esquerdes i fractures que precedeixen el trencament. Aquest augment local de porositat provocaria migracions de fluids cap a la zona de fractura.

Els fluids serien capaços de dissoldre SiO₂ i d'altres elements i esdevindrien una solució salina. La pressió parcial de fluids augmentaria una volta les esquerdes fossin plenes. Aquest augment de pressió disminuiria la resistència friccional a la cisalla i facilitaria el trencament, i un cop produït els fluids serien expulsats, en tancar-se les esquerdes, cap a zones de menor pressió. Aquest mecanisme, repetit moltes vegades, és proposat per diversos autors (Phillips, 1972; Sibson *et al.*, 1975) com a capaç de produir mineralitzacions al llarg de zones de fractura. Tot acompanyant el sistema sísmic de Matsuhiro (Japó), equivalent a un sol sisme de magnitud M6, s'han observat en superfície fins a 10 hm³ de salmorres riques en Na-Ca-Cl (Tsuneishi i Nakamura, 1970, a Sibson *et al.*, 1975). Aquest model de bombeig sísmic ha estat proposat també per a explicar la gènesi d'un gran filó de quars que travessa la regió de Baviera (Gromes, 1980). En el nostre cas, segons les condicions suposades a la figura 5, i d'acord amb el model de bombeig sísmic proposat pels autors esmentats, per a generar els filons de quars de les Esquerdes de Rojà (≈ 500 tm de quars), caldrien de l'ordre de 20.000 (hip A) a 50.000 (hip B i C) pulsacions sísmiques de magnitud M6. Considerant un desplaçament mínim de 1 a 100 cm per pulsació, representarien desplaçaments totals de la fractura de 2 a 50

km tanmateix a la zona estudiada no disposem de cap evidència cartogràfica que permeti suposar tals desplaçaments, ni tampoc els filons de quars no presenten característiques texturals que indiquin un caràcter episòdic o intermitent de la mineralització.

Malgrat aquests inconvenients que dificulten l'aplicació estricta del model de bombeig sísmic, aquest permet d'explicar millor la morfologia linial i quilomètrica dels filons, i la circulació, mitjançant un sistema obert renovable, dels volums enormes de solució salina que hi son necessaris (100 a 200 km³).

CONCLUSIONS

- A. Els grans filons de quars mostren una geometria rectilínea i travessen els diferents materials del vessant S del massís del Canigó (granit, gneiss, metasediments). Presenten una gran homogeneïtat mineralògica i textural. Aquesta homogeneïtat es manifesta també en la distribució de les temperatures d'homogeneïtzació i en la composició química dels fluids atrapats en el quars.
- B. La història dels filons de quars que mostra tres episodis continus, amb temperatura decreixent, caracteritzats per màxims respectius a les temperatures d'homogeneïtzació dels fluids de les inclusions.

Considerant una correcció de temperatures corresponent a una pressió confinant de 1 kbar, aquests màxims correspondrien a:

- I) Cristallització de quars en masses microcristal·lines amb enclaus de muscovita, entre + 290 i + 260°, a partir de solucions amb Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺ i Mg⁺⁺, fins a una salinitat de l'ordre del 20% en pes de NaCl.
 - II) Cristallització de quars drusiforme a esquerdes i cavitats, a partir de solucions de salinitat semblant i lleugerament més fredes, entre + 260 i 240° C aproximadament.
 - III) Deformació dúctil d'ambòs tipus d'inclinacions, que assoleixen una orientació dimensional preferent mantenint el sistema tancat i la salinitat inicial. Aquest procés és el resultat d'una deformació milonítica irregularment desenvolupada en els diversos filons.
- C. Als filons estudiats s'ha desenvolupat un sistema de plans subparalels i una esquistositat espaiada E-W, que localment es troba associada a una minva de la mida de gra dels quars i a la deformació de les inclusions fluides primàries (fase III anterior). Aquesta esquistositat seria correlacionable amb la deformació milonítica que afecta localment la granodiorita de Costabona. Posteriorment, un sistema de fractures i diàclasis s'ha desenvolupat irregularment al llarg dels filons, i podria enmarcar-se dintre d'una tectònica de fractura posterior.

L'encaixonament dels filons de quars és, doncs, en aquesta zona, posterior al refredament de la part superior de la granodiorita de Costabona, i immediatament anterior al sistema de bandes milonítiques que afecten els granitoids intrusius tardihercynians d'aquesta regió.

- D. Finalment s'han establert algunes hipòtesis extremes sobre les condicions de formació dels filons i s'han discutit algunes idees genètiques. Els autors pensen que la idea d'un bombeig sísmic en zona de fractura, per a explicar l'origen de les solucions mineralitzants, pot ajustar-se millor al cas estudiat ací, encara que la seva aplicació estricta presenta certes dificultats.

AGRAÏMENTS

Els autors agraeixen la col·laboració de N. Guilhaumou durant la realització de gran nombre de determinacions microtermomètriques, fetes al Laboratoire de Géologie de l'E. N.S. de París. Així mateix agraim als professors J.C. Touray (U. d'Orléans) i P.F. Santanach, J.M. Fontboté i J. Carreras (U. de Barcelona), la lectura crítica del text i la discussió dels resultats. Les anàlisis químiques han estat realitzades al Servei d'Anàlisis químiques de la Fac. de Geologia (U. de Barcelona).

Aquest treball es troba emmarcat dintre dels programes d'AJUT A LA INVESTIGACIÓ 1981 i 1982 - Universitat de Barcelona, i dels AJUTS A LA RECERCA 1981 i 1982 de la C.I.R.I.T. - Generalitat de Catalunya.

BIBLIOGRAFIA

- AUTRAN, A.; FONTEILLES, M. y G. GUITARD, 1970. - "Relations entre les intrusions de granitoïdes l'anatexie et le métamorphisme régional considérées principalement du point de vue du rôle de l'eau: cas de la chaîne hercynienne des Pyrénées Orientales". *Bull. Soc. géol. Fr.* (7), 12: 673-731.
- AYORA, C. 1978. - "Inclusiones fluidas en material filoniano del Valle de Ribes, Pirineos Orientales". *Acta Geológica Hisp.*, 13, (5): 163-169.
- BURNHAM, C.W. 1967. - "Hydrothermal fluids at the magmatic stage". En Barnes, H.L. (Ed.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Holt, Rinehart & Winston, Inc. Nova York.
- CASAS, J. M., 1982. - "Pseudo-two-girdles c-axis fabric patterns in a quartz-feldspar mylonite (Costabona granodiorite, Canigó massif)". *Acta. Geol. Hisp.* 17 (3): 151-157.
- CRAWFORD, M.L.; KRAUS, D.S. i HOLLISTER, L. S. 1979. - "Petrologic and fluid inclusion study of calc-silicate rocks, Prince Rupert, British Columbia." *American Journal of Science*, 9: 1135-1159.
- GRATIER, J.P. 1982. - "Approche expérimentale et naturelle de la déformation des roches par dissolution cristallisation avec transfert de matière". *Bull. Mineral.* 105: 291-300.
- GROMES, N. 1980. - "Bayerischer Phahl". In H. Behr; W. Enger i N. Franke (Eds.): "Guide to excursion Münchberger Gneismasse und Bayerischer Wald". Int. Conf. on the effect of deformation on rocks, pp. 73-80. Göttingen.
- GUITARD, G. 1970. - "Le métamorphisme hercynien mésozonal et les gneiss ocellés du massif du Canigou (Pyrénées Orientales)". *Mém. Bur. Rech. géol. min.*, 63, 353 p. Orléans.
- GUITARD, G. i P. LAFITTE, 1958. - "Les calcaires métamorphiques et les skarns du Pic de Costabone". *Sc. Terre*, 6: 57-136.
- HOLLANG, H.D. 1967. - "Gangue minerals in hydrothermal deposits". In Barnes, H.L. (Ed.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Holt, Rinehart & Winston, Inc. N. York.
- HURTIG, E. OELSNER, CHR. 1977. - "Heat flow, temperature distribution and geothermal models in Europe: some tectonic implications". In A. M. Jessop (Ed.): "Heat flow and Geodynamics". *Tectonophysics*, 41, (1-3): 147-156.
- PHILLIPS, W.J. 1972. - "Hydraulic fracturing and mineralization". *Journal Geol. Soc. London*. 128: 337-359.
- POTTER, R.W. 1977. - "Pressure corrections for fluid-inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl-H₂O". *Journal Research U.S. Geological Survey*, 5, (5): 603-607.
- POTY, B.; LEROY, J. i JACHIMOWICZ, L. 1976. - "Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca". *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 99: 182-186.
- ROEDDER, E. 1958. - "Technique for the extraction and partial chemical analysis of fluid-filled inclusions from minerals". *Econ. Geol.* 53: 235-269.
- ROEDDER, E. 1972. - "Composition of fluid inclusions". *U.S. Geol. Surv., Prof. Paper*, 440-JJ.
- SIBSON, R.H.; Mc MOORE, J. y A.H. RANKIN, 1975. - "Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism". *J. Geol. Soc. London*, 131: 653-659.
- WEILL, D. F. i FYFE, W.S. 1964. - "The solubility of quartz in H₂O in the range 1000-4000 bars and 400-550°C". *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 28: 1243-1255.

Rebut, 19 novembre 1982