

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
FORMES D'US I CRITERIS D'EFFECTIVITAT EN CONJUNTS DEMODE 1 I MODE 2  
Robert Sala i Ramos  
ISBN:978-84-691-1888-7 /DL: T-348-2008

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
FACULTAT DE LLETRES  
DEPARTAMENT D'HISTÒRIA I GEOGRAFIA

FORMES D'ÚS  
I CRITERIS D'EFFECTIVITAT  
EN CONJUNTS DE MODE 1 I MODE 2

ANÀLISI DE LES DEFORMACIONS PER ÚS DELS INSTRUMENTS  
LÍTICS DEL PLISTOCÈ INFERIOR (TD6) I MITJÀ (TG11) DE LA  
SIERRA DE ATAPUERCA

ROBERT SALA I RAMOS

TARRAGONA, SETEMBRE DE 1997

*Memòria que presenta Robert Sala i Ramos  
per optar al grau de Doctor.  
Ha esta dirigida pel Dr. Eudald Carbonell i Roure,  
professor titular de Prehistòria  
de la Universitat Rovira i Virgili.*

## ÍNDIX

INTRODUCCIÓ .....	15
<i>Lògica Analítica Conceptual.</i>	
<i>Projecte general d'arqueologia contextual .....</i>	15
<i>La mecànica i les hipòtesis d'interpretació físico-químiques .....</i>	17
<i>Anàlisi de les deformacions per ús en conjunts tècnics arcaics .....</i>	18
<i>L'objecte d'estudi. Proposta metodològica nova</i>	
<i>i hipòtesi de caracterització dels Modes 1 i 2 per les formes d'ús .....</i>	20
ESTUDI METODOLÒGIC	
RECONSTRUCCIÓ DELS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ .....	23
CAPÍTOL I	
REOLOGIA I MICROSCÒPIA ELECTRÒNICA. MÈTODES D'ESTUDI	
EN LA RECONSTRUCCIÓ DEL PROCÉS DE DEFORMACIÓ.....	25
<i>Aproximació metodològica i tècnica. Nivell analític.....</i>	25
<i>Fenòmens de deformació morfològica, química i cristal·logràfica .....</i>	26
<i>Model reològic de les deformacions .....</i>	29
<i>Procés experimental .....</i>	34
CAPÍTOL II	
EL PROCÉS D'ESFORÇ/DEFORMACIÓ I LES CATEGORIES QUE EL DEFINEIXEN .....	35
<i>Dissipació intercristal·lina .....</i>	37
<i>Dissipació intracristal·lina .....</i>	39
<i>Deformació dels dipòsits .....</i>	42
CAPÍTOL III	
CARACTERITZACIÓ MECÀNICA DE LES ROQUES DEL REGISTRE D'ATAPUERCA .....	47
<i>Assajos previs al nostre estudi.....</i>	48
<i>Assaig de resistència al rebot .....</i>	50
<i>Assajos d'Ones longitudinals. "Ones P". .....</i>	52
<i>Prova de microindentació dinàmica per escleròmetre .....</i>	53
<i>Prova de microindentació de Vickers .....</i>	54
<i>Avaluació dels resultats .....</i>	58



CAPÍTOL IV	
DEFORMACIÓ DELS OBJECTES EN FUNCIÓ DE LES ACCIONS DESENVOLUPADES .....	63
<i>Escorxar i esquarterar. Tallar biomassa animal</i> .....	65
<i>Característiques del dipòsit</i> .....	74
<i>Procés de deformació durant l'activitat</i> .....	76
<i>Intervenció sobre os</i> .....	84
<i>Intervenció sobre banya de cèrvid</i> .....	100
<i>Transformació de la pell</i> .....	113
<i>Transformació de la fusta</i> .....	127
<i>Sega de vegetals herbacis</i> .....	144
CAPÍTOL V	
DESENVOLUPAMENT EN PROFUNDITAT DE LES DEFORMACIONS .....	167
L'ÚS DELS OBJECTES LÍTICS A LA SIERRA DE ATAPUERCA .....	173
CAPÍTOL VI	
EL PLISTOCÈ INFERIOR I MITJÀ DE LA SIERRA DE ATAPUERCA .....	175
<i>Els conjunts arqueològics de la Sierra de Atapuerca</i> .....	176
<i>L'estratigrafia i les datacions</i> .....	177
<i>Evolució humana</i> .....	181
<i>La indústria lítica</i> .....	182
<i>Els registres de TD6 i TG11</i> .....	184
CAPÍTOL VII	
FORMÉS D'ÚS DEL MODE 2: TG11 .....	187
<i>El conjunt arqueològic</i> .....	187
<i>La nostra mostra</i> .....	189
<i>Incidència dels processos diagenètics</i> .....	191
<i>Anàlisi microscòpica de la morfotècnia</i> .....	191
<i>Models d'ús</i> .....	196
CAPÍTOL VIII	
UN REGISTRE DE MODE 2: TD6 .....	211
<i>El conjunt arqueològic</i> .....	211
<i>La mostra</i> .....	212
<i>Incidència dels processos diagenètics</i> .....	212
<i>Formes d'ús</i> .....	212
<i>Les accions enregistrades</i> .....	216
<i>Models d'ús</i> .....	219
BIBLIOGRAFIA .....	227

FORMES D'ÚS  
I CRITERIS D'EFFECTIVITAT  
EN CONJUNTS DE MODE 1 I MODE 2

Anàlisi de les deformacions per ús  
dels instruments lítics  
del Plistocè Inferior (TD6) i Mitjà (TG11)  
de la Sierra de Atapuerca

Robert Sala i Ramos

## INTRODUCCIÓ

LÒGICA ANALÍTICA CONCEPTUAL.

PROJECTE GENERAL D'ARQUEOLOGIA CONTEXTUAL

La Lògica Analítica és un cos metodològic i tècnic estructurat per primer cop l'any 1981 i publicat el 1983 (Carbonell *et al.* 1983) destinat a l'obtenció i sistematització de les dades de l'arqueologia del Plistocè per trencar la inèrcia d'una arqueologia empírica i subjectiva i arribar a una arqueologia inferencial que generes models de comportament humà, que es retroalimentes i no només s'autoconfirmes. Malgrat el seu interès holístic, es va aplicar durant sis anys a l'anàlisi de la tecnologia lítica desenvolupada per les poblacions arcaiques.

Recentment, s'ha fet un esforç d'ampliació i actualització (Carbonell *et al.* 1992) dedicat especialment a la sistematització i jerarquització dels conceptes necessaris per a la modelització del comportament humà.

Aquesta metodologia posa èmfasi en dos fets: l'analític i la jerarquització i sistematització conceptual. L'analítica conté una possible limitació: en el cas que ens interessa, que és l'estudi de les deformacions microscòpiques. És molt diferent el resultat i la capacitat d'inferència segons quin sigui el rang d'anàlisi: macroscòpic, microscòpic i dins d'aquest últim, segons la capacitat d'aproximació de l'aparell usat, es poden crear unes categories o variables o unes altres; allò que per un pot ser la discontinuïtat d'una mateixa variable, per l'altre es tractaria de variables i realitats diferenciables. En aquest sentit, la metodologia que desenvolupem està entrant en els *infracamps*, aquells camps del registre arqueològic de menor dimensió però carregats d'informació que ens permeten fer inferències i obtenir noves dades, que de cap altra manera es poden aconseguir: Canvis microscòpics en la composició del sediment, restes molt trinxades d'ossos i d'altres elements, de mida microscòpica, testimonis de les activitats i de l'organització del treball humà no utilitzats fins fa poc.

La jerarquització i sistematització de conceptes i variables són bàsiques en qualsevol procés analític. Jerarquització informativa i inferencial de les variables de més baix nivell; jerarquització de les associacions de variables o objectes; jerarquització dels

conceptes explicatius dels processos antròpics que van des de la *Unitat Operativa Tècnica*, com ent més bàsic d'actuació fins al *Sistema Operatiu Tècnic*, passant pel *Tema Operatiu Tècnic* i la *Cadena Operativa Tècnica*. Aquests són els conceptes del nivell de la *Sistemàtica* i que organitzen les associacions. En un nivell superior a ells tenim els conceptes *explicatius* que estan concebuts per a qualificar els anteriors: *multiplicitat, variabilitat, homogeneïtat, identitat, uniformitat, versatilitat, singularitat* i el propi de *jerarquia* (Carbonell *et al.* *ibid.*:19-23). A la base de tot hi ha, però, la categoria de conceptes *constructius* que qualifiquen els objectes individuals i són els clàssics (Carbonell *et al.* 1983): Bn, BN1G, BP, BN2G.

Tant la introducció dels infracamps com la sistematització descrita suava fan que, el que en inici era un Sistema d'Anàlisi de la tecnologia, ara sigui una metodologia que permet d'analitzar, categoritzar i construir models explicatius de l'actuació antròpica a nivell local i regional: *Matrius Morfogenètiques i Matrius de Mobilitat*. Aquestes dues construccions ens permeten de sintetitzar la informació d'un Centre d'Intervenció (Carbonell & Mora, 1985) i inferir el comportament i el registre dels altres centres de la regió, de forma que es pugui conèixer les pautes de moviment regional dels paleopobladors.

Aquest és el nivell d'arqueologia contextual que pot assolir la investigació del període plistocè: el context ecològic i el context de totes les activitats materials d'aquells grups: «la xarxa d'associacions i contrastos» que «defineixen l'objecte» (Hodder, 1988:167). D'aquesta forma es podrà valorar cada una de les activitats per la interrelació amb les altres en el benentès que les activitats de caire social es poden enregistrar de forma excepcional. L'altra característica important de l'arqueologia contextual és el trencament de l'arqueologia com a disciplina autosuficient. No ja en el nivell tècnic, que havia estat entès i acceptat, sinó també en el nivell teòric, en fer-se necessàries les teories de les disciplines que també intervenen en el coneixement de la realitat passada: ecologia, física, biologia... que intervenen no només en la recollida de dades com propugnava la *interdisciplinarietat* sinó sobretot en la sistematització i discussió de les dades, associacions i hipòtesis. Les disciplines clàssiques cada cop són més insuficients per atacar els objectius de coneixement actuals, coneixements que han estat adjectivats com de frontera: el propi objecte del coneixement transgredeix els límits d'una sola disciplina; això ja no és interdisciplinar, que adjectiva una actuació i una metodologia, sinó *transdisciplinar*, que es refereix al nivell ontològic, epistemològic i teòric. (AA. DD.,1990).

De fet, l'arqueologia contextual no és altra cosa que una transcripció arqueològica dels conceptes marxistes de «contradicció» i d'«interrelació dels objectes i dels subjectes de la història». En el marc en què ens trobàvem, en què tots festejàvem el positivisme és, tanmateix, d'importància cabdal l'aportació de Hodder. Perquè es pretenia descobrir les regularitats del comportament humà mentre que explicar una relació d'objectes per llur context es separa tant de l'empirisme, que els tractava aïlladament, com del positivisme, que rebutjava la particularitat històrica.

Per sobre de tot, s'ha d'entendre que la realitat és l'actuació de l'organització i decisió de grups humans, per tant, l'epistemologia bàsica a emprar és la pròpia de la *Història*: la *lògica històrica*, el *materialisme històric* i la *dialèctica*. Epistemologia llunyana del positivisme de les ciències físiques i biològiques. L'aparell de la demostració històrica és, *per se*, diferent i la regularització i generalització que han estat tan buscades en arqueologia no poden ser mantingudes: el comportament humà és generalitzable només a una certa escala que no és explicativa de moltes realitats històriques; per naturalesa es tracta de comportament variable i particular: diversos historiadors de l'ar-



queologia (Dunnell, 1982: 521; Trigger, 1992:326) enfasitzen que evolucionisme i ecologisme, positivisme en definitiva, van ser presos de les ciències biològiques però no havien estat conformats per entendre la complexitat i diversitat de la Història.

Els límits de l'arqueologia plistocena per a molts ja els hem assenyalat: el context es limita al conjunt d'activitats materials interrelacionades entre elles i amb el medi. En aquest treball, transgredim l'àmbit estricte de la relació home-medi per entrar en el de les construccions antròpiques de caire diacrònic. Els sistemes Tècnics de Producció són el que ens interessin. Mitjançant l'anàlisi de les «formes d'ús» proposem una hipòtesi per a la caracterització dels sistemes tècnics més arcaics; Mode 1 i Mode 2, i llur concepció dels instruments.

En aquest context epistemològic i teòric desenvolupem el nostre treball sobre les deformacions microscòpiques. Trencant una pràctica exclusivament arqueològica o discretament interdisciplinària per entrar en la transdisciplinarietat, no a nivell de construcció hipotètica de comportament general, com formulàvem abans sinó a nivell d'obtenció de dades. No es tracta, però, d'interdisciplinarietat, perquè, encara que sigui a nivell tècnic, per proposar les hipòtesis explicatives sobre la formació de les deformacions, s'imbriquen les teories i metodologies de l'arqueologia i de la reologia.

#### LA MECÀNICA I LES HIPÒTESIS D'INTERPRETACIÓ FÍSICO-QUÍMIQUES

Molts estudis implícitament i d'altres, pocs, explícitament, observen les alteracions dels objectes lítics com a superficials, és a dir, entenen que estan produïts per processos mecànics i amb això descarten el seu desenvolupament en profunditat. Semenov (1964) a través de l'observació amb l'estereomicroscopi va establir alguns processos mecànics a partir d'un procediment experimental i empíric que va esdevenir la base de l'estudi dels anomenats «desgastos». La manca d'una base teòrica ben desenvolupada va ser un desavantatge per a la resta de treballs fets posteriorment. Malgrat tot, s'entenia que els canvis descrits en la micromorfologia de l'eina s'han produït per abrasió que els agents externs com la pols ambiental o els fragments de material que es desprenen en fracturar-se la vora dels objectes utilitzats causaven en la superfície. Posteriorment al treball experimental de Keeley (1980), introdueix el concepte de poliment que sumat a les característiques descrites per Semenov ens han proporcionat la informació que esdevé la base per a tots els estudis realitzats posteriorment.

Keeley (1980) va ser el primer en sistematitzar l'estudi dels desgastos tot introduint l'experimentació sistemàtica a través dels estudis amb microscòpia òptica que són molt més acurats. Va proposar el concepte de micropolit no contemplat, ni per Semenov ni per tota l'escola moderna que treballa a baixos augments. Ara bé, sempre sota una interpretació mecànica dels processos de canvi descrits. Aquesta metodologia ha estat una de les més àmpliament utilitzades.

Witthoft va suggerir que en el treball de cereals els dipòsits «... *seems always to be the result of friction against opal, and it results from frictional fusion of flint and dehydration and fusion of opal to flint surfaces*». Witthoft, 1957: 387-388. Aquesta dissolució és la que portava a la formació d'un dipòsit de silici amorf en la superfície de l'instrument. El procés depenia, principalment, de la temperatura i la fricció. Així, va ser el primer que fora d'allò considerat estrictament metodologia de l'anàlisi de desgastos, va proposar que els processos químics poden ser els responsables de les deformacions dels objectes lítics utilitzats.

Anderson (1981) va prendre la proposta de Witthoff's i la va ampliar amb nombrosos experiments tot proposant una més complexa hipòtesi mecànica i química de la formació dels desgastos. Les variables que coincideixen en la formació d'un gel amorf de silici són, segons el seu criteri, les següents: una certa resistència de l'estructura global, alguns components minerals específics, els components de silici amorf que formen els vegetals, el gel col·loidal, alguns àcids, condicions àcides i l'efecte de l'aigua i de la temperatura. Les anàlisis microscòpiques revelaven l'existència de partícules (fitòlits) en el dipòsit de silici que s'havia format.

Mansur (1980, 1983a, 1983b) va afegir a aquesta hipòtesi l'experimentació en el poliment de la pell. Posteriorment s'han dut a terme nombroses recerques (Masson, 1982; Meeks *et al.* 1982; Unger-Hamilton, 1984; Levi-Sala, 1993 i Yamada, 1993) amb resultats que han contradit o limitat de gran manera aquesta tesis del canvi químic. Per una altra banda, treballs duts a terme per Knutsson (1988a i b) afegeixen noves dades de manera que els canvis poden ser interpretats com a processos físico-químics, i el que és més important, porten a una interpretació tot utilitzant models d'ús de la mecànica de roques. Recentment, Hurcombe (1992) ha adoptat el punt de vista d'Anderson i especialment de Mansur, tot fixant-se en la modificació plàstica de les superfícies de les eines d'obsidiana. Ella discuteix el significat dels dipòsits i aplica els criteris de Mansur per distingir estries. Algunes de les seves conclusions es redefiniran aquí.

L'estudi que presentem aquí es pot incloure entre aquests arguments contradictoris i pretén redirigir-los amb més dades que confirmen que en el procés de treball d'un objecte lític s'involucren processos tant mecànics com químics. En aquest sentit, en un treball anterior (Sala, 1993) vam proposar un model d'interpretació basat en la reologia.

#### ANÀLISI DE LES DEFORMACIONS PER ÚS EN CONJUNTS TÈCNICS ARCAICS

Com hem indicat, aquest estudi té com a darrera finalitat la construcció d'una hipòtesi caracteritzadora del Mode 1 i del Mode 2, basada en les dades que ofereix l'anàlisi de les formes d'ús. No és el primer estudi microscòpic que es fa d'aquests sistemes tècnics. Tanmateix hi ha pocs conjunts de Plístocè inferior i mitjà en què s'hagi analitzat el desgast de les eines lítiques. Hi ha treballs de tesi doctoral (Pant, 1979; Keeley, 1980) i algun estudi publicat durant els anys vuitanta (Oakley, Andrews *et al.*, 1977; Keeley and Toth, 1981; Pant, 1989; Keeley, 1993), dels quals la majoria són la versió impresa de tesis anteriors. Recentment, no hi ha hagut publicacions que facin referència a aquests períodes més arcaics, excepte algun exotisme que es correspon, també, a la versió d'un treball acadèmic (Hou, 1995), i d'altres tesis encara no publicades (Ollé, 1996; Vergès, 1996). En conjunt, excepte els treballs que els dos darrers autors citats han dedicat a Atapuerca, es tracta d'estudis inconnexos en el temps i amb una perspectiva molt puntual que no afecta estrictament el coneixement del comportament tècnic de les primitives poblacions humanes.

Aquests períodes han estat considerats molt problemàtics per les complicacions que comporten en la selecció del material, en l'estat que presenta, en la conservació dels desgastos i, segons Beyriès (Beyriès, 1989), també els problemes derivats de la diferència en la complexió que influeix en els resultats de l'experimentació.

El darrer problema proposat és del tipus que nosaltres pensem que s'ha de resoldre amb assajos de simulació mecànica en els quals poguem controlar les autèntiques variables que dirigeixen la deformació dels objectes lítics: pressió, temperatura, fricció.

Les altres depenen d'excavacions modernes en les que s'hagi tractat el registre més acuradament per eliminar problemes afegits però, sobretot, tenir en compte que el comportament dels homínids d'aquests períodes està molt marcat per la variabilitat sincrònica i hi ha una forta diferència en el grau d'ús entre jaciments. Només cal veure el treball de Keeley (1980) per adonar-se'n de quin és el problema real. Tot i que el 20.1% de reconstrucció d'ús a Clacton és un valor baix, el 6.1% de Swanscombe o el 9.6% a Hoxne són realment molt reduïts. La metodologia usada en tots és la mateixa i les mostres són normalment àmplies (excepte la de Swanscombe). Per tant, no es tracte d'un problema de mostreig. A Trinchera Galería (Sierra de Atapuerca), nosaltres hem descrit ús en el 66.7% dels objectes analitzats. També és cert que n'hi ha molts de perduts per la diagènesi del sílex neogen, la qual pot haver afectat especialment els objectes de format petit i els que havien rebut una configuració i un tractament més secundari. Tanmateix, són els mateixos problemes que presenten els altres investigadors, per tant, són comuns, universals i, en aquest sentit i, fins a cert punt, obviabls en la comparació.

Considerem que aquest alt percentatge està relacionat amb la forma d'ocupació del centre d'intervenció. Les cavitats càrstiques amb activitat secundària i cadenes de producció fragmentada tenen un índex d'ús més alt del que és corrent en jaciments amb intervenció forta. De totes maneres, la diferència principal pot ser l'aplicació de la microscòpia electrònica, la qual, amb un camp de treball més profund i una resolució millor de la superfície dels objectes, permet una definició més fina de les micromorfologies. Si no és així no s'explica els graus d'ús assenyalats a TD6, un conjunt d'intervenció primària i intensa, amb un grau d'ús important

Per les condicions esmentades no és difícil concloure que les dades de què disposem per als registres de Plistocè inferior i mitjà són molt reduïdes, inconnexes, i fragmentàries. D'aquesta manera no és possible formar-nos un bon quadre de la utilització dels instruments lítics durant aquests períodes. Per tant, la finalitat del nostre estudi, que és donar un significat més profund a les denominacions de Mode 1 i Mode 2, basades fins ara en qüestions, moltes vegades, purament morfològiques, és difícil de completar-la amb una informació fragmentària d'altres conjunts de la mateixa cronologia o similar, ja sigui a Europa o fora del subcontinent.

El registre d'Atapuerca dóna, en aquest context, la possibilitat de tractar uns conjunts diversos i que abarquen una cronologia àmplia amb una, relativament, bona conservació per obtenir la informació necessària per a fer una proposta inicial entorn la categorització dels dos Modes de producció tècnica. Els jaciments d'Atapuerca presenten nivells de Plistocè inferior i Plistocè mitjà amb una intervenció antròpica important i complexa en alguns punts i puntual i secundària en d'altres. Per tant, la variabilitat ens ha de permetre de definir millor les estratègies diferencials dels dos Modes esmentats.

A Europa s'està reprenent la investigació d'aquests períodes i, en un temps relativament curt, comptem que es podrà donar una visió més àmplia i ferma de la que ara proposarem, basada en el registre d'Atapuerca i referències al conjunt de Monte Poggiolo (cedides per L. Longo, A. Ollé i J.M. Vergès).

ESTUDI METODOLÒGIC  
RECONSTRUCCIÓ DELS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ





# CAPÍTOL I

## REOLOGIA I MICROSCÒPIA ELECTRÒNICA MÈTODES D'ESTUDI EN LA RECONSTRUCCIÓ DEL PROCÉS DE DEFORMACIÓ

En el present treball s'entén que durant l'ús d'un instrument existeix una interacció entre el pròpi instrument i l'objecte treballat. Donat, per tant, que es tracta de dues realitats amb característiques i components físiques, hem buscat un model que respongui a aquesta concepció. Aquest model l'hem trobat en la reologia. La reologia és la ciència que estudia i modelitza les deformacions descrites en medis deformables. Un d'aquests medis el constitueixen les roques de l'escorça terrestre, per tant, l'anàlisi de la seva deformació provocada per esforços és un dels àmbits en els quals s'aplica la reologia (Atkinson, 1987; Barnes, Hutton *et al.*, 1989).

### APROXIMACIÓ METODOLÒGICA I TÈCNICA. NIVELL ANALÍTIC

Alguns dels procediments tècnics utilitzats en aquest treball ja han estat descrits i introduïts per altres autors. Ara bé, més que la recerca de tècniques que siguin aptes per experimentacions específiques, volem sistematitzar un mètode analític holístic més complex. Per això a diferència de Masson (1982) i Meeks *et al.* (1982) que només van utilitzar una tècnica de contrastació: la Difracció de Raigs X i el seccionament de les eines, respectivament, nosaltres n'utilitzarem més d'una.

Hem decidit no utilitzar la Microscòpia per Reflexió degut a la seva baixa capacitat d'augment.

L'estudi que presentem s'ha basat en les observacions al Microscopi Electrònic de Rastreig (MER), que ens permet arribar a àmbits molt petits i que ha estat utilitzat per a l'anàlisi morfològica de les superfícies dels instruments així com de les seccions fetes en les zones deformades. Acoplat al microscopi, hem utilitzat la Microanàlisi per Sonda d'Electrons (MASE), que ens proporciona l'anàlisi de la roca fresca i de les deformacions produïdes.

Així doncs, aquestes han estat les dues tècniques emprades exclusivament en treball que ara es presenta. Tanmateix, les tècniques que esmentem a continuació s'han utilitzat per a l'establiment dels processos de deformació, és a dir, per a la contrastació de l'existència de dipòsits produïts per dissolució de la xarxa cristal·lina.

Per caracteritzar l'estructura cristal·logràfica dels nous dipòsits formats per motiu del treball humà, s'ha utilitzat la Difracció per Raigs X i la Microespectroscopia d'Absorció d'Infrarojos per Transformada de Fourier. Amb el mateix propòsit que amb l'anàlisi cristal·logràfica, hem aplicat la Microespectroscopia Raman per Raigs Laser que ha permès contrastar les dues tècniques esmentades anteriorment.

Aquest treball sobre els processos de deformació produïts en les superfícies líti-ques té l'objectiu d'establir un nou mètode d'estudi més analític i menys descriptiu i morfològic. En general veurem que l'anàlisi no està adreçada a establir les categories de desgast clàssiques. Ben al contrari, aquestes categories han esdevingut característiques d'una analítica de més rang. Les diferències en la morfologia, la composició química i l'estructura cristal·logràfica de les diferents àrees de l'instrument han estat analitzades sense una categorització a priori de morfologies específiques. Per tant les categories analítiques resultants han de determinar criteris d'ús derivats de criteris mecànics i reològics.

#### FENÒMENS DE DEFORMACIÓ MORFOLÒGICA, QUÍMICA I CRISTAL·LOGRÀFICA

La descripció que fem a continuació, està adreçada principalment a demostrar que hi ha moltes deformacions plàstiques sobreimposades així com modificacions químiques.

##### *Anàlisi morfològica*

L'anàlisi morfològica al MER permet la identificació de fractures mecàniques i zones de modificació de textura. Les possibilitats del MER, contrast topogràfic i contrast de nombre atòmic, que analitzen els electrons retrodispersats, donen una millor caracterització de la micromorfologia de la peça. Aquesta anàlisi ha de ser dividida en dues capes: l'estricta superfície de la peça i la capa inferior. Ambdues donen resultats complementaris.

##### — Procés de deformació de la superfície

Les primeres modificacions que apareixen en la superfície de les eines utilitzades durant un temps relativament curt (un quart d'hora o menys) són depressions lineals, solcs o estries. Estan associades amb fractures triangulars, connectades als solcs pels costats i interpretades com a tascons. La topografia de la superfície es manté irregular i la textura igual que en la roca fresca. Aquestes dues modificacions estan associades al material remogut i tradicionalment han estat descrites com indicadors de la direcció de l'ús (Semenov, 1964; Keeley, 1980). En la mateixa eina, es pot trobar més d'un grup d'estries. Aquests grups es distingeixen per un canvi en la direcció dels solcs en cada grup.



Figura 1.

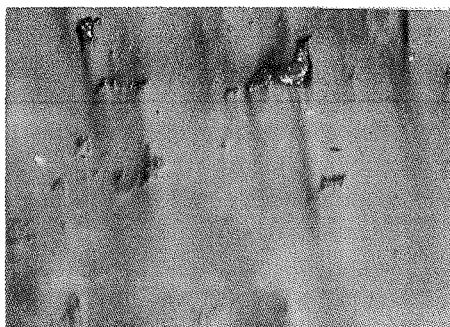


Figura 2.

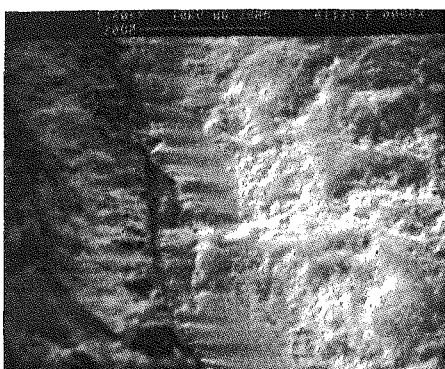


Figura 3.

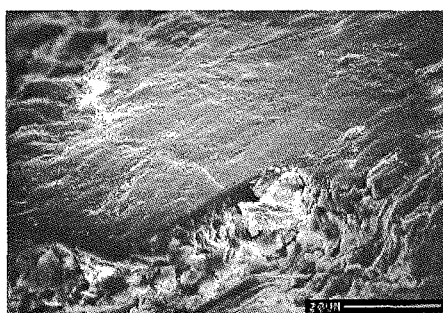


Figura 4.

Quan l'ús continua, la superfície de l'eina pateix una modificació de la textura. Hi ha una homogeneïtzació de la superfície i apareix la pèrdua forta de matèria i la compressió. En el primer cas es produeixen grans àrees planes a partir de la interacció de múltiples estries i la textura és, aproximadament, la mateixa que en la roca fresca.

El segon tipus de deformació mostra una textura diferent que la roca fresca. El gra de la roca presenta una textura suau, que fa la superfície homogènia i compacta (fig.1). En profunditat, aquestes compressions són també visibles. Les partícules es deformen i la seva morfologia és molt diferent del gra de la part interna de la peça. L'espai entre els grans de la roca es redueix i existeix la gradació en la compressió. Prop de la superfície pràcticament no es poden veure partícules individuals, mentre que progressivament són menys suaus i deformades en profunditat. El gruix de les zones de compressió oscil·la entre 17.4  $\mu\text{m}$  i 25.20  $\mu\text{m}$ .

En les eines utilitzades durant un temps perllongat (una hora o més) apareix un relleu fàcilment identificable, pla o convex, homogeni, compactat i sense partícules que s'hi puguin identificar. Els anomenem dipòsits (fig. 2). En funció de l'acció, aquestes superfícies planes són petites i disperses mentre que en d'altres casos ocupen grans extensions (fins 2000  $\mu\text{m}$  d'amplitud) tot cobrint tant la superfície fresca com la deformada.

En la secció, els dipòsits tenen una base ondulada, un relleu irregular natural o prèviament modificat. La topografia de la superfície algunes vegades reflexa el relleu preexistent (fig. 3). La base s'adapta a la microtopografia i omple les irregularitats:

estries i compressions són recobertes. En els dipòsits més desenvolupats la característica principal és la important modificació de la textura fresca i del relleu: la superfície del dipòsit és molt diferent de la fresca.

En secció, les zones de dipòsit i les de compressió es poden distingir pel gruix. La compressió arriba a una profunditat d'uns 20  $\mu\text{m}$ , mentre que els dipòsits rarament són més profunds de 5  $\mu\text{m}$  o 7  $\mu\text{m}$  (fig. 4). A més, es poden distingir per la textura, que en els dipòsits és especialment homogènia.

En la superfície dels dipòsits, són freqüents les fractures irregulars. Són sinuoses i la micromorfologia original de la roca es pot veure bé en la part més profunda. Aquestes fractures no segueixen la direcció de l'ús i no es poden confondre amb estriacions.

En altres casos, es descriuen tipus de deformacions diferents. La modificació d'os en os és el que produeix les deformacions més desenvolupades. Si l'ús de l'eina es manté durant un temps llarg (més d'una hora) la primera generació de dipòsit apareix deformada. Com en l'estructura fresca, el dipòsit està parcialment remogut, comprimit i redipositat. En aquest cas s'observen estries, tascons, compressions i diferents nivells de dipòsit desenvolupat sobre nivells previs amb la mateixa connexió entre ells. Les fractures irregulars també es descriuen en la superfície dels dipòsits sense tenir cap relació amb la direcció de l'ús (fig. 5).

#### *Modificacions químiques*

Els polits, les zones de compressió i els dipòsits han estat estudiats en detall a partir de diverses tècniques per tal de caracteritzar la seva estructura cristal·logràfica i la seva composició química. L'anàlisi cristal·logràfica a través de la Difracció de Raigs X, la Microespectroscòpia d'Infrarojos i la Microespectroscòpia Raman per Làser mostren una estructura cristal·lina igual a la de la roca fresca de les eines analitzades: en tots els casos es tracta de quars. En les dolomies silicificades, la MSE mostra que l'estructura està composta només per silici.

Per una altra banda, l'anàlisi per MSE evidencia l'existència de modificacions químiques en les superfícies deformades. Aquestes modificacions químiques estan agrupades en dues classes: un grup que comprén estructures que inclouen elements foranis, i un altre grup que només conté modificacions en la superfície.

#### — Inclusió d'elements foranis

La nostra experimentació i també la d'altres autors ( Witthoft, 1957; Anderson, 1981; Christensen & Walter, 1991; Christensen, 1995) ha demostrat que, en certs casos, en l'interior dels dipòsits s'hi registra matèria procedent de l'objecte treballat.

#### — Modificacions químiques de la superfície

Les estries i els poliments no presenten diferències químiques respecte a les roques fresques, ni en eines de sílex ni en eines de dolomia silicificada.

En les zones amb compressió es detecten algunes alteracions químiques, especialment a les dolomies silicificades. La composició principal és formada per minerals



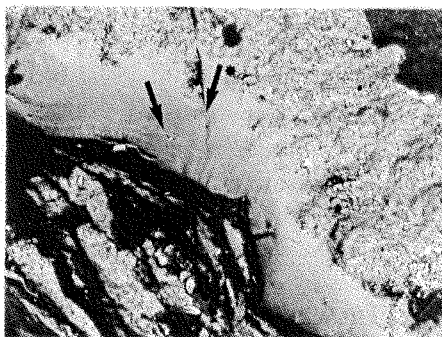


Figura 5.

del tipus òpal i bicarbonat de calci i magnesi. El calci, el magnesi i el silici són els elements que principalment componen aquesta roca. En les zones deformades i en els dipòsits neofornats només s'hi troba silici. S'han replicat les anàlisis per contrastar aquestes dades i donen els mateixos resultats.

#### MODEL REOLÒGIC DE LES DEFORMACIONS

Les modificacions que acabem de descriure no es poden interpretar mitjançant un model exclusivament mecànic i abrasiu dels desgastos en els objectes lítics. S'ha de buscar un model que contempli també processos de modificació química i, sobretot, la ruptura de l'estructura intracristal·lina de la roca. Aquest nou model ha de ser capaç d'integrar totes les característiques descrites, tot elaborant una explicació coherent. Per aquesta raó presentem el model reològic. Tal com s'ha esmentat anteriorment, la reologia descriu, proposa models i sistematitza les deformacions en medis deformables. Per tal de definir aquestes deformacions s'estableixen dos camps principals com a resposta de l'eina a l'esforç produït per l'ús: l'elàstic i el plàstic.

En el cas de les deformacions per ús, s'han descrit dos comportaments principals de la xarxa cristal·logràfica: un dissipa l'esforç mitjançant la ruptura fràgil i la compressió. Ambdues deformacions afecten l'espai intercristal·lí. El segon comportament es produeix amb esforços especialment desenvolupats i comporta la modificació dels enllaços intracristal·lins. Per tant, el doble comportament es manté, però la dissipació intercristal·lina no es correspon totalment amb el camp elàstic: no hi ha una aplicació exacta i mimètica de les fases establertes per la reologia per als cossos elàstico-plàstics. L'ordenació que plantegem nosaltres s'adiu més amb la realitat de les deformacions per ús i ens proporciona una informació més acurada dels fenòmens.

Les deformacions corresponents a la fase de dissipació intercristal·lina es poden interpretar de la següent manera. En els cristalls que pateixen poc esforç, hi ha una migració dels defectes de la xarxa causada pels augments de la pressió i de la temperatura (Bard, 1985). Aquests habitualment estan concentrats en les vores del gra de la roca, provocant la seva disgregació. Això significa que els grans no estan deformats internament, encara que siguin expulsats de la superfície. La morfologia d'aquests fragments depèn, normalment, de l'estructura cristal·logràfica. Donat que el quarz pertany al grup cristal·logràfic trigonal (JCPDS, 1991) els fragments seran de forma triangular.

Així, en els primers estadis, es generen depressions triangulars. Si l'esforç continua, es formaran més fragments i profundes estries que seran la característica principal.

El segon grau de deformació correspon a les compressions. S'ha de considerar una deformació plàstica, però en la nostra ordenació s'inclou dins la dissipació intercrystal·lina: és la modificació per plasticitat de l'espai intercrystal·lí, que queda reduït per adaptar-se a l'esforç. Els minerals com el quars es poden deformar plàsticament sota condicions d'esforç i temperatura constants (Wenk, 1994).

L'extensió i la profunditat d'aquests trets dependrà del material treballat, de la pressió exercida pel treballador i del temps d'ús. El procés s'interpreta com una adaptació permanent de la xarxa cristal·logràfica a l'esforç.

Si l'esforç aplicat a la xarxa és més gran del que el gra pot absorbir, l'estructura cristal·logràfica es trenca tot originant el que hem anomenat dissipació intracrystal·lina. Mentre dura l'esforç, amb el material dissolt, resta un fluid entre les dues superfícies interactuants. Quan l'esforç s'atura el fluid pot esdevenir un nou dipòsit. La deposició té lloc a les zones marginals de les àrees deformades i cobreix la superfície de les estries i de la compressió. Més avall, en aquest mateix capítol descriurem d'altres hipòtesis de generació de dipòsits que poden ser aplicables als fenòmens citats en la superfície dels objectes lítics.

Tradicionalment, s'han definit com a dipòsits silicatats (Witthoft, 1967). En la nostra anàlisi no hem trobat diferències cristal·logràfiques amb la roca fresca. Així, doncs, hem d'interpretar que les dues parts tenen la mateixa estructura cristal·logràfica, encara que la mida i morfologia del gra sigui diferent.

Aquestes dues fases (dissipació intercrystal·lina i intracrystal·lina) poden ser interpretats com un cicle pel progressiu increment de la pressió i de la temperatura. Així, utilitzant l'objecte d'ús varies vegades o durant un període llarg de temps, aquest cicle es repeteix. De fet, hem descrit algunes deformacions plàstiques dels dipòsits causades per l'esforç després de la seva formació. Es poden observar corrosions en els dipòsits (fig. 6) que han patit una deformació intensa però parcial. Aquests tipus de corrosions del dipòsit van ser definides per Mansur (1983) com a estries en «forma de falguera». Nosaltres ho interpretem com una deformació d'origen químic i no d'una abrasió.

Algunes de les nostres hipòtesis contradiuen el que s'havia establert prèviament. Primer, A. Masson (Masson, 1982) va aplicar la Difracció de Raigs X per caracteritzar el dipòsit interpretat com una formació de silici amorf. El seu estudi conclou que la composició de la superfície deformada i la de la roca fresca és la mateixa: el quars. No es detecta material amorf. Tot i que nosaltres estem d'acord amb aquesta conclusió, la tècnica utilitzada per A. Masson no és adequada per l'anàlisi d'una capa prima ja que penetra i analitza la roca sota la deformació. La Microespectroscòpia Raman de Làser i la Microespectroscòpia d'Infrarojos són més adequades.

A partir del que s'ha dit, confirmem l'existència de deformacions i alteracions químiques provocades per l'ús en la superfície de les eines lítiques. Les dues es caracteritzen morfològicament mitjançant el MER, cristal·logràficament i química, la MASE i per les tècniques de Raman i d'Infrarojos.

Des que va ser proposada inicialment, la modificació interna de la xarxa cristal·lina causada per l'ús ha estat interpretada mitjançant diversos models. La major part de la bibliografia (Witthoft, 1967; Anderson, 1981; Mansur, 1983) ha tendit a proposar un sistema de fusió i refredament de la sílice com a mecanisme d'origen bàsicament químic per explicar la presència de dipòsits sobrecrescuts al damunt de la superfície

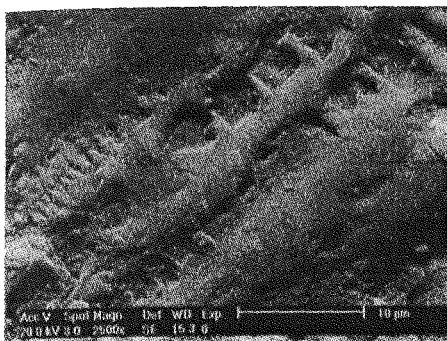


Figura 6.

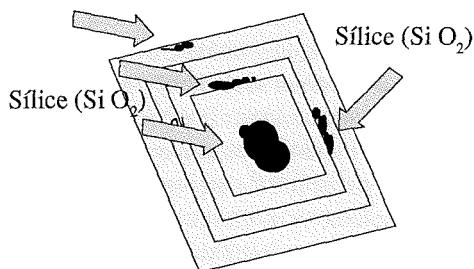


Figura 7.

de la roca a causa de l'esforç de l'ús. Nosaltres mateixos el plantejàvem com a procés bàsic de deformació de les roques (Sala, 1993) combinat amb els esforços purament abrasius, que, ningú ha posat en dubte que es donen com a formes extenses d'alteració per ús. Tanmateix no és l'únic procés que cal contemplar per explicar la formació dels dipòsits esmentats.

Pel cas de la dolomia silicificada, hem plantejat que l'esforç provoca la migració cap a la superfície de l'element més inestable de la xarxa cristal·lina: la sílice. Aquest mineral, segons l'esquema que ens ha proposat É. Jautée de la Univeristé de Lyon 1, no està realment integrada en els cristalls de dolomia sinó que es troba en agregats formats únicament per sílice en àrees concretes a l'interior del cristall de carbonat (fig.7), però en cap moment no hi ha enllaços atòmics entre el Si i el Ca com passa en d'altres varietats de dolomia, en les quals l'element estrany està integrat en l'estructura atòmica. Com que no està integrat a nivell atòmic, el Si és fàcilment expulsable per qualsevol medi. Entre les formes d'expulsió hi ha l'esforç, el qual, mitjançant el grau de temperatura i pressió necessaris, provocarà la migració cap a la superfície de la sílice que, en general, ocupa els punts de defecte de la xarxa cristal·lina. A la superfície, amb el canvi de condicions, en contacte amb l'exterior, la sílice pot redipositar-se. Evidentment, com que el diferencial d'energia es dona entre els punts d'esforç i la xarxa immediata, els defectes migraran en direcció a aquests punts de màxima tensió i el dipòsit s'hi produirà en les zones marginals. Aquesta és la hipòtesi que oferim per a les concentracions de silici descrites en la superfície dels objectes de dolomia.

Totes les roques tendeixen a presentar defectes o impureses com les que hem descrit per la dolomia, i el sílex, el quars i la quarsita no en són excepcions. Per aquesta raó, a part de la dissolució, que considerem fora de dubte, es pot donar un procés similar al que pateix la dolomia. Així, el diferencial d'energia entre la superfície i l'interior, causat per l'esforç, podria provocar la migració cap a la superfície dels defectes, inclusions o impureses de la xarxa cristal·lina silicatada. Aquests defectes tendrien a recristal·litzar en les àrees marginals de l'esforç, allà on l'energia torna a ser baixa.

En la dolomia, els defectes descrits són mineralògicament diferents de l'estructura principal. Però, per a d'altres roques no ha de ser forçosament així, sinó que es pot tractar d'inclusions del mateix mineral que presentin una discontinuïtat marcada i una organització també diferencial. Aquests dos seran els requisits bàsics perquè es promogui una expulsió de la inclusió cap a l'exterior, com a forma de dissipació de l'esforç de caire intracristal·lí. Evidentment, com més defectes contingui una roca més

podrà deformar-se seguint aquest procés. I la seva detecció en superfície, com s'ha pogut fer per a la dolomia, depèn del mineral i elements químics que les formin. Si els minerals són d'espècies distintes, el contrast amb la xarxa principal, en superfície i a l'escala habitual d'anàlisi, serà clar i marcat. En canvi si el mineral és igualment silicatat, el contrast serà difícil de captar pels mitjans que hem usat habitualment. La seva detecció requeriria, aleshores, mitjans més capaços.

En el cas de roques amb pocs defectes, la deformació no pot seguir exactament el procés descrit. És aleshores quan la dissipació s'ha de donar per d'altres medis, com la dissolució o una reestructuració cristal·lina. Bard (1985) ho entén així quan argumenta «...la probabilidad termodinámica de ver crecer un cristal por un mecanismo de adición de materia será tanto mayor cuanto más estén provistas de imperfecciones y de "relieves" sus superficies» (Bard, 1985:18). Les hipòtesis alternatives de la deformació i recristal·lització han estat plantejades per aquest mateix autor com a mecanismes comuns en la resposta de les roques a l'esforç:

«*Los cristales resultantes de la recristalización de una misma especie han podido crecer por sobrecristalización de algunos bordes de grano cuando el sistema ha estado sometido a esfuerzos diferenciales generadores de disoluciones bajo presión...el recalentamiento a  $2/3$  de  $T_{\text{fusión}}$  de los materiales que habían sido previamente deformados... se traduce por una difusión de las imperfecciones de la red (en particular las dislocaciones) y por la migración de éstas hacia la superficie de los granos.*» (Bard, 1985: 42. Les cursives són a l'original).

Previament, aquest autor ha definit el que s'entén per «dissolucions per pressió», un concepte que ens és altament informatiu sobre una de les hipòtesis d'origen de les deformacions:

«En las rocas metamórficas sometidas a aumentos de temperatura y presión, esta materia puede proceder de la disolución de fases sólidas cuando estas rocas son comprimidas de forma anisótropa...cuando existe en éstas unos estados de "estrés diferencial". [s'anomena] "pressure-solution" a este proceso de disolución y transporte de los productos de una reacción de destrucción de los minerales sometidos a presiones diferenciales. Estos productos pueden ser transportados de una a otra región del sistema litológico considerado... y pueden precipitar para dar nuevas fases minerales. Igualmente, también pueden permanecer in situ y determinar unos sobrecrecimientos cristalinos sincinemáticos ("presión de sobrecrecimiento") sobre el borde de los granos comprimidos.» (Bard, 1985:28).

En general, aquest autor entén que es donen

«\*las rupturas mecánicas frías (frágiles) de origen esencialment tectónico que tienen por efecto fragmentar los minerales o desplazar sus bordes;  
 «\*las deformaciones mecánicas calientes (dúctiles, plásticas) que provocan distorsiones de la red y que están acompañadas por la migración de sus imperfecciones puntuales y lineales (dislocaciones)» (Bard, 1985:33; les cursives són a l'original).



Per tant, s'està proposant un model del mateix tipus del que hem assenyalat nosaltres amb termes de deformacions intercrystal·lines i intracrystal·lines. És interessant que es clarifica el terme de *ruptura mecànica*, és a dir, queda clar, com nosaltres assenyalarem en la formulació de les categories analítiques de l'esforç (Capítol III) i en la descripció dels objectes experimentals (Capítol IV), que es tracta de ruptura, d'un esforç considerable que no es pot alliberar mitjançant deformació de la xarxa.

S'ha de considerar una tercera hipòtesi per a la reorganització cristal·lina d'una roca sotmesa a esforç. Bard descriu una «búsqueda de equilibrio por disminución de la energía total de superficie» (1985: 12-13). L'energia de superfície existeix en tots els grans però un sistema tendeix a l'estabilitat mitjançant la unió dels grans més petits per formar-ne de més grans els únics que subsistiran, amb una energia de superfície total molt menor. En una roca com el sílex aquest fenomen es produïria a expenses dels criptocristalls. L'únic que atura aquesta evolució lenta, segons Bard (1985:13) és l'oposició que creen les partícules de la matriu en una roca com la quarsita. La matriu indueix, per les seves característiques mineralògiques i texturals, una «energia lliure elàstica» que impideix el creixement indicat. Recordem, per tot el que ha estat exposat i, sobretot, pel resultat de la nostra experimentació (Capítol IV), que les roques amb més impureses segueixen un comportament més plàstic i poden resistir millor un esforç sense arribar a la ruptura. La nostra experimentació també indica que, els dipòsits es deformen més en superfície que la pròpia estructura fresca. Per tant, en la superfície d'una quarsita que, segons indiquem (Capítol III) segueix un comportament molt fràgil, l'existència d'un dipòsit provoca una resistència major en el sentit que és més deformable i més resistent a la ruptura.

En definitiva, cal valorar bé les característiques de les roques i analitzar-ne bé les deformacions patides per crear un model de resistència i deformació. Aquest model ha de contemplar el fet que les variables que intervenen en el procés són, tal com assenyalava Bard (1985: 11): les condicions de temperatura i pressió, les heterogeneïtats químiques, la presència de fluïds intersticials, la porositat del medi (la qual facilitarà la migració que es descriu en dues de les hipòtesis), la composició química de les fases implicades i el temps.

S'observa, doncs, que el sistema d'esforç i deformació que genera l'ús d'un objecte lític és múltiple i complex i no pot ésser captat per un estudi únicament morfològic, sinó que s'ha de produir una anàlisi detallada de les deformacions per aconseguir un coneixement més aproximat de l'esforç. Hem vist com ni un model únicament mecànic ni únicament químic són vàlids per expressar-ho, i inclús, dins del model reològic, hi ha diferents hipòtesis per explicar la deformació intracrystal·lina.

Enlloc d'oferir problemes, les hipòtesis alternatives permeten avaluar molt millor la variabilitat que ja hem observat en les superfícies dels objectes. Per exemple, els que hem anomenat dipòsits plans podrien correspondre millor amb una recristal·lització per agregació de cristalls per formar-ne un de major i més estable. La morfologia d'aquests dipòsits és molt similar a la dels cristalls de quarsita. En canvi, els dipòsits convexes podrien respondre a models lligats amb la migració de defectes o la dissolució dels cristalls de la superfície, amb un grau diferencial segons l'esforç.

## PROCÉS EXPERIMENTAL

Plantejat en aquests termes és evident, com ja hem assenyalat prèviament (Sala, 1993), que l'experimentació replicativa clàssica de l'anàlisi de desgastos no és suficient per a la comprensió de les deformacions. És necessari un marc més ampli en el que s'introdueixin simulacions mecàniques que permetin controlar les variables de l'esforç d'una manera eficaç, quantitativa i realment vàlida. En aquest esquema, la replicació de les activitats plistocèniques té un altre caire i ha de ser la forma de traduir les conclusions de la simulació a la realitat de les deformacions que es descriuen en els objectes arqueològics. Les deformacions causades per la simulació mecànica han de ser relacionades amb les que provoca l'ús i explicar-les, però es tractarà de valors diferents, que caldrà adaptar. Per tant, no es pot passar amb la simulació únicament, de la mateixa manera que la replicació tampoc és suficient. La diferència essencial rau en què la primera ens permetrà, a mig i llarg termini, predir el comportament de les roques, tant en la simulació com en el registre arqueològic. I això, la replicació no ha aconseguit mai, ni és possible que ho aconsegueixi, perquè no s'hi controlen les variables adequadament.

A partir d'aquest punt passem a presentar els assajos i experimentacions que s'han realitzat i els resultats que se n'han obtingut amb la finalitat de caracteritzar els processos d'esforç en els objectes arqueològics.

## CAPÍTOL II

### EL PROCÉS D'ESFORÇ / DEFORMACIÓ I LES CATEGORIES QUE EL DEFINEIXEN

L'esforç i la seva conseqüència físico-química, les deformacions, han de ser reduïts a categories lògiques, bàsiques, fàcils de tractar i, sobre tot, informatives de l'esforç i del grau de deformació soferts pels objectes d'ús. Proposem aquí de trencar amb la pràctica habitual i generalitzada de denominar les deformacions basant-se en morfologies, en el llenguatge natural i en l'experiència pròpia. Contràriament, les variables que s'usin han de provenir de la formulació del procés de deformació, és a dir, en categories preexistents de la reologia.

Les categories o variables que definim a continuació descriuen tant l'esforç com les deformacions. I també es trobaran referides en el text d'aquest treball senzillament com deformacions. A nivell bàsic es tracta de categories que defineixen una deformació, una modificació física o bé química soferta per una roca a causa de la sol·licitació patida. Però, també, en el sentit que una deformació o associació de deformacions caracteritzen un esforç, aquestes categories també el defineixen.

Es tracta de categories lògiques que provenen de la formulació del procés de deformació tal com es descriu en la reologia de roques. Sobre aquesta base, proposem les categories que representen cada fase del procés d'esforç i en defineixen el grau i l'abast. Així hom presenta les categories individuals agrupades en les fases de l'esforç. Les fases que definim es basen en els comportaments descrits per la reologia: comportament fràgil i plàstic. Tanmateix els hem adaptat per crear les categories de fase de *comportament intercrystal·lí* i *intracrystal·lí* que s'adeqüen a les deformacions causades en els objectes d'ús lítics.

La fase intercrystal·lina és aquella que marca el comportament segons el qual la roca respon mitjançant, principalment, fracturació i pèrdua de matèria. Amb el terme intercrystal·lí definim que l'esforç afecta els lligams entre cristalls i l'espai que els separa. Però la pèrdua de matèria no és l'únic fenomen que es produeix en l'espai intercrystal·lí. També s'hi descriu compressió. És a dir, un comportament plàstic inicial que fa de pont entre la pèrdua de matèria (fase intercrystal·lina pura) i la dissolució o migració (fase intracrystal·lina pura). En crear les fases que ara descrivim, queda inclosa en la primera. Correspon a un fet lògic, si acceptem que la compressió es produeix molt sovint associada a la fracturació en una primera fase de resposta a l'ús.

La deformació, o dissipació, intercrystal·lina, generalment, representa el grau d'esforç més baix, en el qual, els talls actius molt primos sotmesos a pressions fortes responen fracturant-se. Tanmateix, aquestes deformacions s'han descrit, en alguns ca-

sos, per esforços molt superiors, en objectes amb talls roms i que han patit esforços abrasius importants, durant els quals no s'ha deformat únicament la vora, sinó, sobretot, la superfície immediata a la vora (figura 1). Però l'abrasió no s'origina en el tall. En aquests casos s'origina en múltiples punts de la superfície i acaba en una pèrdua de matèria extraordinària, tot deixant una morfologia arrodonida i roma molt característica, l'única per la qual hem reservat el terme de poliment, com a descripció de conjunt. L'abrasió en el conjunt de la vora i la superfície està causada per la circulació lliure, en el sistema de l'esforç, de partícules d'alt poder abrasiu i en grans quantitats. Són, generalment, introduïdes de forma deliberada, com ocre o sorra en el tractament de la pell. El poliment com a tal, però, no el considerem una categoria bàsica. En aquestes morfologies es detecta compressió de la xarxa, estriació molt pronunciada i formació de dipòsit de baixa densitat. Aquestes són les categories reals contingudes dins el que constitueix, com a conjunt, un poliment, és a dir, una pèrdua de matèria de gran magnitud. Indiquem que el poliment, pel que hem descrit, es tracta d'un fenomen complex que abarca deformació intercrystal·lina i, en donar-s'hi dipòsit de baixa densitat, també comprèn deformació intracrystal·lina.

Amb el terme de fase de dissipació intracrystal·lina denominem la deformació que afecta els enllaços atòmics interns del cristall. És a dir, la frontera que se supera, entre la fase intercrystal·lina i aquesta, és la que marca els límits del propi cristall. Aquesta frontera requereix una energia suficient, generalment més alta que la necessària per aconseguir el trencament o compressió intercrystal·lins, amb l'excepció ja descrita. En el capítol precedent hem descrit com durant la fase intracrystal·lina l'esforç genera una energia suficient per endegar:

— un procés de migració de defectes i partícules inestables de l'interior de l'estructura cap a la superfície, a les zones de màxima energia. Posteriorment la recristal·lització d'aquests defectes i compostos inestables en la superfície, en els punts adjacents als de màxim esforç, es duu a terme en un procés d'agregació continu, que està dirigit a aconseguir una estructura més estable, amb menys fissures, vores i cares de cristall, punts que afavoreixen i inicien el procés de deformació.

— la pròpia energia també pot permetre la dissolució puntual o massiva de cristalls de quars que, igualment, recristal·litzarien en la superfície, tot resultant en la mateixa estructura final: dipòsits o recristal·litzacions de diferents característiques. En un treball anterior (Sala, 1993) havíem plantejat que l'origen de la matèria per a recristal·lització estava en deformacions plàstiques prèvies, macles, seguint el que proposava Knutsson (Knutsson, 1988). Aquesta hipòtesi no està convenientment contrastada perquè hi ha problemes per identificar el que nosaltres havíem considerat macles i que d'altres investigadors indiquen més aviat com corrosions (R. Rodríguez, com. pers.). Per tant, el que era un procés de deformació plàstica es contempla com un atac químic. La conseqüència, el dipòsit, és la mateixa perquè ja enteníem, inclús en el treball citat, que la matèria alliberada per ruptura plàstica era dissolta i recristal·litzava. Tanmateix, no descartem totalment la possibilitat de l'existència de casos de ruptura plàstica i macla.

Finalment, aquests dipòsits, de vegades, inclouen partícules captades de la matèria transformada. Com hem assenyalat més amunt, retenim preferentment el ter-



Figura 1.  
(augments inicials 200x)

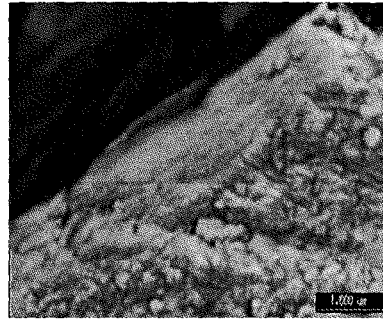


Figura 2.

me de dipòsit per definir les deformacions descrites, per davant del concepte de recristal·lització.

El procés de deformació de l'objecte canvia radicalment a partir d'aquí. En el moment en què es forma un dipòsit en la superfície de la roca, hem de comptar que el límit entre ella i l'estructura fresca original resulta ser un punt molt feble i una discontinuïtat molt marcada. Constituirà, a partir d'aquest moment el pla límit de la deformació. D'una banda, la superfície superior del dipòsit serà més o menys deformada en funció de l'esforç, mentre, generalment, la xarxa original no serà afectada per l'abradió, compressió o corrosió que ataquin el dipòsit. El que sí s'hi produirà, d'altra banda, és una dissolució o migració continuada, si l'esforç ho permet, que formarà noves capes de dipòsit entre la xarxa original i les anteriors, és a dir, subjauran a les primeres (figura 2). Aquest procés crea més discontinuïtats (plans entre les capes) que afavoreixen la deformació perquè limiten la resistència total en formar cossos separats.

A continuació definim ja les categories analítiques de què ens servirem per descriure i caracteritzar aquests processos de deformació en els objectes lítics. És un intent de captar les unitats de modificació i canvi en un continuum sovint difícil de desitriar. Algunes de les categories descrites ja es contemplaven comunament en els estudis de traceologia, però la majoria són introduïdes per nosaltres, fruit de l'aplicació d'un model reològic.

#### DISSIPACIÓ INTERCRISTAL·LINA

Com hem descrit les deformacions que es produeixen en l'espai intercrystal·lí comprenen dos grups de categories: un corresponent a les deformacions de tipus abradisiu i el segon que engloba les de tipus compressiu. Com deformacions abrasives hem definit l'escantell, l'arrasament, els tascons i les estries. En el grup de les deformacions compressives només hi tenim la categoria de compressió. Sovint hi hem considerat l'arrodoniment com una categoria però es tracta d'una categoria descriptiva de la morfologia que presenten els talls fortament comprimits o afectats d'abradió. En aquest sentit usem, de forma descriptiva el terme arrodoniment però no correspon a una categoria analítica de l'esforç.

*Escantell*

Aquesta categoria ja va ser plantejada per Semenov (1961) com una de les que distingien les eines que havien treballat i amb la que era possible de refer-ne parcialment la funció. És un trencament de la vora de dimensions i formes variables, provocat per la pressió sobre el tall. La pressió que el genera pot tenir l'origen tant en el moviment principal de l'esforç com en una component secundària, normalment marcada per la resistència del material treballat que pressiona la vora activa. Diversos autors han intentat de crear-ne un patró morfològic i quantitatiu (Odell, Akoshima) amb la idea d'utilitzar-lo com una de les categories importants a l'hora d'interpretar el conjunt dels desgastos produïts en un instrument. Normalment han estat investigadors que han treballat amb lupes estereoscòpiques en el que s'ha anomenat Escola de Baixos Augments. Tanmateix Keeley (1980, 1993) en fa un ús extens, sempre, però, associat a d'altres categories del desgast. En definitiva, és una de les categories bàsiques que cal estudiar en profunditat a fi que, relacionant-la amb les altres categories, es defineixi millor l'esforç sofert per un objecte d'ús, tal com està duent a terme B. Márquez (en prep). Dos són els problemes més importants que comportaria un excessiu pes de l'escantell en la interpretació, és que són difícils de distingir en una vora retocada i el fet que, en jaciments amb molta pressió sedimentària o amb una certa inestabilitat, els escantells es formen molt fàcilment per pressions diagenètiques.

*Arrasament*

El definim com la fracturació múltiple i profunda d'un cristall o grup de cristalls. Evidentment, afecta només a les roques silícies de cristall gran i diferenciat, com quars i quarsita. És un indicador d'un esforç important en la vora dels cristalls, justament la zona que més pateix en aquest tipus de roca.

*Tascó*

Els tascons els hem definit com una deformació que provoca fractures profundes, triangulars o trapezoïdals, generalment, aliniades en solcs, tot marcant la direcció del moviment o d'una component secundària. Aquestes fractures es produeixen en la superfície, sense necessitat de tenir un origen en la vora i exigeixen una tracció molt forta, similar a la que hem assenyalat en els processos d'abradió intensa de les superfícies. Moltes vegades poden ser definits com el primer pas per a la formació d'una estria.

*Estria*

Com passava amb l'escantell, aquesta categoria és de les més conegudes i fou presentada per Semenov (1961) per la seva gran importància en determinar el moviment de l'esforç. És una fractura linial en la superfície, amb origen, generalment, en un trencament en la vora. Hem assenyalat que pot tenir una primera fase en la qual es genera el que hem anomenat tascó. És la forma més corrent d'abradió.

### Compressió

La compressió és una forma de deformació plàstica intercrystal·lina que consisteix en l'eliminació dels espais intercrystal·lins per poder fer front a la sol·licitació. L'energia provocada permet d'eliminar les partícules febles i inestables de l'espai intercrystal·lí i de compactar els cristalls de la xarxa. Els cristalls de quars no sofreixen deformació interna, només en llur relació espacial. La tendència general, que ja hem descrit (*cf. supra* Capítol 1) és de crear agregats el màxim de grans i evitar els espais intersticials que tendeixen a ser els punts on es generen les deformacions. La tendència a l'agregació la veurem també en el següent apartat dedicat a les deformacions intracrystal·lines.

### DISSIPACIÓ INTRACRISTAL·LINA

L'hem definida com la deformació amb la qual, a fi de dissipar l'esforç, la roca tendeix a generar capes de quars de neoformació en la superfície mitjançant o bé:

- el trencament dels enllaços interns dels cristalls i formar un fluïd;
- la formació de capes de quars superficials a expenses dels microcristalls de la xarxa a través de l'agregació per possibilitar una major resistència;
- afavorir la migració de compostos inestables en l'estructura en direcció a la superfície. Les categories incloses en aquesta fase també estan subdividides en grups. El primer abarca les modificacions inicials que indiquen l'origen del procés de generació del dipòsit: macles i corrosió de la xarxa original. Aquestes deformacions sovint no es descriuen perquè subjauen als dipòsits que les obliteren. El segon grup correspon als dipòsits de baixa densitat, amb aquesta única categoria. I el darrer grup comprèn els dipòsits d'alta densitat, amb dues categories marcades per la densitat, el volum de matèria implicada i la forma de construcció: dipòsit convex i dipòsit pla. Inclou també la categoria de les partícules incloses, que no és pròpiament una deformació, sinó una conseqüència local d'ella; i la fracturació del dipòsit que n'és, realment, una alteració.

### Macla

En una roca la macla està definida per una orientació simètrica de dos cristalls. Però, en un metall, és una deformació de l'estructura cristal·lina per la qual una zona prèn una orientació diferent. Pot estar causada per esforç mecànic o tèrmic. Aquí hem considerat macla, és a dir una orientació diferencial, simètrica dels cristalls d'una àrea, causada per deformació, quan s'han descrit depressions profundes, sovint repetides i alliniades i de morfologia diversa. Hem considerat que estan provocades per ruptura plàstica dels enllaços interns dels cristalls i hi hem associat un esforç alt. Tanmateix, com s'ha assenyalat en d'altres punts, hi ha seriosos dubtes que es tracti de macles reals i no el solc d'una corrosió. Tot i que mantenim considerem molt seriosament aquesta segona possibilitat, i esperant poder-ho resoldre en un futur, mitjançant un model teòric, hem assenyalat els punts on considerem que la interpretació més versemblant és la de macla. De macles n'hem definides de superficials i de més profundes. És una categoria descrita molt sovint en l'obsidiana.

### *Corrosió*

Hem denominat corrosió a l'atac químic que pateix una roca per efecte de l'esforç i que es tradueix en una pèrdua de matèria i en la formació d'una superfície molt irregular, plena de petites depressions en els punts on s'ha produït l'atac químic. En no produir-se generalment per abrasió, les depressions no estan ordenades ni mostren patrons d'organització ni creen una superfície morfològicament nova. Tanmateix, la corrosió pot associar-se als solcs d'abrasió. Aleshores sí que està clarament organitzada i respon a un patró clar.

### *Dipòsit de baixa densitat*

El dipòsit de baixa densitat és descrit com el producte d'una deformació de baix abast, la qual ha generat una energia mínima que mobilitza poca quantitat de matèria (figura 3). S'hi observa, a part de la densitat reduïda, un relleu molt baix respecte a la zona circumdant no deformada. Molt sovint ha estat descrit associat a compressió, com un seu desenvolupament que és funció del temps i de l'augment del valor de les condicions d'esforç, en el que hem descrit com dipòsit acumulatiu o progressiu i que, molt sovint, es forma de manera clara com agregats de matèria recristal·litzada. En una superfície comprimida apareixen punts intersticials amb recristal·litzacions molt reduïdes. Malgrat tot això, no és un pas necessari per als dipòsits d'alta densitat, sinó que tradueix un esforç menor, ja sigui perquè l'esforç total és així o perquè es localitza en una zona marginal o lateral a l'esforç principal. Quan l'agregació de matèria per esforços baixos arriba a produir una massa considerable segueix essent possible d'identificar l'esforç baix acumulatiu per la manca d'homogeneïtat i de regularitat d'aquesta massa.

### *Dipòsit d'alta densitat*

Dipòsit que trasllueix un esforç considerable, amb una pujada brusca molt notable de les condicions de la superfície de la roca i que provoca una forta interacció amb la matèria. La conseqüència és la remobilització d'una gran quantitat de material o, com hem apuntat al capítol precedent l'agregació ràpida de nombrosos criptocristalls en un o diversos cristalls de grans dimensions. Com diem, aquest procés és ràpid i s'inicia en un plaç de temps curt, com indica l'experimentació, no necessita l'acumulació gradual o la puja constant de les condicions, sinó que es tracta d'un procés sobtat. En funció de les condicions, del tipus d'interacció sobre la roca, i també en funció del comportament de la pròpia roca enfront d'un esforç que afecta un volum gran, es produeixen dipòsits convexos o plans. Els primers es generen en accions que provoquen l'esforç d'una línia o una superfície, amb l'alliberament de matèria i energia en elles. En canvi, la interacció i esforç simultani d'un volum en tres dimensions, en el cas d'un trífedre, semitrfedre o piràmide usats de manera que més d'una aresta entra en interacció amb la matèria transformada perquè s'hi introdueix profundament, originen una resposta diferent de la roca que tendeix a una deformació de cristalls més grans (figura 4). Si no acceptéssim aquest procés s'hauria d'explicar que per un esforç com el que produeix el dipòsit convex, la superfície és plana. El dipòsit pla s'ha detectat en materials molt durs, com l'os, i no és efecte només de la quantitat de ma-



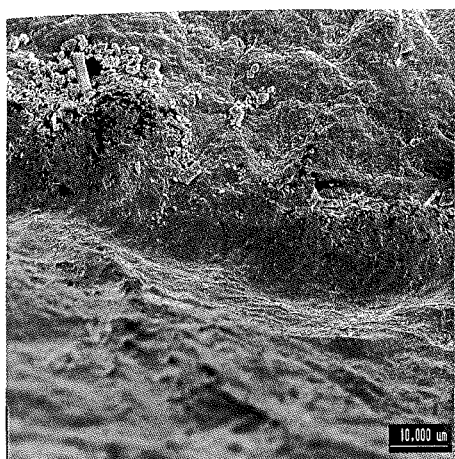


Figura 3.

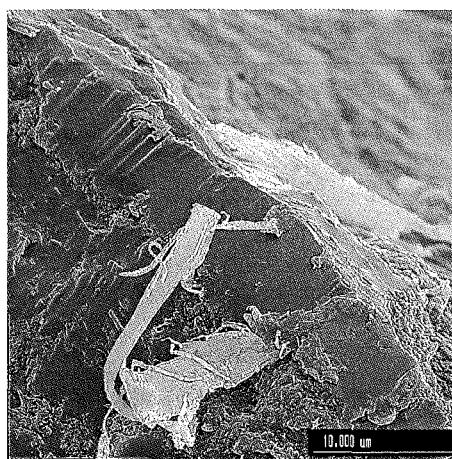


Figura 4.

tèria en moviment, perquè en accions com la sega de cereals, però, sobretot, en la de vegetals verds, la quantitat de matèria remobilitzada és major i produeix dipòsits convexos, especialment voluminosos. En canvi, en l'os, primer provoca una fracturació extraordinària i, en segon lloc, un dipòsit molt pla que s'extén àmpliament, com si la forta pressió li hagués configurat la superfície i l'hagués extès de forma extraordinària. És evident que aquesta pressió no es dona en els dipòsits convexos que creixen molt en volum. A més de la distinció del volum, també plantejarem una diferenciació per la continuïtat del volum. Així, els dipòsits poden ser de volum únic o botrioïdals. Això no fa una distinció generativa i de primer ordre com la que acabem de descriure, sinó que descriu una diferenciació lateral exclusivament dels dipòsits convexos, els plans presenten tots un monovolum. Per tant és una categorització qualitativa no una categoria pròpiament dita. Recordem que tot cau dins de la categoria dels dipòsits d'alta densitat. Una altra cosa és que en els mapes de deformació es tradueixi la varietat lateral amb símbols propis, els quals, com veiem, no es corresponen sempre a categories d'esforç.

#### *Partícules incloses*

Les hem considerat una categoria pròpia per la informació que ens ofereixen, de primer ordre, especialment en el camp metodològic. Tanmateix, a nivell estricte, no més es tracta d'una característica més dels dipòsits, plantejada com òbvia per un model de deformacions que inclogui la formació de dipòsit a partir d'una dissolució de matèria, la qual pot captar partícules forànies. Ha tingut un paper important en la determinació del procés a nivell metodològic i l'hem mantinguda com criteri descriptiu. Malgrat tot, no sempre es detecten partícules incloses, per tant, és una informació important, quan es produeix. Nosaltres les hem determinades per la presència de calci i fòsfor en l'interior del dipòsit d'un objecte que havia transformat os (Sala, 1993). El mateix es mostra en una caracterització per RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) de les deformacions per ús d'objectes experimentals emprats per transformar l'os, on, a més, s'aconsegueix determinar que:

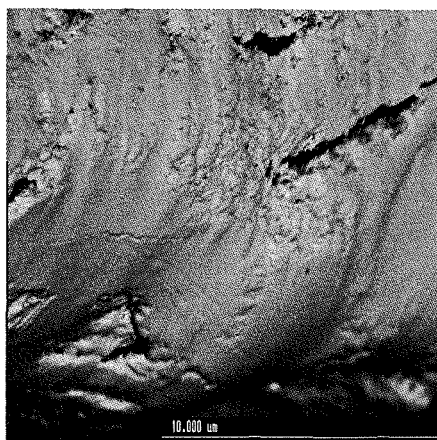


Figura 5.

*«Le dépôt de calcium et de phosphore sur la surface du silex est d'une épaisseur de 400 nanomètres environ. La variation du plateau de silicium entre la surface polie et celle non utilisée témoigne de l'absence de silicium dans la zone polie, constatation déjà effectuée lors des analyses au MEB». (Christensen and Walter, 1990: 154).*

#### *Fracturació del dipòsit*

La fracturació del dipòsit ha estat assenyalada en diverses ocasions per diversos investigadors. Plisson (1985) cita E. Moss (Moss, 1983) com única investigadora que havia assenyalat el que ell defineix com «...*craquelures à sa surface, perpendiculaires à l'axe de travail... visibles après rainurage ou raclage (d'os)...*» (Plisson, 1985: 55). Aquestes fractures Plisson les associa al treball de l'os, i, com només està interessat en la caracterització morfològica, no s'atura a donar-ne una explicació. Per a nosaltres es tracta de fracturacions produïdes pel canvi de volum durant el refredament posterior a la formació del dipòsit: un moment en què el nou cristall, en solidificar, es fa més fràgil i menys plàstic, provocant l'esquerdament (figura 5). Aquesta categoria no està, contràriament al que assenyalen els autors citats, restringida a la transformació de l'os. L'única restricció que s'ha pogut constatar és que aquestes fractures no es produeixen en dipòsits molt convexos, els quals hem interpretat producte d'un sistema ric en aigua. Per tant, la presència d'aigua inhibeix la formació de les fractures en dipòsits com els provocats per la sega de vegetals. Al contrari, l'alta presència en els dipòsits generats en les accions sobre os indicaria baixa quantitat d'aigua en aquests esforços, almenys relativament.

#### DEFORMACIÓ DELS DIPÒSITS

Després de la instal·lació dels dipòsits i mentre dura l'esforç, els cristalls neoformats de quars són deformats seguint patrons relatius a la matèria transformada i a

l'acció. Aquesta deformació, generalment, és més important que la soferta per l'estructura cristal·lina original. Un comportament termodinàmic diferencial, l'existència d'una clara discontinuïtat entre el dipòsit i l'estructura subjacent, tot afavoreix una major inestabilitat d'aquests dipòsits. O, vist des d'un altre prisma, una major capacitat de deformació i, per tant, una major resistència sense patir ruptures fortes. Mentrestant, l'estructura cristal·lina es pot seguir deformant i creant noves capes de dipòsit que s'instal·len entre la xarxa original i les anteriors recristal·litzacions: un creixament en la superfície inferior dels dipòsits i una deformació en la superior. Els dipòsits pateixen un cicle de deformació similar al que hem vist per a la xarxa original, amb les mateixes fases abrasiva, compressiva i corrosiva-química.

#### — Abrasiva

##### *Escantell*

Té les mateixes característiques que s'han definit en la fase inicial de deformació. Només hem d'afegir que cal distingir entre un escantell recobert per dipòsit i un que es sobreposa a un dipòsit. Això ens serveix per interpretar la duració de la sol·licitació i la combinació d'esforços.

##### *Tascons*

Deformació dels dipòsits com a depressions triangulars aliniades i que constitueixen un inici d'abrasió més profunda que té tendència a acabar com estries.

##### *Estries*

Abrasió lineal del dipòsit, que indica clarament la direcció de l'esforç principal. La base, generalment, és llisa, com el dipòsit; d'altres vegades apareix irregular, com l'estructura fresca. Això ha comportat l'establiment de tipologies d'estries (Mansur-Françòme, 1980; Mansur, 1982; Mansur, 1983), en les quals s'han inclòs diverses deformacions que no corresponen a estries, com les corrosions en solc, denominades estries en forma de falguera: «*fern-like striation*». Aquestes tipologies no aconsegueixen d'establir les causes reals de les morfologies i, sobretot, no descriuen les etapes de deformació, només es fixen en la morfologia.

#### — Compressiva

##### *Compressió*

Allà on es produeix, la deformació compressiva sobre els dipòsits és molt evident, més que sobre l'estructura fresca. S'hi desenvolupa de forma diferencial. Com que el dipòsit és una xarxa homogènia, sense les fissures i discontinuïtats de la cristal·lografia original, no permet la compactació que hem descrit anteriorment. En canvi, per les

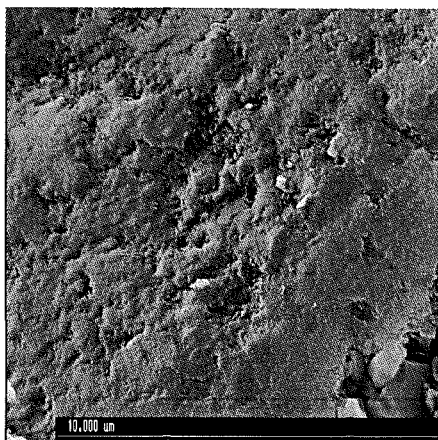


Figura 6.

morfologies ondulades que presenta, interpretem que es demostra que desenvolupa un comportament molt més plàstic. La seva homogeneïtat, tendència que descrivíem en la formació dels agregats, sembla que realment aconsegueix de jugar el seu paper de fer l'estructura més resistent a l'esforç, és a dir més deformable, amb menys ruptures. La compressió, doncs, es demostra per una ondulació de freqüència i longitud d'ona diferenciats segons els casos (figura 5). L'eix de l'ondulació segueix el sentit del moviment. Per la deformació més forta es dona en les zones deprimides, en què el material és desplaçat cap a les vores. En les convexitats s'acumula el material desplaçat, tot accentuant-ne més el volum. No provoca trencaments, sinó que és un comportament que els evita.

#### *Macla*

Igual que hem descrit per a la xarxa original, en els dipòsits es donen canvis de direcció de la cristallització. Es mantenen les mateixes precaucions que ja hem assenyalat.

— Corrosiva

#### *Corrosió*

La corrosió és, com hem assenyalat, el resultat d'un atac químic que, sobre els dipòsits, és més evident i marcat. Deixa depressions i irregularitats que trenquen de forma molt clara l'homogeneïtat de la superfície del dipòsit. Molt sovint, aquestes depressions han estat considerades àrees no afectades pel poliment, que era qualificat de trama oberta. En un model que contempli els atacs químics és evident que moltes d'aquestes depressions no tenen la morfologia que s'explicaria per fricció: molt sovint tenen els límits molt clars i abruptes, no arrodonits, com correspondria als límits d'un

dipòsit. L'ur morfologia, en canvi, és molt similar als atacs químics provocats per d'altres agents. La corrosió es dona de forma lleu i molt dispersa, la que anomenem corrosió feble. Si s'intensifica l'atac pot arribar a afectar grans àrees del dipòsit en una distribució irregular i desordenada però molt profunda per l'afectació que es demostra en el dipòsit, que, de vegades acaba perdent totes les seves característiques, especialment l'homogeneïtat i uniformitat (figura 6). Finalment, si la corrosió es combina amb una deformació que transllueixi el moviment com la compressió o abrasió, observem una organització en solcs. Moltes vegades la compressió és prou forta per comprimir la matèria del dipòsit creant-hi un atac químic local que acaba amb una irregularitat i una discontinuïtat de l'estructura, en la qual s'observa, al fons la xarxa original: és a dir, destrueix, de forma local, el dipòsit (figura 5). La corrosió s'atura en la discontinuïtat entre el dipòsit i la xarxa fresca. El mateix passa amb l'abrasió, amb l'aggravant que aquesta deformació té més abast, és una fractura, i, per tant, l'atac químic és més fàcil. Com que aprofita l'abrasió o la compressió, en té el mateix repartiment linial. Les tres formes de corrosió les hem distingides en tot moment i en els mapes estan diferenciades perquè indiquen esforços d'abast diferent.

### *Segona capa*

Hem descrit, en parlar de la deformació intracristal·lina, la formació continuada de capes de dipòsit en el substracte de les precedents. Aquest fenomen és difícilment visible, excepte quan es pot practicar una secció com la que es mostra en la figura 2. Tanmateix, en algunes ocasions aquestes noves capes es formen en base al material de les recristal·litzacions prèvies i es dipositen al damunt de les anteriors. Aquest procés té el seu origen, no pas en un esforç rebut per la xarxa cristal·lina original sinó pel dipòsit, que és corroït, atacat químicament i allibera matèria que pot sortir del sistema o reprecipitar. Aquestes noves capes no demanen practicar cap secció, només una anàlisi superficial. Una altra manera de mesurar les successives generacions de dipòsit és mitjançant la fossilització de les deformacions abrasives que prèviament s'han instal·lat al damunt d'un dipòsit. Aquest és el fenomen més freqüent dels que acabem d'esmentar. Tot i això s'han detectat poques vegades.

A més de la definició de les categories, usem qualificatius per avaluar l'abast i la morfologia de cadascuna. Igual que les categories descrites, els qualificatius estan basats en la reologia i tendeixen a la interpretació en termes d'esforç i no morfològics. Alguns dels qualificatius ja han estat presentats en definir les categories de l'esforç.

Aquestes categories són les que, aplicades a l'anàlisi microscòpica, ens han de permetre de reconstruir el procés de deformació dels objectes. I, en última instància, l'ur associació ha de servir per a caracteritzar el procés en funció del moviment o de la matèria transformada.

L'ordre en què les hem definides també es correspon, aproximadament, amb l'esforç creixent necessari per a formar-les. Així, atorgant-los un grau és possible de descriure les zones de major i menor esforç en un objecte. Aquesta distribució de l'esforç, amb l'associació de les deformacions, són els trets bàsics i necessaris per a determinar l'esforç patit. Trencant l'estudi clàssic morfològic i formulant unes categories lògiques basades en un model reològic, físic i no pas empíric de les deformacions és com es podrà millorar el coneixement dels processos d'esforç.

### CAPÍTOL III

## CARACTERITZACIÓ MECÀNICA DE LES ROQUES DEL REGISTRE D'ATAPUERCA

Les roques usades pels homínids a la Sierra de Atapuerca han estat recentment analitzades i sistematitzades des del punt de vista petrogràfic (Mallol, 1997). S'ha descrit la mineralogia i les formacions geològiques en què apareixen a l'entorn dels jaciments. I, parcialment, s'han donat dades sobre llur comportament mecànic. Per una part, ens basem en aquest treball per l'atribució i denominació de les roques que hem utilitzat en la nostra anàlisi. En segon lloc, i més important, hem utilitzat els resultats dels assajos de resistència mecànica realitzats per l'autora com a base per als nostres. Per tant, en aquest capítol s'ampliaran i es contrastaran les dades que s'aporten en el treball citat. En els següents es durà a terme una segona anàlisi, ara microscòpica, per determinar els processos de deformació que pateixen les roques del complex de la Sierra de Atapuerca quan són sotmeses a l'esforç de les activitats antròpiques. Per interpretar la generació de deformacions s'utilitzarà com a base el coneixement adquirit en les proves de simulació mecànica. La simulació mecànica que presentarem és, tanmateix, només inicial, exploratòria, de cara a definir les proves més interessants i necessàries. En el futur s'han d'extendre a les roques que no s'han estudiat aquí. L'assaig mecànic i la replicació d'activitats abans d'encarar l'estudi posterior del registre arqueològic, constitueix, per nosaltres, la successió analítica necessària per establir les bases d'una interpretació més ferma de les deformacions.

En els assajos mecànics duts a terme s'han usat, en aquesta primera aproximació, les roques més representades en el registre lític de la Sierra de Atapuerca: sílex d'edat neògena, sílex d'edat cretàcica, quarsita de la fàcies Utrillas i, puntualment, esquist. Quan aquest treball ja estava en marxa es va identificar una font d'abastament per la quarsita de Barbadillo del Pez, important en l'economia dels paleopobladors del Plistocè mitjà, però que nosaltres no vam poder incloure en la simulació mecànica. Tanmateix, les dues varietats de quarsita tenen una mateixa edat, Càmbric superior, per la qual cosa les podem considerar força similars. En una de les proves, l'anàlisi de la microduresa de les roques, argumentem que no va ser possible de realitzar-la sobre cap tipus de quarsita per raons que adduïm i comentem més endavant. És l'única prova que resitringeix relativament el tipus de mostres que pot ser estudiat. En les altres la selecció ha estat marcada per l'interès general de l'estudi.

## ASSAJOS PREVIS AL NOSTRE ESTUDI

C. Mallo (Mallo, 1997) presenta els resultats de la prova de resistència al xoc (UNE 22-189-85) aplicada a mostres de sílex neògen i quarsita de la fàcies Utrillas i de la prova de resistència al desgast per fregament (UNE 22-183-85). Aquestes proves han estat dutes a terme a la U. P.C. La primera mesura la resistència mitjançant el colpeig amb una bola sobre la superfície de la roca i els resultats ofereixen l'alçada de caiguda necessària per aconseguir la fractura. El sílex neogen presenta una variança molt forta: de 10 cm. a 60 cm. d'alçada per a un total de quatre mostres i una mitja de 32.5 cm. La quarsita de la fàcies Utrillas, en canvi, es fractura amb un màxim de 35 cm. i un mínim de 20 cm., també sobre quatre mostres i una mitja de 25 cm.: la variança és baixa.

El sílex d'edat neògena, per altra banda, és més resistent a la fractura que la quarsita. La variança remarcada es pot explicar per una gran heterogeneïtat mineralògica del sílex neogen. Contraposat als resultats per la quarsita pemetria concloure que aquesta roca és molt més homogènia. La prova de resistència al desgast per fregament indica un desgast més gran en el sílex d'edat neògena i un índex que es pot considerar zero en la quarsita, ja que entra dins del tram d'error previst per la prova. L'esquist té un valor molt pròxim al del sílex neogen. Aquests resultats indiquen que el sílex neogen és més sensible al desgast que al colpeig i que té un comportament totalment oposat al de la quarsita. El límit de la fractura en la quarsita és més baix, mentre que el sílex neogen permet una deformació més gran prèvia a la ruptura. La resposta d'un sílex neogen a l'esforç consisteix en una deformació plàstica interna i una ruptura difícil, mentre que la quarsita tendeix a alliberar la càrrega mitjançant fractura mecànica.

Taula 1.  
Resistència a la fractura.

Sílex neogen	
Núm. mostra	alçada de fractura
1	25 cm.
2	20 cm.
3	35 cm.
4	20 cm.
Mitja	25 cm.

Quarsita de la fàcies Utrillas	
Núm. mostra	alçada de fractura
1	60 cm.
2	20 cm.
3	40 cm.
4	10 cm.
Mitja	32,5 cm.

Taula 2.  
Resistència al desgast.

<i>Sílex neogen</i>	
<i>Valors inicials</i>	<i>Valors finals</i>
4.23	3.32
4.53	3.63
4.92	3.34
<i>Mitja: 4.56</i>	<i>3.43</i>
<i>Valor del desgast: 1.13 mm</i>	

<i>Quarsita</i>	
<i>Valors inicials</i>	<i>Valors finals</i>
2.84	2.84
2.92	2.91
2.79	2.79
<i>Mitja: 2.85</i>	<i>2.84</i>
<i>Valor del desgast: 0.01 mm</i>	

<i>Esquist</i>	
<i>Valors inicials</i>	<i>Valors finals</i>
7.43	6.30
7.89	6.32
6.42	6.36
<i>Mitja: 7.24</i>	<i>6.32</i>
<i>Valor del desgast: 0.92 mm</i>	

Les proves mecàniques que s'han realitzat per aquest estudi han estat, per una banda, l'assaig de **resistència al rebot** mitjançant el *Martell Schmidt* (escleròmetre) i la **velocitat d'ones "P"** amb l'instrument *d'Ones Sòniques*. Aquestes proves han estat dutes a terme al Laboratorio de Ingeniería Geológica de la Universidad Complutense de Madrid. En segon lloc s'ha realitzat la prova de **resistència a la microindentació de Vickers**, per establir els patrons de microdureza, feta al Departament de Cristal·lització i Mineralogia de la Universitat de Barcelona. Finalment, l'**assaig dinàmic de resistència a l'abradió** mitjançant un *escleròmetre dinàmic* desenvolupat al Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes del Département de Technologie des Surfaces de l'École Centrale de Lyon (CNRS, Lió, França). Cada prova s'ha realitzat sobre mostres diferents però les roques usades han estat quarsita de la fàci-



es Utrillas, sílex d'edat neògena i sílex d'edat cretàica. Aquests assajos, a més de permetre'ns una primera aproximació ràpida a les característiques mecàniques dels materials, ens serveixen per fer-ne una classificació o divisió d'una manera sistemàtica des del punt de vista mecànic.

#### ASSAIG DE RESISTÈNCIA AL REBOT

Aquest assaig mesura els valors de duresa dels materials. Es tracta d'un paràmetre definit com la resistència d'un material a la deformació permanent de la seva superfície. La importància d'aquest paràmetre es troba en què permet el càlcul estimatiu de la resistència a la compressió uniaxial de la roca i alhora poder predir-ne el comportament mecànic a causa d'alguna anomalia observada a simple vista.

El martell de Schmidt consta d'un cilindre metàl·lic, del que sobresurt un èmbol de pistó, i d'una escala graduada de 10 a 100. Per dur a terme l'assaig es posa en contacte l'extrem sobresurtint amb la superfície de la mostra de la qual se'n vol mesurar el rebot i s'efectua una pressió que fa penetrar l'èmbol en el cilindre. Això provoca el rebot d'un martell que està introduït en el cilindre i la intensitat del rebot es reflecteix en l'escala graduada. Normalment és necessari realitzar 10 assajos per cada mostra (I.S.R.M., 1978).

En funció de la densitat seca i del rebot del martell hom proposa una correlació numèrica entre aquests dos paràmetres i la compressió uniaxial de la roca, segons la funció

$$\text{Log } t_c = 0,00088 \cdot R \cdot X_d + 1,01$$

on  $T_c$  = resistència a la compressió simple expressada en MN/m (Mpa);  $R$  = resistència al rebot; i  $x_d$  = densitat seca de la mostra ( $\text{KN/m}^2$ ) (Mpa). A partir del valor de la resistència de compressió simple, pot proposar-se una classificació de la roca en funció de la resistència segons la Taula 3.

Taula 3.

Classificació de roques segons la resistència  
(Jiménez Salas & Alpañez (1975))

Resistència	Tc Mpa
Molt baixa	< 5
Baixa	5-20
Mitjana	20-100
Alta	100-200
Molt alta	> 200

S'han dut a terme 7 determinacions sobre blocs de diferents mesures recollits al camp. Cada una de les determinacions consta d'entre 10 i 15 percussions. S'ha mesurat la resistència al rebot en dues superfícies perpendiculars entre sí a cada bloc per estudiar de quina manera varien els resultats amb l'estat de la superfície eix. La posició del martell ha estat sempre vertical (Fig. 1)

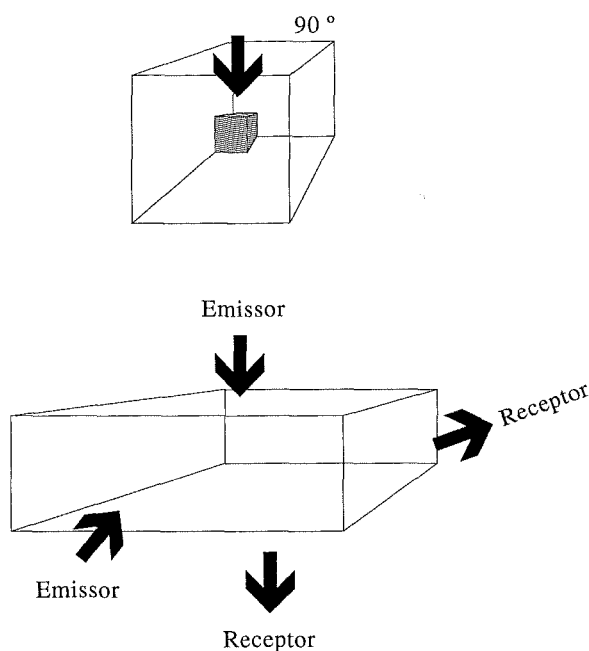


Figura 1.

Els resultats obtinguts d'aquest mostreig s'indiquen en la Taula 4, on es poden veure els valors del rebot i les resistències a la compressió estimades en forma de valors mínims i màxims. També s'hi presenta la classificació de la roca en funció de la resistència.

Taula 4.

Mostres	Rebot				Compressió simple		Resistència
	Superfície 1		Superfície 2		(Mpa)		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
M2 (Sineo)	47	26	43	30	134	37	Mitjana-alta
M3 (Sineo)	48	31	48	34	148	54	Mitjana-alta
M5 (Qta)	46	26	46	44	127	37	Mitjana-alta
M6 (Qta)	39	26	40	29	88	37	Mitjana
SC1 (Sicre)	22	14			33	22	Baixa
Sineo	56	43			180	120	Alta
Qta	21	11	30	17	32	16	Mitjana-baixa

ASSAJOS D'ONES LONGITUDINALS. "ONES P".

Per la medició de la velocitat de propagació de les ones elàstiques longitudinals o "Ones P" es va emprar el mètode de l'impuls ultrasònic. Consisteix a posar dos transductors en contacte amb la mostra, un és emissor i l'altre receptor. Es genera un impuls elèctric en l'emissor que travessa la mostra i és recollit pel receptor, permetent de mesurar el temps que triga la vibració en recórrer la mostra.

Aquest paràmetre depèn en gran mesura de la litologia i estructura del material i permet de valorar el grau d'alteració i fissura de les roques segons la funció

$$IQ = (VP / Vp) * 100.$$

En la Taula 5 s'indiquen els resultats de l'anàlisi sobre quatre mostres.

Taula 5.

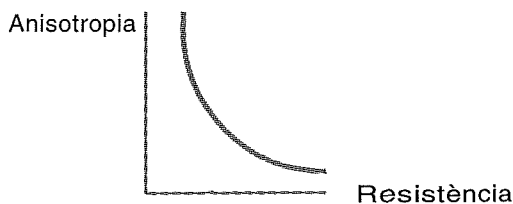
Mostra	Velocitat m/seg		Observació
	T	L	T/L
M2 (Sineo)	7700	7578	1.01
M3 (Sineo)	7769	7553	1.03
Q1 (Qta)	7718	7396	1.04
Q6 (Qta)	6603	5178	1.28

La funció T/L és una mesura de l'anisotropia de la roca analitzada segons els següents paràmetres:

Taula 6.

<1.2	Sense anisotropia
>1.2<1.5	Anisotropia baixa
>1.5<2	Anisotropia mitjana
>2	Anisotropia alta

La relació entre l'anisotropia i la resistència a la fracturació d'una roca és una funció inversament proporcional i que segueix el comportament descrit per la Fig. 2.



## PROVA DE MICROINDENTACIÓ DINÀMICA PER ESCLERÒMETRE

Aquesta prova és la que més assimila a la realitat de les accions replicatives clàssiques perquè reproduïx un sistema dinàmica, contràriament a la prova de la microdureza de Vickers que presentem més avall. Per tant, ens ha de servir per controlar les variables que en aquelles és impossible de conèixer, com la fricció, l'abrasió i la pressió perquè es tracta de categories estables i controlades automàticament per la màquina.

L'objectiu d'aquest estudi és determinar la resistència a l'abrasió de les roques analitzades. El coneixement de les causes elementals d'una ratllada és un suport fonamental per la comprensió dels fenòmens de modificació de la superfície dels materials. L'equip usat, un escleròmetre, és un sistema de simulació de desgast per ratllada que permet reproduir les ratllades produïdes per mecanismes d'abrasió. Gràcies a les informacions energètica i morfològica obtingudes, aquest aparell ens forneix amb paràmetres tribològics i estructurals dels materials, com l'energia específica d'abrasió.

Aquesta caracterització dels materials efectuada sota condicions imposades (càrrega, profunditat de ratllada, selecció del lubricant...) i introduint paràmetres adequats, permetrà la millor comprensió dels fenòmens d'abrasió relacionats amb les condicions d'utilització (càrrega, velocitat, fricció, percussió...) i amb els medis (sec, humit, sorra,...). La ciència que estudia el comportament dinàmic dels materials sota aquestes condicions, les quals generen microabrasions, és l'esclerometria.

L'escleròmetre dóna informació sobre el comportament dinàmic de les superfícies durant la ratllada mercès, d'entrada, a la mesura simultània de forces normals, tangencials i laterals aplicades per un indentador (cònic i de diamant) sobre la roca i, finalment, a l'anàlisi morfològica de la ratllada. En aquest estudi s'usa un escleròmetre linial.

Amb la finalitat d'obtenir morfologies de superfície idèntiques per a totes les mostres estudiades s'ha decidit de polir-ne la superfície i incloure-les en reïna. La profunditat de la ratllada sobre les mostres és de 40 µm. Aquesta profunditat correspon a l'ordre de magnitud del valor mitjà de la diferència «**Pic-Vall**» mesurada en les superfícies abans del polit. Les tres mostres han estat ratllades primer en sec i després amb aigua com lubricant. L'objectiu de la mesura escleromètrica serà, per una part, obtenir informació quantitativa dels esforços que permeti el càlcul de l'energia d'abrasió; i, en segon lloc, una mesura qualitativa que mostri fenòmens de fracturació i arrasament dels grans. Aquesta segona opció no ha estat per ara aplicada a la nostra anàlisi.

L'energia específica d'abrasió ( $E_s$ ) està definida per la raó entre l'esforç tangencial de ratllat i el volum de matèria arrasada.

(1)

$$E_s = \frac{\int_0^l Ft(x) \cdot dx}{V}$$

**On:****Ft:** esforç tangencial de ratllat**V:** volum de matèria arrasada**l:** longitud de ratllat

Prenent la mitja de Ft, es troba per (1):

(2)

$$E_s = \frac{Ft \cdot l}{V}$$

**On:****Ft:** l'esforç mitjà tangencial.**V:** el volum de matèria arrasada.**l:** longitud de ratllat

El detector de força permet l'enregistrament dels esforços normal, tangencial i lateral durant el ratllat. El resultat és transcrit en forma de gràfic d'esforços com el de la Fig.3. La llargada del ratllat està indicada en les abscisses (en mm), el valor de l'esforç en l'eix d'ordenades (en N) i els esforços normals, tangencials i laterals estan representats respectivament per les corbes negra, vermella i blava. Els valors mitjans dels esforços deduïts d'aquest tipus de gràfic seran utilitzats pel càlcul de l'energia d'abradió. Per altra banda, i de forma qualitativa, en la imatge de les corbes són visibles els fenòmens que indiquen arrasaments de grans o fracturació. Aquestes deformacions estan causades per l'augment de la compressió (puja ràpida de l'esforç normal i tangencial) seguit de davallades pronunciades (sovint aïllades) d'aquest mateix esforç.

L'altra variable que entra en el càlcul de l'energia d'abradió, el volum de matèria aixecada, s'aconsegueix a partir de la mesura topogràfica de la ratllada, una dada que hom pot obtenir mitjançant un rugosímetre òptic. S'extreu la cicatriu de la ratllada traçant-ne el contorn i a continuació es calcula el volum de matèria aixecada (que correspon al volum de la cicatriu) per comparació amb un solc de referència. Per aconseguir-ho, hom ha observat el conjunt de les mesures topogràfiques a fi de determinar-hi un valor comú de solc vàlid per usar-lo com pla de referència pel conjunt de ratllades. Aquesta observació ha posat de relleu un pla de nivell zero que s'ha demostrat òptim, ja que correspon al pla de poliment preparatori de les superfícies (Fig. 4).

Els resultats de l'aplicació d'aquest assaig es presenten en el Gràfic 1 en el qual s'indica l'energia específica d'abradió per a cada roca estudiada. Els comentem, juntament amb els de les altres tècniques al final del capítol.

#### PROVA DE MICROINDENTACIÓ DE VICKERS

Aquesta prova està dissenyada per mesurar la resistència de la roca a la indentació o microduresa. Consisteix en l'aplicació d'una força de pressió mitjançant una piràmide de diamant damunt d'una superfície de roca amb poliment especular. Per tant, s'ha de preparar un cilindre de reïna en el que s'inclou la mostra i posteriorment és polida fins aconseguir una superfície perfectament especular, a fi d'eliminar al màxim les irregularitats i les possibles respostes no simètriques.

Així com les anteriors proves estan pensades per mesurar paràmetres generals de resistència, en aquest cas es tracta d'una de les variables clarament implicades en el treball dels objectes d'ús lítics: la pressió. És una versió estàtica que es complementarà amb una prova similar de caràcter dinàmic: l'escleromètrica que descrivim més avall. L'assaig de microduresa suposa que la mostra és isotropa i les estructures micro i criptocristal·lines les estructures. Per això només ha pogut ser aplicada a les dues varietats de sílex: la d'edat neògena i la d'edat cretàcia i no és possible de fer-ho amb les quarsites. Ha estat aplicada a un total de nou mostres: quatre de sílex neogen (M01-04) i cinc de sílex cretàcia (M05-09).

En la Taula 7 es presenten els resultats de les mesures de la diagonal de la piràmide per a cada incisió i mostra: en columnes representem les incisions mesurades en ponds (mesura de força relativa a una massa expressada en grams). A cada mostra es practicaren deu incisions de 20 ponds a 200 ponds amb una progressió de 20 ponds. Algunes incisions no han pogut ser mesurades perquè estan totalment fracturades i deformades. La resistència o microduresa és calculada en base a la diagonal esmentada i mitjançant una fórmula establerta

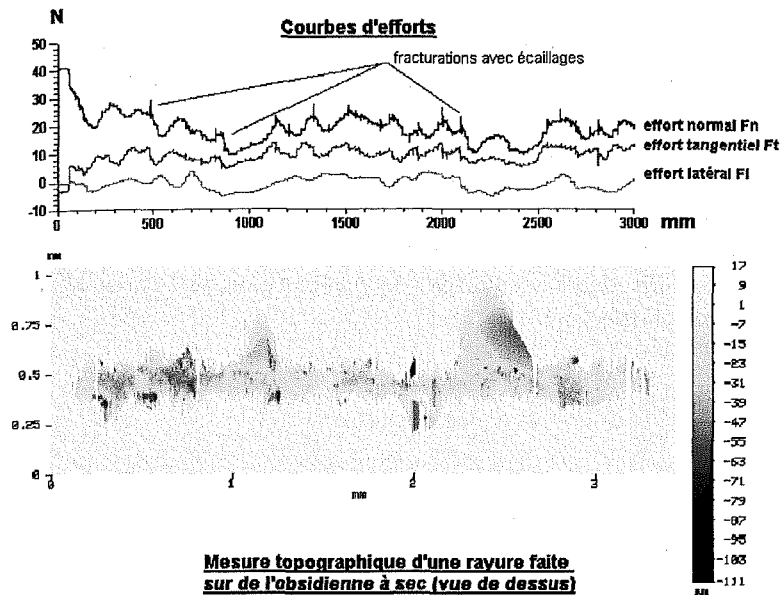


Fig. 3 Corbes d'esforç i mesura topogràfic d'una ratllada en sec en una obsidiana. (Imatge cedida pel Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes. École Centrale de Lyon)

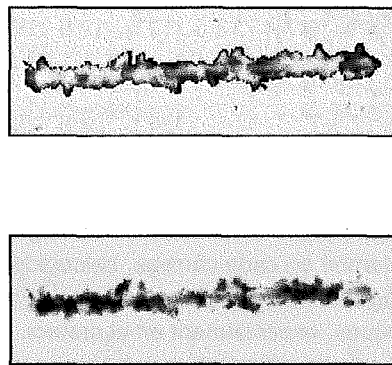


Fig. 4. Vista superior del contorn de la cicatriu en la imatge topogràfica (esquerra) i extracció de la cicatriu sobre el pla de referència zero (dreta). (Imatge cedida pel Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes. École Centrale de Lyon)

$$HV = 1854,4 P / d^2 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

en la qual  $P$  = càrrega, en punds; i  $d$  = diagonal, en  $\mu\text{m}$ . El resultat és expressat en quilopunds per mil·límetre quadrat ( $\text{kp/mm}^2$ ). Una altra manera d'oferir les dades relatives és a través d'un càlcul per a intervals de mesura de diagonal preestablerts i que es fan servir com a convenció comparativa:  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  i  $20\mu\text{m}$ . Així els resultats es solen donar en força necessària per a provocar una incisió de  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ... En lloc de tabular els resultats dels càlculs hem optat per presentar gràficament (Figs. 5-8)  $HV$  i  $d$  com a funcions de la càrrega. Provem de mostrar l'existència o manca d'homogeneïtat entre les dues roques analitzades, la validesa o no de les mesures en funció de llur dispersió o concentració.

Taula 7.

Mesures de les diagonals de les empremtes.

	20p	40p	60p	80p	100p	120p	140p	160p	180p	200p
M01	15.2	16.1	22.9	20.9	24.1	21.4	25.7	27.2	29.4	34.3
M02	9.3	11.1	13.9	15.2	17.4	20.9	21.6	25.8	24	22.5
M03	11.9	13.6	13.8	15.8	20.5	23.8	20.9	21.3	24.4	25.9
M04	9.9	11.7	15.3	17.9				21.9	26.3	30.3
M05	31.6	20.5	13.3	18.2	20.5	15.1	14.7	16.2	17.7	14.4
M06	10.7	13.1	14.6	17.1	17.1	19.5	20.5	21.5	19.5	22.1
M07	11	13.2	9.7	17.4	13.5	12.5	12.6	19.9	18.7	20.9
M08	10.9	12	11.6	15.7	20	16.8	19.5	20	22.2	22.4
M09	8.4	15.4	17.1			24.5	24.6	29.7		31

La Fig. 5 mostra les mitges dels valors de la diagonal per a una càrrega determinada i llur dispersió, també en cada càrrega, calculades a partir de les quatre mostres de sílex neogen (Fig. 5a) i de les cinc de cretaci (Fig. 5b). La dispersió és molt àmplia en totes dues roques, especialment en el cretaci. En part s'explica per la forta fracturació que pateix i que ha dificultat sovint la mesura. Ve a indicar que aquesta mesura és generalment erràtica, tot i que s'observen tendències de les mitges que ens ofereixen una bona informació. La Fig.6 amplia la informació sobre el mateix tema: la dispersió forta de les mesures: cada línia uneix els punts de mesura d'una mostra. La línia que uneix punts negres indica les mitges de totes les altres. Veiem com les mesures es dispersen de mostra en mostra, són erràtiques perquè no indiquen una progressió franca, sinó que les línies són sinuoses. Es dispersen també respecte de la mitja. Aquest fenomen es produeix de forma molt similar en ambdós materials (cal tenir present que les escales verticals de les dues gràfiques són distintes). Finalment, la Fig. 7 indica com la dispersió i el moviment erràtic de les mesures de dues mostres concretes (una de cada sílex) estan dins d'un interval de confiança laxa.

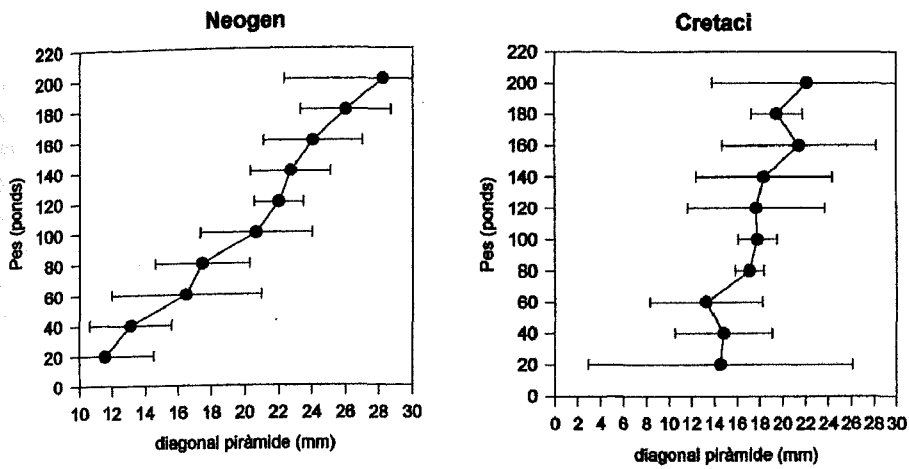


Figura 5.

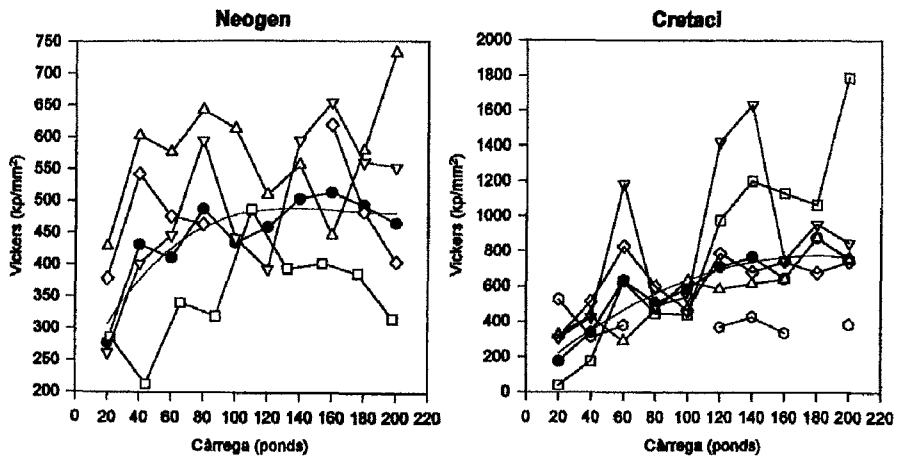


Figura 6.

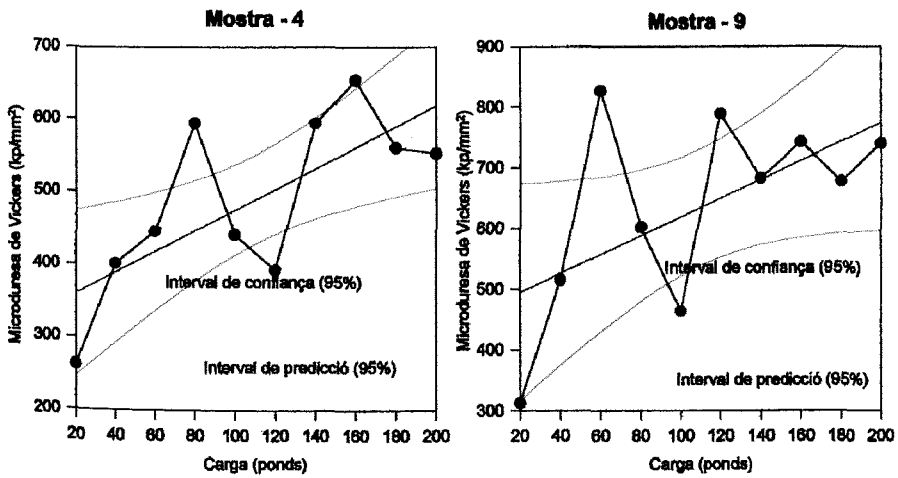


Figura 7.



## AVALUACIÓ DELS RESULTATS

Les anàlisis realitzades per Mallol (1997) presentaven uns resultats altament interessants per al coneixement del comportament de les roques davant l'esforç. Indicaven que en davant un esforç percussiu la quarsita de la fàcies Utrillas és més fràgil i es trenca més fàcilment que el sílex d'edat neògena i en un esforç abrasiu el sílex neogen es deforma molt més plàsticament. Això significa que el sílex neogen deforma la seva estructura interna, intracristalina, mitjançant plasticitat, per superar l'esforç i li costarà molt de trencar-se i perdre matèria. La quarsita té un comportament contrari: allibera els esforços preferentment trencant-se. Això no vol dir que siguin els únics comportaments que presenten: el sílex es fractura i la quarsita es deforma, però ho fan davant d'esforços molt diferents. Totes dues solucions serveixen per alliberar l'energia acumulada per l'esforç. La deformació plàstica indica que una roca és capaç, sense patir grans fractures, de superar una sol·licitació, tot i que, en el camp de l'anàlisi de deformacions per ús semblaria que la roca més deformada és la que menys soporta l'esforç. En segon lloc, la fractura de la quarsita també és una deformació. L'explicació del diferent comportament pot estar en l'estructura cristal·logràfica: el sílex neogen, amb nombrosos buits en la xarxa pot reduir aquest espai tot deformant-se abans de trencar-se. En la quarsita, els cristalls, de dimensions molt més grans, acumulen defectes en els espais entre ells i aquests defectes poden afavorir l'alliberament d'energia a través d'ells i provocar-ne la separació d'alguns.

Entre les que hem realitzat per aquest estudi, la prova que mesura la resistència al rebot n'indica una d'alta o mitjana-alta per a les mostres de sílex neogen, mitjana per a la quarsita de la fàcies Utrillas i baixa per al sílex cretaci. Això confirma les dades anteriors perquè mostra una fractura tardana per percussió en el sílex. Si no es fractura, significa que l'energia ha d'ésser alliberada en l'interior de l'estructura: per plasticitat. La quarsita necessita càrregues més fortes per iniciar la plasticitat. La mesura de l'anisotropia no indica diferències marcades entre ambdues roques i les situa ambdues en la franja d'anisotropia menor i, per tant, de resistència forta.

L'assaig de resistència a la indentació dinàmica confirma els resultats oferts fins ara. Ja es tracti d'abrasió amb aigua o a sec s'observa que les tres roques analitzades segueixen comportaments distints a l'abrasió (Gràfic 1). L'energia d'abrasió del ratllat en sec ens mostra que el sílex cretaci és el més sensible a l'abrasió, mentre que el neogen presenta una resistència a l'abrasió molt més important. La quarsita es trobaria entre el comportament d'ambdós.

La classificació feta amb les dades del ratllat en sec està modificat pels resultats de l'abrasió amb aigua. En efecte, aquí és la quarsita la roca més sensible a l'abrasió, a continuació el sílex cretaci i el sílex neogen es manté com la roca més resistent. Cal remarcar que l'energia d'abrasió és sempre més baixa quan es fa servir un lubricant com l'aigua. Aquesta afirmació no és vàlida per al sílex d'edat cretàcia, ja que aquesta roca té un comportament pràcticament idèntic amb aigua o en sec, segons marquen els resultats d'aquest assaig. Contràriament, per la quarsita i el sílex d'edat neògena, la diferència és molt marcada, són més sensibles a l'abrasió amb aigua. Ja que el valor de la diferència d'energies d'abrasió és idèntic per a la quarsita i el sílex d'edat neògena, es pot concloure que la superfície d'aquestes dues roques segueixen el mateix comportament mecànic quan pateixen un esforç enfront un agent abrasiu en un medi humit com l'aigua.