
CAPÍTOL 5. MODEL INTERPRETATIU DELS PROCESSOS DE DESGAST EN OBJECTES LÍTICS

1. DISCUSSIÓ

1.1. La generació de les deformacions d'ús

Tal i com hem vist en l'apartat 3.1, a l'hora d'explicar el procés que dona lloc a les deformacions d'ús en la superfície dels objectes lítics, els investigadors es troben dividits bàsicament en tres grups: els partidaris de la teoria del dipòsit, els de l'abrasió i els de la que podríem anomenar de fenòmens combinats.

Els partidaris de la hipòtesi d'un poliment addicional, expliquen les deformacions d'ús en base a la formació d'una capa o dipòsit, fruit de les interaccions químiques entre la roca i la matèria treballada. En els instruments elaborats amb roques silícies, que han estat la base dels estudis (bàsicament sílex i quars) aquest dipòsit tindria el seu origen en la formació de gel de sílice amorfa, ja sigui procedent de la transformació de la pròpia roca, de restes de la matèria treballada o d'una combinació d'ambdues. Dins d'aquesta hipòtesi, els factors mecànics juguen un rol totalment secundari.

Els que defensen un model basat en fenòmens mecànics, expliquen les deformacions d'ús com el resultat d'una abrasió de la superfície dels objectes causada per l'esforç provocat per la fricció. Tot i que alguns d'aquests autors accepten que pugui donar-se algun fenomen d'origen químic en el procés de deformació de les superfícies, aquest no es contempla mai com el principal agent.

Els seguidors de models mixtos plantegen les deformacions d'ús com el resultat de la combinació de fenòmens químics i mecànics. Dins d'aquest grup existeix una certa variabilitat en funció del pes específic que cada autor assigna a cada fenomen.

La nostra experimentació (veure capítol 4) ha aportat dades que posen en qüestió, i en alguns casos contradiuen clarament, aspectes fonamentals d'aquestes teories, especialment de la del dipòsit. A continuació, passarem a discutir aspecte per aspecte els punts contradictoris.

1.1.1. El comportament de les deformacions d'ús

El comportament de les deformacions d'ús, el seu desenvolupament, tant en superfície com en profunditat, és una de les qüestions fonamentals per tal de contrastar la validesa de les diferents hipòtesis. Per afrontar aquesta problemàtica, la majoria dels investigadors han portat a terme sèries experimentals tradicionals, en les quals l'observació de les superfícies es porta a terme un cop finalitzat el treball programat, i s'intenta deduir quins han estat els fenòmens que han donat lloc a les deformacions. En aquest tipus d'experiment no es compta ni amb l'observació d'estadis intermedis ni amb un control previ de les superfícies, fet que alguns cops ha provocat errors d'interpretació. En altres casos, s'ha realitzat un control indirecte, a partir de superfícies no deformades de peces no usades procedents del mateix nòdul o del mateix tipus de roca. Finalment, alguns autors han introduït experiments seqüencials per a poder definir l'evolució de la deformació de les superfícies. No obstant, la dinàmica de les deformacions d'ús no es troba prou documentada en la bibliografia disponible, ja sigui per les limitacions del sistema d'observació utilitzat (bàsicament microscòpia òptica) o per un únic interès en definir atributs específics de les deformacions. En aquesta línia, ens plantejarem la necessitat de controlar l'estadi inicial de la matèria primera i l'evolució de la deformació en moments diferents en punts concrets de l'objecte, per tal de documentar el procés. Els resultats obtinguts mitjançant els experiments seqüencials han permès observar els canvis produïts en les superfícies dels objectes al llarg del treball, i conèixer el seu comportament.

A. El comportament en superfície

Un aspecte fonamental en la discussió sobre la gènesi de les deformacions d'ús ha estat el seu comportament en superfície. Els partidaris del dipòsit han basat part de les seves interpretacions en les condicions de flux del gel de sílice, condicions que permetrien el seu desplaçament en superfície a una escala de μm . Aquest fenomen provocaria l'eliminació o suavització del microrelleu de la roca mitjançant la deposició preferent del gel en les depressions. Aquest aspecte però, s'ha estudiat sempre amb posterioritat a l'ús, o bé amb unes condicions de control del procés que no han permès observar amb detall el comportament a nivell micro.

El mateix ha passat amb els partidaris de la deformació mecànica i amb dels de la teoria mixta, a excepció de Yamada (1993). Aquest investigador, mitjançant

experiments seqüencials controlats mitjançant fotografies al MER, observa que les depressions de la microtopografia de l'objecte no són cobertes per cap dipòsit, sinó que romanen fins que desapareixen per arrasament de la superfície.

Els resultats obtinguts en el nostre estudi coincideixen plenament amb l'observat per Yamada. En totes les sèries experimentals de tipus seqüencial portades a terme s'observa com les depressions de la topografia de l'objecte es mantenen fins que desapareixen per arrasament de la superfície. L'únic element que omple les depressions són residus de la matèria treballada, que desapareixen durant el procés de neteja previ a l'observació microscòpica.

Els desplaçaments en superfície a nivell general, d'existir, es donarien a una escala d'àngstroms, i rarament superarien la micra, com és el cas del desplaçament de matèria documentat en algunes estries provocades per partícules abrasives, i en un estat de flux insuficient per omplir depressions. Aquests desplaçaments es poden explicar més com el resultat d'una deformació plàstica que com el de la redeposició d'un gel de sílice.

En aquest sentit, podem afirmar que no són vàlides les hipòtesis plantejades en base a la deposició d'una capa de gel de sílice que cobriria preferentment les depressions.

De la mateixa manera, el fet que els forats que s'observen en les superfícies més deformades responguin, en realitat, a la pervivència de les depressions originals del microrelleu de la roca, desmenteix la seva interpretació com a resultants de fenòmens de corrosió dels dipòsits plantejada per Sala (1997).

No obstant, si bé en les condicions de pressió per fricció a què es veu sotmès un objecte durant un procés de treball manual no s'han documentat de forma generalitzada desplaçaments en superfície, sí que han estat àmpliament observats en condicions d'alta pressió per impacte. En aquest sentit, el desplaçament, redeposició i compressió de material de la superfície de l'eina s'ha pogut documentar en el grup de deformacions produïdes per la talla. Aquest fenomen és perfectament explicable en base a un comportament plàstic de la roca, que no ha de comportar necessàriament cap modificació química.

B. El comportament en profunditat

Diversos autors (Whittoft 1967; Anderson 1980b; Anderson-Gerfaud, 1981, 1983, 1986; Vaughan 1981; Mansur-Francomme 1983a; Plisson & Mauger 1988; Christensen & Walter 1991; Sala 1997; Christensen 1998) han plantejat que es forma un dipòsit en la superfície dels objectes, amb un caràcter acumulatiu, és a dir, que augmenta en volum a mesura que es desenvolupa l'esforç, ja sigui de forma contínua,

o com a resultat de la superposició de diferents generacions de dipòsits. En aquest sentit, l'abradió, o no existeix, o es considera un factor totalment secundari en la formació del poliment.

El desenvolupament en profunditat de les deformacions d'ús és, junt al comportament en superfície, un aspecte fonamental per la interpretació de la seva gènesi. No obstant, tot i la importància que podria tenir aquest aspecte per contrastar la validesa de la teoria del dipòsit, cap dels autors que la defensa, a excepció de Sala (1997), ha portat a terme estudis encaminats a documentar-lo, fet pel qual aquest tema s'ha mantingut sovint en un pla estrictament hipotètic. Sala ha afrontat aquesta problemàtica a través de l'observació, mitjançant el MER, de peces experimentals seccionades. Aquest autor identifica una capa de dipòsit superficial, de gruix variable en funció de la matèria treballada, però que en cap cas arriba a superar les 4 μm , a més d'una zona de compressió subjacent, també variable, que es documenta fins a un màxim de 25 μm . de profunditat (Sala 1997: 171).

El gruix i la caracterització d'aquesta capa superficial ja havien estat qüestionats per altres autors, com Masson *et al.* (1981) o Levi Sala (1996), entre d'altres, partidaris del model mecànic. Els primers, aplicant la tècnica de la Difracció de Raigs X sobre peces de falç, no aconseguiren documentar ni la presència d'òpal amorf, ni d'òpal C.T. (cristobalita-tridimita), canvis de fase que haurien de donar-se si existís el dipòsit de gel de sílice. En base als seus resultats, plantegen que, o bé la capa de gel de sílice no existeix, o bé es tracta d'un dipòsit d'un gruix a escala d'àngstroms, que no és detectable mitjançant aquesta tècnica (Masson *et al.*, *op.cit.*: 45-46). Sala (1997) planteja com a tècniques més vàlides per a caracteritzar els dipòsits la Microespectroscòpia Raman de Làser i la Microespectroscòpia d'Infrarojos, tot i que en el seu treball no aporta cap dada al respecte.

Els nostres experiments de tipus seqüencial han permès observar, com ja havia fet Yamada (1993) amb el treball de diversos materials, que en cap cas existeix un creixement en volum de les zones de màxima deformació. Ben al contrari, en tots els casos es documenta, en major o menor grau, una pèrdua de material, conseqüència de l'arrasament del microrelleu de la superfície de l'objecte i de la pèrdua de tall per fracturació i poliment. Els "dipòsits" no creixen, ni, un cop formats, constitueixen una superfície sòlida i inamovible que resisteixi fins a la fi del treball. Les superfícies de contacte dels objectes es comporten durant l'esforç d'una forma totalment dinàmica. Contínuament es generen i es destrueixen "dipòsits", per tant, el que es detecta mitjançant l'observació microscòpica és l'estat concret de la superfície en un moment determinat, i no pas la fase d'un fenomen acumulatiu.

Per il·lustrar el comportament de les deformacions d'ús, incloem dos exemples de la nostra sèrie experimental, un d'un objecte utilitzat per gratar pell seca i un d'una acció de tallar una gramínia, en aquest cas fenàs en estat verd (fig. 5.1). S'han escollit aquests dos casos perquè constitueixen els dos extrems dintre de les deformacions

d'ús pel que fa a les condicions i característiques de la matèria treballada (bàsicament, presència o absència de silici en la composició, i d'aigua).

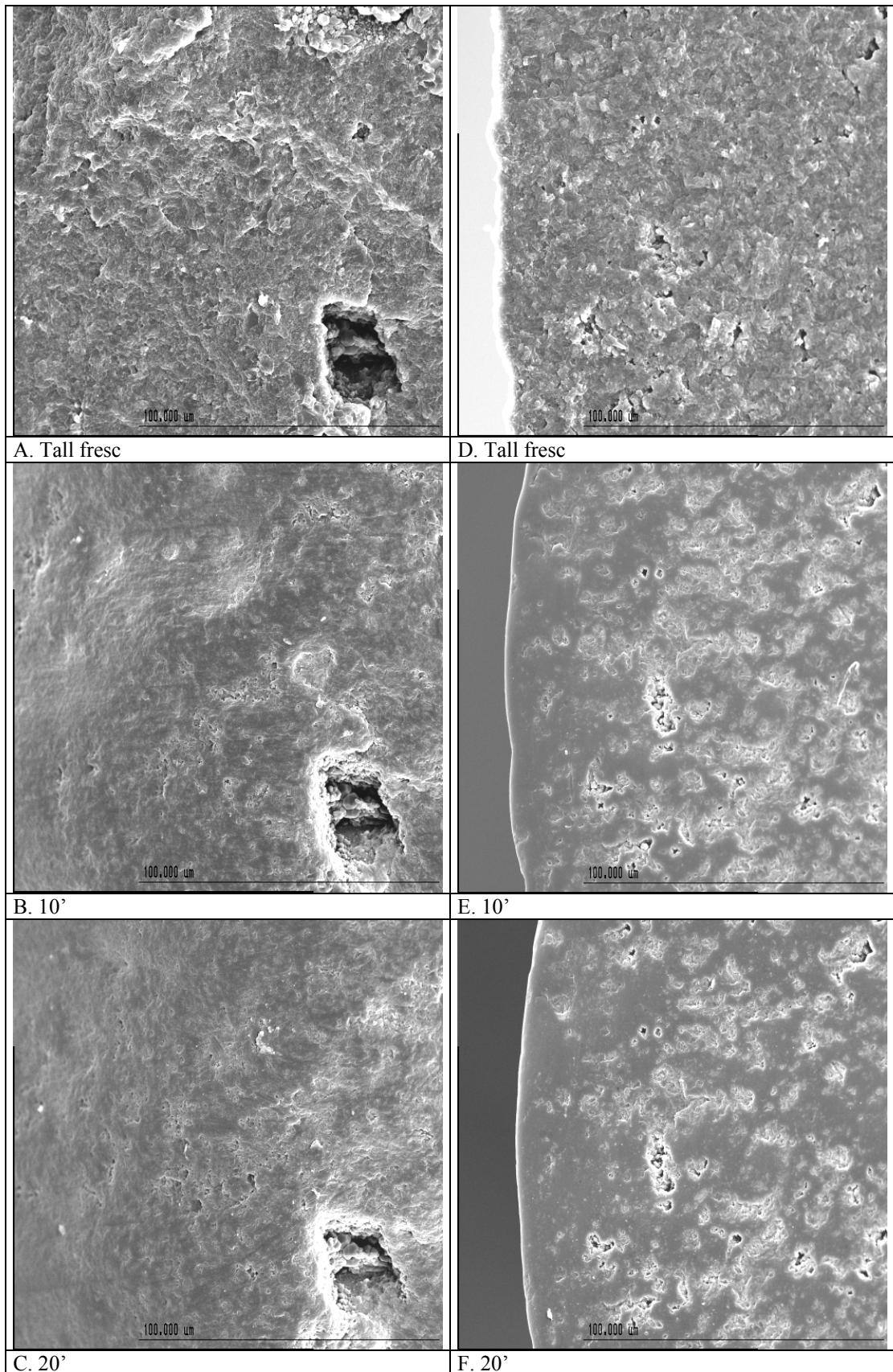


Figura 5.1. Experiments SPC02 (A-C) i SMP28-H (D-F).

En el cas de l'objecte utilitzat per gratar pell seca (fig. 5.1.A-C), encara que es vegi afectada tota la superfície, és especialment interessant centrar-nos en el forat de l'extrem inferior dret de les imatges. En la imatge A es mostra l'estadi inicial en què es troba la superfície abans d'utilitzar l'objecte. En la imatge B s'observa com, després de 10 minuts de treball, el diàmetre de la cavitat ha augmentat com a conseqüència de la destrucció per microfractura i abrasió de part de la "volta" de la cavitat. En aquest moment és fàcilment observable la distància existent entre els monocristalls de l'interior del forat i la superfície de l'objecte. En la imatge C, corresponent al mateix punt després de 20 minuts de treball, s'aprecia clarament com la distància entre aquests cristalls i la superfície s'ha reduït i que, per tant, s'ha produït una pèrdua de material.

En l'experiment de tallar herba, també es pot apreciar la progressiva pèrdua de relleu, i, de forma especial, el retrocés de la vora del tall a mida que es perllonga l'acció (fig. 5.1.D-F).

En ambdós exemples, doncs, es pot observar que, a banda de l'aspecte final totalment diferent de les deformacions d'ús, s'ha donat una pèrdua de material, i no pas una acumulació.

C. Les figures de fregament

Les figures de fregament documentades en la nostra sèrie experimental han estat les estries i les bandes de compressió, que en la bibliografia existent s'agrupen sota la denominació genèrica d'estries.

D'entre les diferents hipòtesis per explicar la formació d'estries sobre els "dipòsits", i, especialment, el fet de perquè hi ha feines que produeixen estries i d'altres que no, una de les més acceptades ha estat la de Mansur Franchomme (1983). Com ja hem vist anteriorment, per aquesta autora les estries són la conseqüència de l'acció de partícules abrasives sobre un dipòsit de sílice amorfa. La presència o no d'estries, i les seves característiques, depenen, en conseqüència, del grau de fluïdesa d'aquest gel durant la utilització.

Amb una observació detallada de les estries, aquesta hipòtesi és difícilment acceptable. D'una banda, s'ha de desestimar el procés de formació proposat per les estries del tipus *filled-in*, o estries colmatades, ja que si el gel de sílice és el suficientment fluid, gairebé líquid, com per a omplir les estries un cop les ha generades la partícula abrasiva, també haurien d'estar plenes les depressions de la superfície del sílex, i ja hem vist que això no succeeix.

Per altra banda, tenim les *smooth-bottomed troughs*, o estries de fons llis. Dins d'aquest grup es subdivideixen en estries amb forma de cinta, i les *fern-like*, o amb

forma de falguera. Segons Mansur Franchomme, aquest tipus d'estries haurien de formar-se sobre un dipòsit el suficientment fluid com per a permetre una bona acció de la partícula abrasiva, però no tant com per a tancar el solc un cop ha estat generat. Segons la nostra experimentació, no hi ha cap relació entre la morfologia d'aquestes estries i el grau de fluïdesa del "dipòsit", ni tan sols amb la presència o no de "dipòsits". En aquest sentit, s'han documentat estries de fons llis amb forma de cinta en zones fresques o lleugerament deformades, on l'únic "dipòsit" que s'observa és el del solc de l'estria (fig. 5.2). Així mateix, les estries en forma de falguera les hem documentat habitualment com a resultat d'un impacte o un contacte puntual d'alta energia, i es presenten en molts casos totalment isolades, sense relació física amb altres tipus de deformació. Per tant, sembla clar que no és necessària l'existència d'una superfície fluida per tal de generar estries de fons llis, sinó que és l'acció de la pròpia partícula, i especialment la intensitat del contacte, la que deforma plàsticament la superfície i genera ambdós tipus de morfologies.

Finalment, les *rough-bottomed troughs*, o estries de fons granular, s'han interpretat com el resultat de la remoció de cristalls de la superfície. En aquest cas, creiem que la interpretació no ha de centrar-se tan sols en la possibilitat que la partícula abrasiva procedeixi de la superfície de l'objecte, cosa perfectament possible, sinó que s'ha de contemplar també un possible origen exogen. En aquest sentit, hem d'assenyalar que, en la nostra sèrie experimental, aquest tipus d'estries s'han documentat àmpliament en casos d'erosió natural per contacte amb sediments o en casos en què la matèria treballada en presentava d'adherits. Sigui com sigui, és obvi que aquest tipus d'estria és el resultat d'un comportament fràgil per part de la superfície de l'objecte, al contrari del que succeïa en els altres casos, on dominava la deformació plàstica.

En base a les observacions realitzades sobre la sèrie experimental, interpretem que la formació de les estries i de les bandes de compressió es deu a dos fenòmens: d'una banda, l'acció de les partícules abrasives que es troben incloses en el medi interfacial, que entren en contacte dinàmic amb la superfície de l'objecte, i, de l'altra, a un contacte directe, no estàtic i d'alta energia, entre dues superfícies. No creiem que sigui necessari, i de fet, ja hem demostrat que no es produeix, l'existència d'un dipòsit de sílice amorfa per tal que es puguin generar figures de fregament. Aquestes, són deformacions plàstiques, producte del contacte puntual i dinàmic entre dos elements. En aquest contacte intervenen diferents variables: les característiques físiques dels elements, ja siguin partícules abrasives incloses en el medi interfacial o superfícies, les característiques del medi interfacial, en la mesura que condiciona les condicions de contacte, i l'energia de contacte dinàmic entre les superfícies. Les diferents combinacions d'aquestes variables potencien la formació de més o menys figures de fregament, i donen lloc a la variabilitat existent dins d'aquest grup de deformacions.

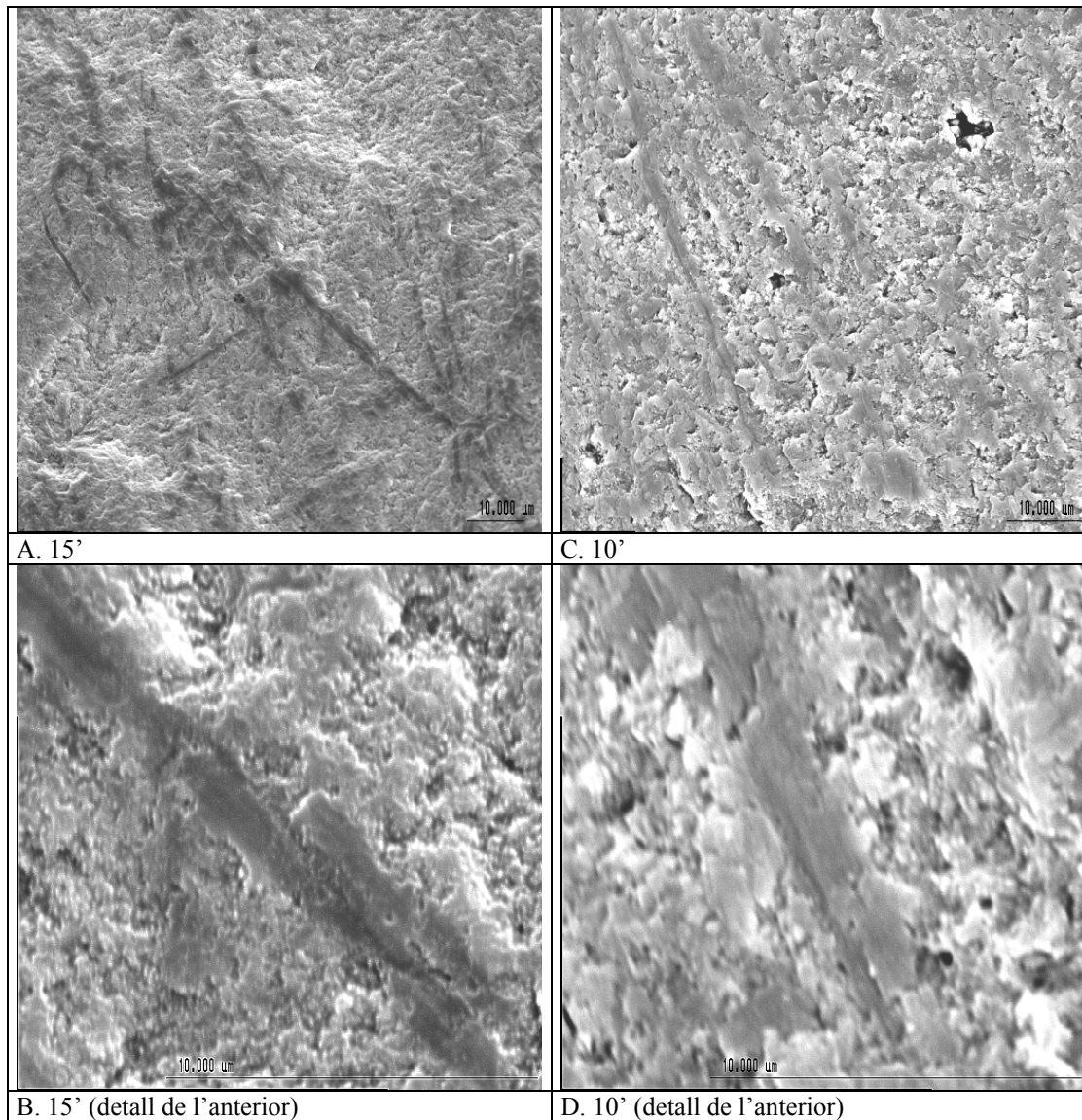


Figura 5.2. Experiments SIC05 (A i B) i SMP25-A (C i D).

1.1.2. La composició química de les zones deformades

La composició química de les zones deformades és un aspecte estretament relacionat amb la seva gènesi, ja que la possibilitat que puguin incloure elements de la matèria treballada depèn de les condicions en què s'han generat.

La possibilitat d'inclusió d'elements exògens ha estat explicada principalment en base a l'existència d'una capa de gel de sílice amorfa, que atraparà restes de la matèria treballada i les fossilitzaria en solidificar-se. Com ja s'ha exposat anteriorment, l'estudi de la nostra sèrie experimental no aporta dades que permetin recolzar la hipòtesi de la formació d'un dipòsit d'aquestes característiques. Per tant, com que segons les nostres dades no sembla probable que en el procés de deformació de les superfícies es donin les condicions necessàries per a que aquestes incorporin elements de la matèria treballada, és lògic pensar que la composició química de les

zones deformades no serà diferent de la de la roca. Per tal de contrastar aquesta hipòtesi, hem portat a terme, de forma sistemàtica, l'anàlisi de la composició química de les deformacions d'ús identificades en els objectes de la nostra sèrie experimental, mitjançant la microsonda d'electrons (MASE), incorporada al MER.

Les anàlisis efectuades en cap cas han documentat elements diferents als de la roca. Fins i tot en objectes de calcària utilitzats per segar gramínies, on la presència de silici seria de fàcil atribució, els únics elements identificats han estat els propis de la roca, fet que permet desmentir la transferència d'elements procedents de la matèria treballada. En aquest sentit, els nostres resultats coincideixen amb els obtinguts per Mansur-Francomme (1983: 228), que va analitzar els dipòsits presents en objectes elaborats en sílex, mitjançant la microanàlisi (MASE), i només hi va identificar silici. Així mateix, Gutiérrez (1996: 67-68), conjuntament amb González i Ibáñez, portaren a terme un petit programa experimental encaminat a caracteritzar la composició química dels poliments. Els seus resultats indiquen que tan sols es dona una composició diferent a la de la roca en els de les peces que no han estat netejades.

En base a aquests resultats, hem d'interpretar la presència d'elements químics procedents de la matèria treballada en zones deformades, identificada per altres autors (Van Gijn, 1986; D'Errico, 1987; Sala, 1993), com a lectures realitzades sobre restes de la matèria treballada, presents en els poliments a causa d'una neteja insuficient. En aquest sentit, el cas de Van Gijn és força simptomàtic. Aquesta investigadora troba calci, fòsfor i carboni en peces experimentals emprades per treballar peix fresc. No obstant, la pròpia autora assenyala que, després d'una neteja amb CIH, dos dels tres tipus de poliment que havia identificat desapareixen. Per aquest motiu, acaba interpretant-los com a procedents de residus de la matèria treballada adherits a la superfície de l'eina, i assenyala la dificultat existent, en alguns casos, en diferenciar el poliment dels residus.

1.1.3. La presència de residus de la matèria treballada

Tal i com es desprèn de l'experimentació realitzada, i d'acord amb les indicacions de la majoria d'autors, en qualsevol acció realitzada amb instruments lítics es documenta, en major o menor mesura, una acumulació de restes de la matèria treballada sobre la superfície de l'eina. Aquests elements hi queden adherits de forma diferencial, en funció del relleu i morfologia de l'objecte actiu i de la pròpia naturalesa de la matèria treballada. És fàcil, doncs, observar, després de l'ús, restes de sang, pèls, greix, fibres, saba etc. en la superfície dels instruments.

El fet d'estudiar la funció dels instruments a partir de les deformacions produïdes en el seu microrelleu, però, ha portat a la necessitat d'eliminar, tant en objectes experimentals com arqueològics, qualsevol tipus de substància adherida a la

seva superfície. Evidentment, aquesta pràctica ha fet desaparèixer una informació potencialment important, sobretot després de la comprovació que alguns dels residus poden romandre sota condicions deposicionals excepcionals, que hagin afavorit la conservació de la matèria orgànica i sense moviment del sediment.

Els treballs sobre residus publicats en els darrers anys posen de manifest la conveniència, si es vol recollir aquesta informació, d'efectuar l'anàlisi prèviament a la neteja dels objectes (Hardy & Garufi, 1998). Ara bé, per a poder desenvolupar aquesta recerca, és absolutament necessària la recuperació del material arqueològic d'acord amb un estricte protocol per evitar la seva contaminació. Donat que aquesta darrera condició no s'ha complert, el nostre estudi funcional no contempla fins al moment la qüestió dels residus.

Tot i així, a nivell experimental, hem pogut caracteritzar morfològicament (MER) i química (MASE) alguns residus, ja sigui mitjançant observacions prèvies a la neteja, en objectes amb una neteja insuficient o en casos en què hi ha hagut contaminacions diverses. Després d'una neteja més acurada (bany d'ultrasons), però, els residus han desaparegut, i la microanàlisi realitzada en el mateix punt ha donat només els elements propis de la matèria primera de l'instrument.

L'estudi d'aquests fenòmens ens ha permès comprovar que no hi ha inclusió de residus procedents de la matèria treballada en les zones deformades per l'ús, ni en forma de partícules amb l'estructura conservada ni, com ja s'ha comentat, en forma de transferència d'elements químics. Aquestes dades entren en directa contradicció amb les presentades per altres autors. Anderson (Stordeur & Anderson-Gerfaud, 1985; Anderson-Gerfaud, 1986) cita transferència de silici de les plantes a les superfícies polides, i ho prova amb el cas dels instruments d'os; però el troba en depressions, i podria, per tant, tractar-se de material adherit, no inclòs. Tal i com ja hem exposat, la nostra experimentació ha mostrat sempre una composició única de Si en les zones de màxima deformació d'objectes de sílex, mentre que en objectes de calcària no hi ha res més que Ca. Si hi hagués transferència de la matèria treballada, en aquestes darreres s'hi detectarien els elements trobats en la matèria treballada: K, Cl, S, per a la canya (on, per altra banda, el Si detectat ha estat molt poc).

La transferència d'elements com el Ca i el P en el treball d'os (Christensen & Walter, 1991; Christensen, 1998; Sala, 1997: 96-97) nosaltres tampoc l'hem observada. En la nostra experimentació, la microanàlisi ha detectat únicament silici en les deformacions presents en objectes de sílex que han treballat l'os. Les imatges amb les quals els anteriors autors il·lustren una composició diferencial a causa la transferència d'elements (Sala, *op. cit.*: 96-97; Christensen & Walter, *op. cit.*: 157, Christensen, *op. cit.*: 190), corresponen a fenòmens d'adhesió que nosaltres tenim perfectament documentats. Aquests dipòsits, que efectivament contenen Ca i P, desapareixen després d'una neteja amb bany d'ultrasons, deixant visible l'autèntica deformació de la roca per l'ús. La constatació d'aquest fet invalida el model de

formació de poliment presentat per Christensen, tot i que els seus treballs són vàlids i aprofitables per a la caracterització de residus de la matèria treballada.

Des d'un punt de vista metodològic, doncs, creiem que s'ha de diferenciar clarament l'estudi de les deformacions d'ús de l'estudi de residus. El primer faria referència a les modificacions provocades en l'estructura de l'eina com a conseqüència del contacte dinàmic de la seva superfície amb la d'un altre element, mentre que el segon contemplaria les restes de la matèria treballada adherides a la superfície dels objectes. Encara que ambdós estudis comparteixin el mateix objectiu, i siguin totalment complementaris, els protocols a seguir durant el seu desenvolupament són molt diferents.

Els residus que es puguin localitzar en objectes arqueològics, doncs, han d'explicar-se o per la possible conservació de restes adherides a la superfície de la roca, o bé per una contaminació posterior a l'ús (ja sigui en el jaciment o degut a la manipulació després de l'excavació). En tot cas, la relació d'aquests residus amb l'instrument, sense un estudi del sediment del nivell arqueològic al que pertany i de l'immediat a l'objecte en qüestió, és molt difícil d'establir (Barton *et al.*, 1998; Kealhofer *et al.*, 1999). Per tant, qualsevol inferència relativa a l'ús d'un objecte a partir de la identificació d'un residu adherit s'ha de prendre amb moltes reserves.

1.1.4. Factors que intervenen en la formació de les traces d'ús

Existeixen una sèrie de factors que tradicionalment s'ha plantejat que intervenen, en major o menor mesura, en la gènesi de les deformacions d'ús en els objectes lítics i que, per tant, influeixen en el seu aspecte final. Aquests són: l'aigua, la temperatura, la composició química de la matèria treballada i les característiques físiques de la roca amb que ha estat elaborada l'eina. És important conèixer el rol que juga cadascun d'ells, així com la influència que tenen en l'aspecte final de la deformació, ja que poden incidir en gran mesura en les determinacions realitzades sobre materials arqueològics.

A. L'aigua

La majoria d'investigadors coincideixen en què la presència o absència d'aigua és un factor que juga un paper important en el desenvolupament de les modificacions causades per l'ús en les superfícies dels instruments lítics. Si bé la seva importància no ve donada pel seu paper com a dissolvent (tal i com es planteja en el model del dipòsit de sílice amorfa format per hidròlisi, que nosaltres no considerem vàlid), s'ha de reconèixer que la presència d'aigua o de qualsevol altre líquid influeix en el procés i, per tant, en l'aspecte final de les deformacions d'ús.

En general, s'accepta que en el treball de qualsevol material el poliment es desenvolupa més en estat humit que en sec (Gysels & Cahen, 1982; Keeley, 1980; Anderson, 1980, entre d'altres). En aquest aspecte, però, no estem totalment d'acord, ja que, encara que en estat humit un mateix material es tendeixin a generar preferentment superfícies de textura més llisa que en estat sec, els treballs sobre materials humits no són els que generen les modificacions per ús més intenses. El treball de pell seca, d'os, de petxina o de pedra calcària, en estat sec, entre d'altres, provoquen modificacions molt més intenses i en molt menys temps que la majoria dels treballs sobre materials humits, a excepció dels cereals. A més, en el cas de l'os, la petxina i la calcària, les superfícies resultants són de textura fina i compacta, mentre que la pell dóna superfícies aspres, fet que ens està indicant que la presència d'aigua no és el factor determinant en l'obtenció de poliments fins. Aquest aspecte ja havia estat assenyalat per Meeks (1982) i Levi-Sala (1996) que, mitjançant l'ús de polidors metal·lúrgics impregnats amb pasta de diamant sense aigua, aconseguen poliments similars als del treball de cereals.

Per tant, tot i reconeixent la importància de l'aigua en el procés de generació i en l'aspecte final d'algunes deformacions d'ús, hem de matisar-la, especialment a l'hora de valorar el seu paper en la creació de poliments de textura llisa i elevada flexibilitat, ja que està plenament demostrat que aquests també s'aconsegueixen en condicions de total o gairebé total absència d'aigua.

Nosaltres pensem, a l'igual que Masson *et al.* i Levi-Sala, que l'efecte que produeix l'aigua és una acceleració del procés de poliment, però pel fet d'incorporar un medi líquid, i no per les seves propietats químiques (experiments amb líquids polars). Així, la seva importància vindria donada, d'una banda, pel fet de modificar les condicions d'elasticitat i duresa de la matèria treballada, i, de l'altra, en ajudar, actuant com a cohesionador, a crear un mitjà interfacial homogeni i plàstic que afectaria de forma més homogènia a la superfície.

B. La temperatura

Aquest factor fou considerat inicialment altament rellevant en el procés de deformació de les superfícies dels objectes d'ús, especialment pels partidaris del model del dipòsit de gel de sílice. El calor generat per la fricció entre la superfície de l'eina i la matèria treballada seria suficient, segons Whitthoft (1967), per fondre el silici en les zones de contacte de l'objecte. Aquesta hipòtesi es basa en supòsits que no han estat demostrats, i que no semblen probables. Com ja han assenyalat altres autors, entre ells alguns dels partidaris del model del dipòsit (Anderson), sembla difícil de creure que durant un treball manual s'aconsegueixin per fricció temperatures superiors als 1.000°C, necessàries per a fondre el silici. A més, en el cas de les deformacions generades pel treball sobre cereals, que és la base de l'estudi dels autors que plantegen

aquesta hipòtesi, aquest fenomen s'hauria de produir de forma ràpida, contínua i generalitzada al llarg de tota la superfície de contacte, si tenim en compte la velocitat de formació i la gran extensió en el tall que solen presentar aquest tipus de deformacions. En aquest sentit, s'ha plantejat (Anderson, 1980) que no és necessari arribar al punt de fusió del sílici, sinó que n'hi hauria prou amb un augment moderat de la temperatura si es tractés d'un procés d'hidròlisi de la sílice.

Però ni tan sols la hipòtesi de la hidròlisi en temperatures moderades sembla factible. Per a que aquest procés sigui possible, a banda d'una temperatura adequada, s'han de donar un conjunt de condicions que no sempre s'aconsegueixen; entre elles una elevada presència d'aigua. A més, les condicions de solubilitat de la sílice són conegudes en experiments de laboratori, però, tal i com assenyalen Masson *et al.* (1981: 46), desconeixem les situacions que es donen a nivell micro durant el procés de treball i, per tant, és força arriscat extrapolar-ne els resultats. Fins i tot en el cas que s'aconseguissin les condicions necessàries per a que es donés la hidròlisi de la sílice, durant la utilització de l'eina, ens trobaríem amb el problema del seu manteniment per tal que aquest fenomen es produís de forma contínua. És difícil de creure que en una acció manual es puguin mantenir unes condicions de temperatura i humitat (entre d'altres) el suficientment constants com per a que es doni un procés d'hidròlisi. Si el procés no és continu, ni afecta simultàniament al conjunt de la superfície activa, la fusió s'hauria de produir de forma puntual, cada cop que en algun punt es donen les condicions necessàries. En aquest supòsit, s'haurien de reconèixer diferents generacions de dipòsit, fet que no ha estat observat en la nostra experimentació. A més, cal tenir en compte que, en absència d'aigua, també es donen deformacions similars a les dels cereals, que no poden explicar-se segons aquest model. Tot aquest conjunt de fets ens fa pensar que el procés d'hidròlisi no és el causant de les deformacions d'ús, i que la temperatura (almenys la que es pot aconseguir en un treball manual d'aquest tipus), no té una influència tan destacada en la gènesi del poliment com han plantejat aquests autors. Per contra, en el cas d'una deformació deguda a processos mecànics, la intermitència en el treball i les variacions en les condicions de temperatura i humitat no semblen influir excessivament en la continuïtat del procés.

Una aportació certament interessant a aquesta discussió són els resultats obtinguts per Fullagar (1991), en una sèrie d'experiments sobre gel encaminats a valorar el paper de la temperatura. En aquests, aconseguix un lleuger desgast, només amb aigua i una superfície dura, a baixa temperatura i sense residus orgànics. L'únic element que es pot trobar en el medi interfacial, junt amb l'aigua, són petits fragments de sílex despresos de la superfície de l'eina. Aquests resultats són coincidents amb els obtinguts en experiments del mateix tipus que hem portat a terme nosaltres, i indiquen que no és necessària una temperatura elevada per a que es desenvolupin deformacions d'ús.

També Levi-Sala (1996) realitza experiments treballant pell mullada en els que, a banda, refrigera les eines al llarg del procés de treball. Les deformacions obtingudes sobre les peces no refrigerades són les mateixes que les que presenten les que sí que ho han estat.

La temperatura en casos d'aplicació de força de forma manual, com els que estem estudiant, és un factor menor, ja que els valors als que es pot arribar en aquestes condicions no són el suficientment extrems com per modificar ostensiblement les condicions de l'esforç.

C. Granulometria i microtopografia de la roca

Està plenament acceptat que la granulometria i la microtopografia de la roca en què està realitzada l'eina són factors determinants en la dinàmica, grau de desenvolupament i aspecte final de les deformacions d'ús.

Com ja s'ha comentat anteriorment, en la nostra experimentació hem pogut contrastar que, en termes generals, en objectes elaborats amb varietats de sílex de gra fi i microtopografia suau (SMP i SP), les superfícies deformades tendeixen a presentar, en els mateixos temps de treball, trames més tancades i textures més fines i compactes que en les varietats de sílex de gra i relleu groller (SI, SC, SN, SG i SU).

Davant de les mateixes condicions de funcionalització, les superfícies de contacte dels objectes es comporten de forma diferencial en funció de la mida del seu gra i de la seva microtopografia. En realitat, no es tracta de processos diferents, sinó de diversos estadis d'un mateix procés.

Les superfícies de relleu irregular i abrupte ofereixen més resistència al desplaçament que les de relleu suau. En oferir una major resistència al desplaçament, la pressió a què es veu sotmesa la superfície és major. A més, donada la irregularitat del relleu, la pressió es distribueix de forma desigual, concentrant l'esforç sobre els punts més destacats de la microtopografia. Aquestes condicions fan que en les zones esmentades dominin els fenòmens de microfracturació i abrasió sobre els de deformació plàstica. Al mateix temps, aquesta dinàmica genera una abundant presència de partícules abrasives en el medi interfacial, procedents del desgast de la pròpia superfície de l'objecte. Això provoca que el medi interfacial sigui més agressiu i que es mantingui la dinàmica, provocant alhora la destrucció, per atrició, de superfícies deformades plàsticament. El procés continua fins que, a causa del desgast, es regularitza el microrelleu de la superfície de contacte. A partir d'aquest moment, s'inverteix la dinàmica, i els fenòmens de deformació plàstica comencen a dominar sobre els d'abrasió.

Les superfícies de relleu suau no passen generalment per aquest primer estadi de deformació, ja que des de l'inici ja disposen d'una superfície força regular. En aquestes condicions, la superfície es desplaça amb més facilitat i es veu sotmesa a una menor pressió que en el cas dels relleus irregulars. Alhora, la pressió es distribueix de forma més homogènia sobre la superfície de contacte. En conjunt, l'esforç a què es veuen sotmeses aquestes superfícies és, ja de bon començament, molt menor que el que pateixen les superfícies de microtopografia irregular i abrupta; equiparable a les condicions en què es troben aquestes darreres en estadis avançats de deformació. En veure's sotmeses a un menor esforç, els fenòmens de deformació plàstica dominen sobre els de microfracturació. Al mateix temps, l'escassa microfracturació fa que el medi interfacial disposi de poques partícules abrasives procedents de la superfície de l'eina, fet que facilita que la dinàmica de deformacions plàstiques es mantingui.

Coneixent el comportament de les superfícies davant de l'esforç, és obvi que el microrelleu de cada varietat de roca condiciona la trama de les deformacions, especialment en els seus estadis inicials. La trama que es genera en la superfície dels objectes de les varietats de sílex fi és ja semitancada o tancada en temps de treball curts, ja que en presentar un microrelleu regular i poc abrupte, és fàcilment modificable. En el cas de les varietats de sílex més groller, el procés de desgast tarda molt més temps en eliminar el relleu original i, per tant, en estadis inicials són més comunes les trames obertes o semitancades.

De totes maneres, la plasticitat de la matèria treballada i del medi interfacial fa que, abans que es produeixi la destrucció total del relleu original, es vegi afectat per la deformació el conjunt de la superfície, amb una major intensitat a les parts més altes del microrelleu.

En aquest context, la determinació del grau de desenvolupament de les deformacions i, per extensió, del temps d'utilització de les eines, és una tasca força complexa, ja que hi intervenen diferents variables. D'una banda, s'han de tenir en compte les característiques del relleu original per a valorar el seu grau de deformació i, de l'altra, s'ha de prendre en consideració la incidència que han tingut en el procés tant la matèria treballada com el medi interfacial. A més, en estadis avançats aquesta dificultat augmenta; perquè a mesura que la superfície es va estabilitzant disminueix el desenvolupament de les deformacions plàstiques, i perquè, en alguns casos, les deformacions plàstiques desapareixen a causa d'episodis de fractura generalitzats.

Un altre aspecte en el que tenen una gran importància la granulometria i la microtopografia de les roques és la conservació de residus de la matèria treballada. En la nostra experimentació hem pogut observar que aquests elements queden atrapats preferentment en les depressions. D'aquesta manera, en materials arqueològics, de donar-se les condicions necessàries per a la conservació de residus, les roques de textura rugosa i irregular serien més propícies per a la realització d'estudis sobre residus.

D. Composició química de la matèria treballada

La composició química de la matèria treballada s'ha considerat un factor important, bàsicament dins del grup de deformacions generades pels vegetals herbacis. En la resta de deformacions aquest factor, en molts casos, no s'ha tingut ni tan sols en compte.

La quantitat de silici de les herbes s'ha adduït com a principal causa de l'aparença final del llustre de cereal (Anderson-Gerfaut, 1981, 1986; Witthoft, 1967; Kamminga, 1979; Vaughan, 1981, etc). Aquest aspecte, almenys en la seva vessant química, ja va ser qüestionat pels resultats dels experiments de Levi-Sala, que aconseguia aquest llustre, i no hi havia altre silici en el medi que el del sílex. En el nostre cas, hem aconseguit poliments molt desenvolupats, de textura llisa, molt similars al llustre de cereal, mitjançant la fricció contra una roca calcària (experiments de talla sobre enclusa).

Si la composició química de la matèria treballada tingués un paper realment rellevant en la gènesi de les deformacions, seria difícil explicar la similitud morfològica entre deformacions produïdes per materials de composició química tan diferent. Sembla doncs evident que, per sobre de la composició química, el que determina l'aspecte final dels poliments és la mida de les partícules abrasives, el tipus de mitjà interfacial i la intensitat de la força. En aquest sentit, la importància de la composició química de la matèria treballada és molt reduïda, i tan sols apreciable en la mesura que aquesta pot donar unes condicions específiques al medi interfacial.

1.2. El caràcter diagnòstic de les deformacions d'ús

La validesa i grau de fiabilitat dels anàlisis funcionals han estat qüestionats per diferents autors des dels mateixos inicis de la disciplina. Aquest dubte té el seu origen en les dificultats o, en algun cas, la impossibilitat, d'identificar la matèria sobre la que ha intervingut un instrument lític en base a l'estudi de les característiques morfològiques de les deformacions que queden enregistrades sobre la seva superfície.

A partir de la primera meitat de la dècada dels 70, com a resultat de la publicació en anglès dels treballs de Semenov el 1964, es varen desenvolupar dues línies d'investigació encaminades a la determinació de les deformacions d'ús a través de tècniques d'observació diferents: la dels baixos augments, basada principalment en l'estudi dels escantells, el primer programa experimental sistemàtic de la qual es deu a Tringham i el seu equip de la Universitat de Harvard (Tringham *et al.* 1974), i la dels alts augments, centrada bàsicament en l'estudi dels poliments, de la qual el principal representant és Keeley.

La validesa dels estudis basats en els escantells ha estat fortament qüestionada per la dificultat de realitzar aquests estudis sobre peces retocades i de diferenciar els escantells d'ús dels generats per altres fenòmens. Així mateix, fins i tot en condicions de conservació òptimes, aquestes anàlisis mostren una escassa definició de la matèria treballada, ja que en el millor dels casos aquesta tan sols pot atribuir-se a grans grups en funció de la seva duresa. Aquestes limitacions i l'escassa fiabilitat de les reconstruccions funcionals basades sols en els escantells han fet que, a partir dels anys 80, s'hagi anat relegant aquest mètode en favor dels estudis dels poliments. No obstant, encara que l'estudi dels escantells sigui poc fiable per si sol, s'ha d'usar complementàriament a l'anàlisi dels poliments, per tal d'arribar a una caracterització integral de les deformacions d'ús.

Per la seva banda, els estudis funcionals basats en l'anàlisi dels poliments tampoc han estat exempts, ni ho estan, de polèmica. Sovint s'ha observat que diferents matèries intervingudes produeixen poliments idèntics o molt similars, i que la mateixa matèria en genera de diferents. Treballs experimentals com els portats a terme per Levi Sala han permès contrastar aquestes coincidències morfològiques: "*The appearance of optically observed "polish" would seem, therefore, not to be specific to the worked material*" (Levi-Sala 1993: 411). Aquest fet ha portat a plantejar el problema que comporta establir una relació directa entre les característiques morfològiques de les deformacions d'ús i la matèria intervinguda, i la necessitat de tenir en compte les diferents variables que intervenen en la seva gènesi: "... *there is no direct correlation between polish and the worked material. The degree of polish development is dependent on several variables: the hardness of the worked material, the presence or absence of a fluid medium, the motion, angle and duration of work*" (Levi Sala. 1996:69). Així mateix, autors com Grace (Grace *et al.*, 1985; Grace, 1989) i Vaughan (1981: 397; 1985: 124) han proposat que els poliments desenvolupats durant el treball de diferents materials passen pels mateixos estadis de formació, i que totes les superfícies polides acabaran tenint el mateix aspecte, el que explicaria la dificultat de reconèixer la matèria intervinguda en base a les característiques morfològiques de les deformacions identificades.

Observacions com aquestes han portat a plantejar si realment es dona o no una relació directa entre el poliment i el tipus de matèria treballada (Vaughan, 1981: 397; 1985: 124; Grace, 1989), i si existeixen diferents tipus de poliments o simplement diferents graus de desenvolupament dins d'un procés de deformació únic (Levi Sala 1988).

A aquest aspecte hem d'afegir la problemàtica derivada de les deformacions produïdes durant la fabricació dels instruments, les generades amb posterioritat a la seva utilització, abandó i enterrament (postdeposicionals), i les derivades de la seva manipulació durant i després del procés d'excavació i estudi, que en alguns casos presenten evidents similituds amb les produïdes per l'ús.

La principal eina utilitzada durant aquests anys per tal de valorar la validesa del mètode d'anàlisi funcional ha estat la realització de tests cecs, en els que un investigador porta a terme l'estudi funcional d'un conjunt d'eines experimentals de les que desconeix les condicions d'ús. El primer d'aquests tests el portà a terme Newcomer, que fabricà i utilitzà 16 eines lítiques i les cedí a Keeley per tal que aquest en determinés la zona activa, la matèria treballada i l'acció realitzada (Keeley & Newcomer 1977; Newcomer & Keeley 1979). Keeley identificà correctament l'àrea utilitzada en 14 dels objectes (87,5%), l'acció realitzada en 12 (75%) i la matèria treballada en 9 (56,2%). Tot i que en el seu moment aquests resultats foren considerats òptims, la confiança en el mètode no quedà ni molt menys afiançada. La mostra dels dubtes que generava entre els propis investigadors l'estudi funcional es pot apreciar en el nombre de test realitzats amb posterioritat als de Keeley i Newcomer (entre d'altres, Odell & Odell-Vereecken, 1980; Kajiwara & Akoshima, 1981; Gendel & Pirnay, 1982; Unrath *et al.*, 1986; Newcomer *et al.*, 1986; Driskell, 1986; Grace *et al.*, 1988; Shea, 1988). Tot i que els resultats d'aquests tests són variables i difícilment comparables, a causa dels diferents criteris de valoració dels resultats, coincideixen en què, sempre, el percentatge més elevat d'encerts es dona en la determinació de l'àrea activa, en segon lloc en la de la cinemàtica, amb valors similars, i, en darrer lloc, en la de la matèria treballada, amb percentatges d'encert que, molts cops, no superen el 40%.

Els resultats del nostre treball experimental permeten incidir sobre els aspectes relacionats amb la validesa dels resultats de les anàlisis funcionals. D'una banda, coincidim amb els autors que plantegen que no existeix una relació lineal i estricta entre les característiques de les deformacions d'ús i la matèria intervinguda: deformacions de característiques similars o idèntiques es generen durant la intervenció sobre matèries diferents, i la intervenció sobre la mateixa matèria dona lloc a una certa variabilitat. Com ja s'ha comentat al llarg d'aquesta discussió, en el procés de modificació de la superfície de les eines durant la seva utilització hi intervenen un gran nombre de variables, que interrelacionen entre elles i que donen lloc a morfologies diferents en funció del pes específic que tingui cadascuna en cada moment. El seu coneixement és bàsic per identificar quines han estat les que han conferit els atributs morfològics fonamentals a les deformacions d'ús, i deduir-ne la seva gènesi. Així mateix, el fet que gairebé no s'hagin documentat figures específiques relacionades amb una matèria o activitat concretes, fa que sigui necessari l'estudi del conjunt de les zones deformades a diferent escala per poder arribar a una determinació d'alta fiabilitat.

D'altra banda, les nostres observacions coincideixen bàsicament amb els resultats dels tests cecs, pel que fa al grau de dificultat diferencial existent en la correcta identificació dels diferents aspectes de la vida útil de l'eina que es poden deduir de l'anàlisi de les deformacions d'ús: unitat activa, cinemàtica, matèria intervinguda i activitat realitzada. Cal tenir en compte, però, que, en els tests cecs, en

portar-se a terme amb material experimental, no existeixen problemes derivats de la conservació de les deformacions, tant pel que fa a la seva distribució com a les seves característiques morfològiques concretes. En el cas dels estudis realitzats sobre materials arqueològics cal valorar, i molt, la incidència que han tingut aquests altres factors, i cal suposar que les dificultats en disposar de criteris vàlids seran majors i, en conseqüència, els nivells d'incert més limitats. No obstant, la identificació de les unitats actives i de la cinemàtica continua essent l'exercici més senzill, sempre i quant es conservin els caràcters bàsics de la distribució de les deformacions, mentre que la identificació de la matèria intervinguda presenta més problemes, especialment a nivell de matèria específica, fins i tot quan les modificacions postdeposicionals tenen poca incidència.

Tot i la complexitat dels mecanismes de desgast que es produeixen en les superfícies d'interacció dels objectes lítics, estem convençuts que la correcta identificació i interpretació de les deformacions produïdes per l'ús que hi queden enregistrades és possible. El grau de fiabilitat de les interpretacions realitzades depèn del coneixement de les diferents variables que intervenen en la gènesi de les deformacions d'ús, així com de les que participen en la formació de les d'origen tècnic i postdeposicional. Tan sols així disposarem de criteris que permetin afrontar amb garanties els casos de coincidència morfològica de deformacions de gènesi diferent.

Dins del grup de les deformacions d'ús, en l'estat actual de la recerca, es dona un nivell de determinació diferencial, ja que la fiabilitat dels criteris d'identificació varien en funció de la matèria intervinguda. Això implica que les deformacions generades per la intervenció sobre certs grups de materials, com per exemple l'os o els cereals, són molt més fàcils d'identificar que les que s'han produït en intervenir sobre matèries animals toves. També s'ha de recordar que, en molts casos, la determinació tan sols es pot realitzar en base a grups de materials genèrics, i no pas a matèries específiques. Això implica que dins d'una anàlisi funcional, si som seriosos, tan sols podrem determinar amb un alt grau de confiança la cinemàtica i la matèria treballada d'un percentatge relativament baix d'eines. Per la major part del material en què es localitzin deformacions d'ús, si bé els índex d'identificació de la cinemàtica seran relativament elevats, els de la matèria intervinguda, especialment els de la matèria específica, seran baixos. En base a aquestes observacions, creiem que existeixen dubtes raonables sobre el grau de fiabilitat dels resultats procedents d'estudis funcionals en què els percentatges de determinació de la matèria específica intervinguda són molt elevats, especialment si no es planteja ni discuteix la dificultat en la diferenciació de les deformacions d'ús generades per la intervenció sobre diferents materials ni la variabilitat existent dins de les traces provocades pel treball sobre una mateixa matèria.

2. FORMULACIÓ DEL MODEL

2.1. Introducció

En la presentació de l'experimentació realitzada i en la discussió dels resultats obtinguts hem anat explicant els diversos fenòmens concrets observats en la superfície dels objectes, les modificacions que en aquesta s'han produït com a resposta a diferents condicions.

Tal i com hem exposat al capítol 3, s'han elaborat diversos models per explicar aquests fenòmens. En la discussió dels nostres resultats ja posem en evidència les mancances d'algun d'ells, així com l'existència de proves fefaents que refuten algunes de les hipòtesis més àmpliament acceptades fins al moment, i la pervivència de fenòmens sense explicar. Davant d'aquesta situació, ens plantejem la necessitat d'exposar sintèticament els fonaments teòrics que guien les nostres interpretacions, així com una modelització bàsica dels processos de deformació identificats.

A grans trets, les nostres interpretacions estan més d'acord amb les dels autors que hem inclòs dins la "teoria de l'abrasió", ja que, segons la nostra opinió, els models basats en la dissolució no funcionen per a explicar les deformacions d'ús observades en la superfície dels instruments lítics. Tot i així, cal posar de manifest, d'entrada, que els processos que ens ocupen són molt complexos, i, per tant, no tenen explicacions unilineals. Hem, doncs, d'adoptar una estratègia d'estudi transdisciplinar, recórrer a diferents tècniques d'anàlisi i adaptar models diversos. En aquest sentit, el camp que ens ofereix més criteris d'interpretació aplicables al nostre objecte d'estudi és el de les ciències dels materials.

Alguns dels treballs més difosos proposen interpretacions del procés de poliment basades en l'anàlisi morfològica realitzada principalment al MER i en les caracteritzacions químiques i cristal·logràfiques obtingudes per mitjà de la microanàlisi per sonda d'electrons, la difracció de raigs X, les anàlisis de feix de ions, o l'accelerador de partícules (entre d'altres, Witthoft, 1967; Anderson, 1980a; Anderson-Gerfaud, 1981, 1982, 1983, 1986; Masson, 1981, 1982; Meeks *et al.*, 1982; Andersen i Whitlow, 1983; Mansur, 1983; Plisson i Mauger, 1988 i Christensen, 1998). D'altres investigadors, en canvi, cerquen models més amplis, normalment basats en l'estudi del comportament dels materials sota condicions diverses. Un dels primers camps d'on s'intenta treure informació és el del comportament del vidre (Cornish, 1961; Lawn & Marshall, 1979). En aquesta línia, es posa en evidència la utilitat de la tribologia com a ciència dedicada a l'estudi de la fricció i el desgast de superfícies en contacte dinàmic (Knutsson, 1988; Fullagar, 1991). Es comencen a estudiar més els processos complexos que els fenòmens concrets (Yamada, 1993; Levi-Sala, 1996), i es formulen models específics basats en les ciències dels materials, la cristal·lografia i la sedimentologia (Knutsson, *op. cit.*), que contemplen processos diversos dins d'un mateix sistema. Més recentment, s'ha aplicat el cos teòric de la

reologia per a explicar les deformacions en els objectes lítics a causa de l'esforç generat durant la seva utilització (Sala, 1997).

2.2. Marc teòric

Les ciències dels materials ens ofereixen una sèrie de conceptes i models que ens són de gran utilitat a l'hora d'explicar les modificacions en les superfícies dels objectes lítics en base al comportament d'un material concret, en aquest cas una roca, davant una càrrega o esforç.

El comportament mecànic d'un material reflecteix la relació entre la força aplicada i la resposta del material, o sigui, la seva deformació. A nivell teòric, es pot establir un procés continu, amb uns punts d'inflexió en el comportament del material, tot definint les successives fases de deformació que es donen.

Inicialment, un material respon a l'esforç amb una deformació elàstica, proporcional a la tensió, que no és permanent, de manera que el material retorna a la seva posició original en retirar-se la tensió. *“A escala atòmica, la deformación elástica macroscópica se manifiesta como pequeños cambios en el espaciado interatómico y los enlaces interatómicos son estirados”* (Callister, 1995: 120).

En continuar la tensió, s'arriba a un moment en què aquesta deixa de ser proporcional a la deformació (transició elastoplàstica), i s'inicien les fractures i les deformacions plàstiques en el material. Aquestes deformacions són ja permanents, no recuperables en retirar la tensió. *“Desde un punto de vista atómico, la deformación plástica corresponde a la rotura de los enlaces entre los átomos vecinos más próximos y a la reformación de éstos con nuevos vecinos, ya que un gran número de átomos o moléculas se mueven unos respecto a otros; al eliminar la tensión no vuelven a sus posiciones originales. El mecanismo de esta deformación es diferente para materiales cristalinos y amorfos. En los materiales cristalinos, la deformación tiene lugar mediante un proceso denominado deslizamiento, en el cual está involucrado el movimiento de dislocaciones (...). La deformación plástica en los sólidos no cristalinos (así como en los líquidos) ocurre por un mecanismo de flujo viscoso”* (Callister, 1995: 125).

Així doncs, en el nostre cas, hem d'explicar les deformacions plàstiques observades en les superfícies de les roques en base als lliscaments produïts per moviment de dislocacions (defectes lineals en la xarxa cristal·lina). L'altre procés, el de flux viscos, es dona quan no hi ha una estructura atòmica regular, i es basa en el lliscament d'àtoms i ions els uns sobre els altres mitjançant fractura i reformació dels enllaços interatòmics, a una velocitat proporcional a la tensió aplicada i sense una direcció preestablerta.

Les ciències dels materials estudien les propietats físiques, mecàniques i químiques d'aquests. Les que més ens interesssen per a comprendre el comportament de les roques davant l'esforç generat durant la seva utilització són les mecàniques. En aquest camp, hi ha una sèrie de conceptes concrets que utilitzarem:

Duresa: Propietat dels materials que indica la seva capacitat a ser deformat en la seva superfície per l'acció dinàmica d'un altre cos. *Duresa al ratllat*, mesurada en base a la capacitat d'un material de ratllar a un altre de més tou (escala MOHS); *duresa a la penetració*, resistència d'un material a que un altre cos pugui deixar traça en la seva superfície per efecte d'una pressió; *duresa elàstica*, indica el comportament d'un material en la seva superfície davant l'impacte d'un element que xoca amb ell (es mesura l'energia absorbida en el xoc); *duresa al tall*, defineix la reacció a la pressió de tall exercida per un cos sobre un altre.

Rigidesa: Resistència d'un material a la deformació elàstica.

Elasticitat: Propietat de mantenir una deformació proporcional a la càrrega i tornar a l'estadi inicial un cop la càrrega deixa d'actuar.

Resilència: Capacitat d'un material d'absorbir energia elàstica quan és deformat i de cedir aquesta energia quan es deixa d'aplicar la tensió.

Fluència: Deformació lenta que es produeix al llarg del temps en un material sotmès a l'efecte de càrregues menors al seu límit elàstic.

Plasticitat: Aptitud d'un material per a deformar-se plàsticament, a sofrir deformacions sense que es produeixin fisures, no recuperant el material el seu estadi inicial un cop cesa la càrrega.

Ductilitat: És la mesura del grau de deformació plàstica que pot ser suportat fins la fractura.

Tenacitat: És una combinació entre resistència i deformació, i mesura la capacitat que té un material d'absorbir energia abans de fracturar-se.

Fragilitat: Propietat segons la qual un material no pot experimentar les mínimes deformacions plàstiques, i es trenca per les forces exteriors superiors al límit elàstic. És pròpia dels materials de major duresa.

Fatiga: Quan un material se sotmet a esforços de diferent magnitud i sentit, es trenca, amb càrregues inferiors a la de rotura amb càrrega constant. Hi ha tres períodes: incubació (distorsió atòmica i fisures microscòpiques), fisuració progressiva (augment de les fisures) i ruptura (trencament després d'una escassa deformació).

A partir d'aquests conceptes generals, la ciència concreta que ens ofereix un camp interpretatiu més d'acord amb les nostres necessitats és la tribologia, ja que contempla el comportament dels materials en moviment. A més, coincideix plenament amb la nostra recerca en l'objecte principal d'estudi: els instruments d'ús, les seves propietats i el seu desgast. Cal dir, però, que les roques són un camp d'aplicació poc treballat en tribologia, essent majoritaris els estudis dedicats als metalls i a les ceràmiques. La reologia, tot i compartir amb la tribologia una sèrie de conceptes i principis bàsics (esforç, deformació, fractura...) i tenir aplicacions concretes en el camp de les roques, té un enfocament més estàtic del comportament i del fluid dels materials davant l'esforç, i contempla els factors principals que intervenen en les deformacions a una escala més gran que la de la problemàtica que ens ocupa.

En tribologia, s'estudien sistemes amb presència de dos o més cossos en un contacte de superfície mecànic no estàtic i d'un determinat medi interfacial. L'objecte d'aquesta ciència és la reducció de la fricció i el control del desgast que es produeix en els cossos que experimenten un lliscament o una rotació sota una càrrega. Així doncs, fricció i desgast són els camps d'estudi que ens interessen de la tribologia, més que no pas la seva principal aplicació directa, la lubricació.

La fricció és la resistència al moviment relatiu dels cossos en contacte i s'origina a partir de complicades interaccions moleculars i mecàniques entre ells. La fricció entre superfícies lliscants es deu a diversos efectes combinats d'adhesió entre les superfícies planes, solcada per partícules de desgast o aspreses de la superfície, i deformació d'aquestes darreres. La relativa contribució d'aquests components depèn del material específic utilitzat, de la topografia de la superfície, i de les condicions del medi interfacial de lliscament (Bhushan, 1991: 2.2).

El component d'adhesió es deu a la formació i ruptura d'enllaços interfacials, està en funció del grau d'interpenetració de les aspreses i de la composició de les superfícies, i depèn bàsicament de la força d'allisada. Si hi ha d'haver lliscament, és necessària una força de fricció per allisar els plans tangencials més tous de les àrees de contacte real. Les aspreses presents en les superfícies es deformen elàsticament o plàstica segons l'índex de plasticitat del material.

Quan una de les superfícies en lliscament és més dura que l'altra, les aspreses de la primera poden penetrar i solcar la més tova. La solcada de la superfície tova pot ocórrer també com a resultat de partícules de desgast impactades. En un moviment tangencial, la resistència a la solcada s'uneix a la força de fricció.

Quan les aspreses de dues superfícies en lliscament entren en contacte, han de deformar-se de manera que el camp de desplaçament resultant sigui compatible amb la direcció de lliscament (fig. 5.3). Quan aquesta deformació és d'ordre plàstic, es dona una dissipació d'energia molt major que quan és d'ordre elàstic.

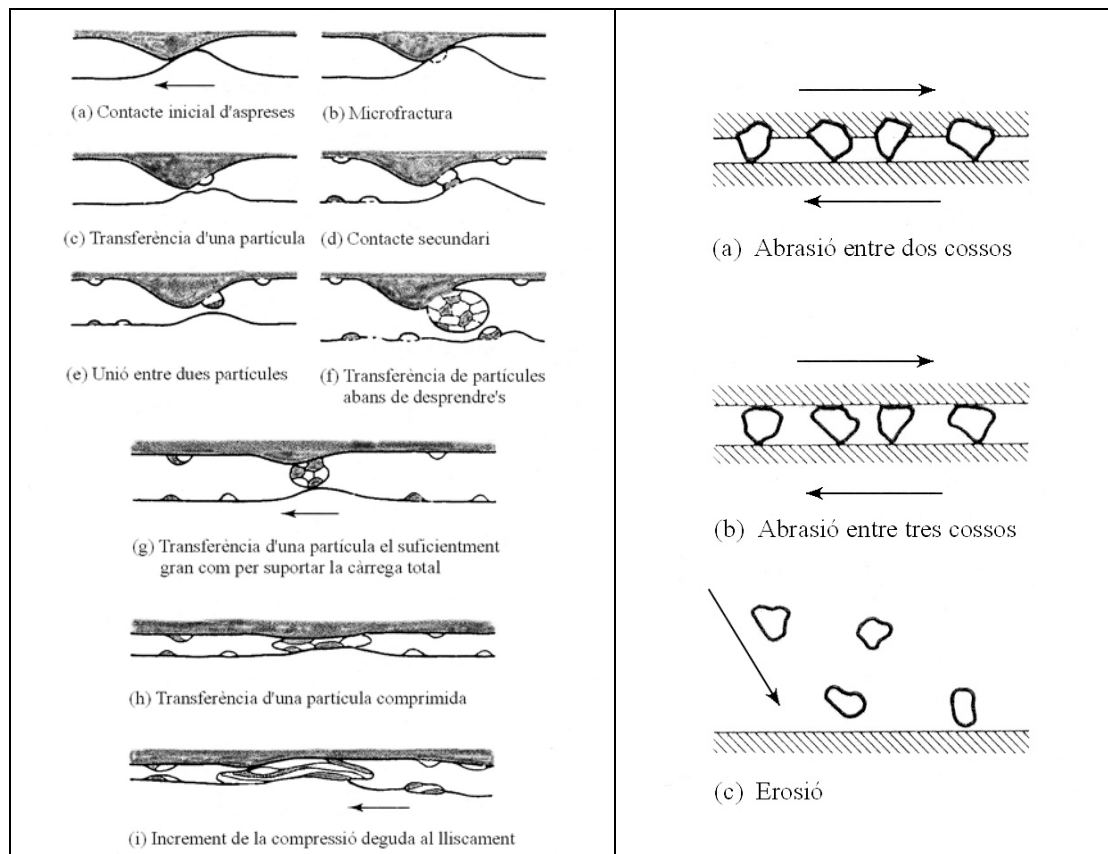


Figura 5.3. Formació de partícules de transferència per ruptura d'aspreses i agregació (extret de Hutchings, 1992: 100).

Figura 5.4. Abrasió entre dos i entre tres cossos (a i b); erosió (c) (extret de Hutchings, 1992: 133).

El desgast, en tribologia, està definit com “*the progressive loss of substance from the operating surface of a body occurring as a result of relative motion at the surface*” (OECD, 1969: 62). És, doncs, un procés de remoció de material que es dona en les superfícies d'uns sòlids quan aquestes entren en contacte per lliscament o rotació.

El comportament de desgast d'un material és un procés complex, en el qual hi ha implicats diversos mecanismes i factors. Tot i que normalment aquests es donen conjuntament, s'estudien de forma aïllada per tal de comprendre'ls millor. Així doncs, el desgast es classifica segons el tipus de moviment i els mecanismes implicats en: adhesiu, abrasiu, per fatiga, corrosiu, erosiu i induït per un arc elèctric (Bhushan, 1991: 2.13).

1. El *desgast adhesiu* és un procés que s'inicia per les unions interfacials adhesives que es formen si els materials sòlids estan en contacte a una escala atòmica. A partir de l'aplicació d'una càrrega normal, la pressió local sobre les aspreses esdevé extremament alta. En alguns casos, se supera la pressió de resistència, i les aspreses es deformen plàsticament fins que l'àrea de contacte ha crescut suficientment per a suportar la càrrega aplicada. Un lliscament continu causa l'allisat i la creació de noves

unions. La cadena d'esdeveniments que porten a la generació de partícules de desgast inclou l'adhesió i fractura de les superfícies en contacte. Aquests dos processos estan molt influenciats pel medi interfacial.

2. El *desgast abrasiu* es defineix genèricament com el deteriorament d'una superfície per un material més dur, encara que es dona també pel contacte amb un d'igual o menor duresa. Es pot produir per la fricció amb una superfície o per la inclusió d'un material, generalment en petites partícules, en la fricció entre dos materials.

Es parla de desgast abrasiu entre tres cossos quan es dona la presència de partícules dures que es mouen entre les dues superfícies en lliscament, i generalment és més suau (fig. 5.4. A i B). En aquest procés, les aspreses del material més dur pressionen la superfície més tova, i es dona un fluid plàstic d'aquesta al voltant de les aspreses de la més dura, on també apareixen fractures. “*In abrasive wear, material is removed or displaced from a surface by hard particles, or sometimes by hard protuberances on a counterface, forced against and sliding along the surface*” (Hutchings 1992: 133).

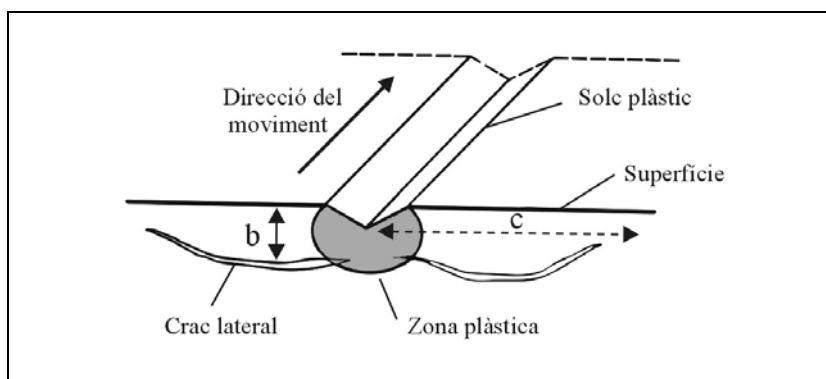


Figura 5.5. Esquema de la remoció de matèria en un material fràgil per extensió dels cracs laterals a partir d'un solc de deformació plàstica (extret de Hutchings, 1992: 152).

El comportament de l'abrasió depèn dels tipus de materials implicats. Es parla de *desgast abrasiu per deformació plàstica* quan la partícula abrasiva es desplaça sobre un material dúctil, que flueix sota una pressió d'indentació. Això forma un solc en el material, i el desgast s'entén com la remoció d'una part de material que és desplaçat del solc.

En materials fràgils, es parla de *desgast abrasiu per ruptura fràgil*. Quan un material d'aquest tipus és indentat per un cos rom a una càrrega suficient, i l'estrès de contacte es manté elàstic, es forma un crac de con hertzià. Si l'indentador llisca sobre la superfície es forma una sèrie de cracs cònics incomplets, que intersecten la superfície amb una línia d'arcs circulars. Quan l'indentador és angulós, forma un solc en lliscar sobre la superfície, i creixen cracs laterals cap a la superfície des de la base

de la regió subsuperficial deformada, conduïts per l'estrès residual associat al material deformat (fig. 5.5).

3. El *desgast per fatiga* es deu a les variacions en l'estrès durant el contacte entre dues superfícies. Aquest d'estrès, i, per tant, la falla resultant, es donen principalment a la subsuperfície.

La generació de cracs en profunditat pot respondre a diversos processos, i s'explica en base a la teoria de la dislocació. Quan dues superfícies en lliscament entren en contacte, les seves aspreses es deformen per repetides càrregues fins a generar superfícies relativament llises. Eventualment, durant aquest procés, la fricció indueix a la deformació plàstica d'allisat que s'acumula per repetides càrregues, i s'arriben a formar cracs subsuperficials. La seva propagació cap a la superfície està inicialment inhibida per la pròpia pressió, però un augment o prolongació d'aquesta causa la propagació dels cracs paral·lelament a la superfície. Aquests cracs, finalment, arriben a la superfície, formant descamacions sobre la mateixa (fig. 5.6).

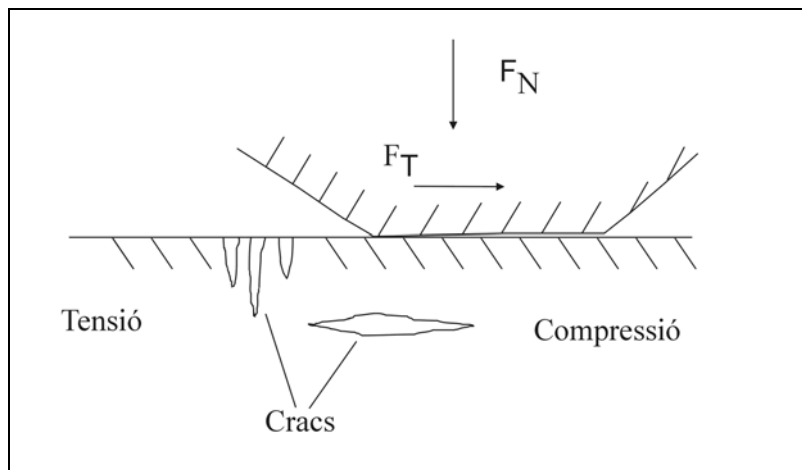


Figura 5.6. Esquema del desgast per fatiga degut a la formació de cracs de superfície i subsuperfície.

4. En el *desgast corrosiu*, la interacció dinàmica entre el medi i el material de les superfícies implicades juga un paper primordial. En un primer pas, les superfícies en contacte reaccionen amb el medi, i es formen productes de reacció a la superfície. Posteriorment, es dona l'atracció dels productes de reacció com a resultat de la formació de cracs i/o de l'abrasió.

5. El *desgast erosiu* és el produït per partícules dures que colpegen una superfície i en remouen material. En el desgast abrasiu, la quantitat de material remogut depenia de la pressió normal de les partícules contra la superfície i de la distància lliscada, en l'erosió, en canvi, l'extensió del desgast depèn del nombre i la massa de les partícules que colpegen la superfície, així com de la seva velocitat d'impacte. Com en l'abrasió, s'hi impliquen mecanismes de deformació plàstica i de fractura fràgil (fig. 5.4.C).

El desgast erosiu per cavitació es dona quan un sòlid i un fluid estan en moviment relatiu i les bombolles inestables del fluid impacten a una relativament alta velocitat contra la superfície del sòlid. Les bombolles impacten el sòlid i col·lapsen, la qual cosa crea ones de xoc a la superfície del sòlid, que resulten en alliberació de material de la mateixa i en una superfície final rugosa.

Aquests models de desgast han estat elaborats i aplicats bàsicament en el camp dels metalls, però també hi ha estudis en materials ceràmics. Aquests, difereixen dels metàl·lics bàsicament quant als seus enllaços interatòmics. Això els confereix una limitada capacitat de fluid plàstic a temperatura ambient. En comparació amb els metalls, els materials ceràmics tendeixen a respondre molt més a l'estrès en forma de fractura fràgil. Aquesta, quasi absent en els metalls, normalment es dona al llarg dels límits dels grans, portant al despreniment de grans individuals i a la formació d'una superfície rugosa.

2.3. El procés de deformació per l'ús en objectes lítics

Els punts de partida del model de deformació per ús de les superfícies dels instruments lítics que proposem són els següents:

1- En el moment en què s'utilitza una eina entren en contacte dues superfícies: la de l'eina i la de la matèria intervinguda.

2- El contacte entre aquestes dues superfícies és dinàmic, ja que, mitjançant l'aplicació d'una càrrega, almenys una d'elles, normalment la de l'eina, llisca o rota sobre l'altra.

3- La resistència al moviment relatiu dels cossos provoca una fricció entre les dues superfícies.

4- Com a resultat de la fricció, es generen una sèrie de deformacions en la superfície de contacte de l'eina. Aquestes deformacions són tant de tipus fràgil (fractures) com plàstiques (compressió i translocació). L'efecte combinat d'aquests fenòmens al llarg del procés de treball provoca el desgast de la superfície de l'eina per atrició i poliment.

2.3.1. Les variables del procés

El procés que dona lloc a les deformacions d'ús en la superfície dels instruments lítics és d'una gran complexitat, donat el gran nombre de variables que hi intervenen. Com veurem, les nombroses combinacions, quant a presència i incidència diferencial, dels factors que intervenen en el procés de deformació, generen un ampli

ventall de situacions pel que fa a l'activació i desenvolupament dels diferents mecanismes de desgast. Dins d'aquesta dinàmica s'entenen les similituds existents entre les deformacions provocades pel treball sobre diferents matèries, i la variabilitat existent en les generades per la intervenció sobre un mateix material.

Les variables principals a tenir en compte en el procés de desenvolupament de les deformacions per ús sobre la superfície de les eines lítiques són:

1. *L'eina*: les característiques i propietats físiques de la roca amb què està elaborada, així com la seva estructura morfològica (angle i delineació del tall actiu).

2. *La matèria primera treballada*: les propietats físiques pròpies de cada matèria específica (duresa, rigidesa, plasticitat, etc) i l'estat en què es troba (fresc, sec, mullat, etc.) en la mesura que pot modificar les seves propietats.

3. *L'acció realitzada*: angle de treball i cinemàtica de l'instrument.

4. *La càrrega*: força de treball, intensitat i forma d'aplicació.

5. *El medi interfacial*.

La interrelació d'aquestes variables determinarà la superfície de contacte entre superfícies, la força de fricció i els seus components d'adhesió, solcada i deformació.

Un dels factors a tenir en compte en tots els casos és la càrrega que s'aplica sobre l'instrument i la seva forma d'aplicació. Aquestes dues variables poden condicionar substancialment la resposta de la superfície de contacte de l'eina, incidint sobre les dimensions de l'àrea de contacte, el nivell d'adhesió de les superfícies i, consegüentment, sobre la força de fricció. En aquest sentit, és simptomàtic observar la resposta diferencial de les superfícies davant d'una càrrega aplicada per impacte o d'una aplicada per pressió. Així mateix, poden influir en aquest aspecte tant la massa de l'eina com l'ús de màncs, en la mesura que incideixen sobre la força de càrrega.

A continuació, per simplificar l'explicació, però sense oblidar que en els casos reals s'ha de valorar la incidència de la intensitat de la càrrega i de la seva forma d'aplicació, avaluarem el paper de la resta de factors sense introduir aquestes variables.

Hi ha una sèrie de factors que determinen, a nivell general, les condicions de contacte entre superfícies, especialment els aspectes relacionats amb les dimensions de l'àrea de contacte i el grau d'adhesió entre superfícies. Els més importants són les propietats físiques de la roca amb que està elaborada l'eina, la seva estructura morfològica, la seva forma d'ús i les característiques físiques de la matèria treballada. La interrelació entre aquests factors i, en base a aquesta, el pes específic de

cadascun durant el procés de treball, determinarà el grau de penetració de l'eina en la matèria treballada i, per tant, la superfície de l'eina susceptible de patir deformacions.

Pel que fa al grau d'adhesió entre superfícies, podem distingir entre el comportament general de l'objecte i el comportament a escala micro. A nivell del conjunt de la superfície de contacte de l'eina, la tensió es repartirà de forma homogènia o gradual en funció de la tasca realitzada i del comportament general de la matèria treballada. La distribució de la tensió determinarà la de les deformacions sobre l'àrea de contacte. Generalment, les matèries rígides tendiran a mantenir un contacte homogeni i les plàstiques irregular. El paper de l'acció realitzada rau en les modificacions que pot provocar sobre l'estructura de la matèria intervinguda. L'exemple més clar el trobem en les accions longitudinals, on, sobre els materials rígids es genera un solc, mentre que sobre els plàstics es genera un tall que produeix una separació del material, i, conseqüentment, una disminució de la superfície i intensitat de la fricció.

A nivell micro, la cinemàtica de l'objecte no té gairebé importància, ja que, sigui quina sigui, el tipus de contacte serà el mateix, independentment del moviment que efectui l'eina. A aquesta escala, un dels factors que esdevé fonamental en l'evolució de les deformacions d'ús són les aspreses de les superfícies, especialment les de la superfície de l'eina. Si tenim en compte que el procés de deformació per fricció d'una superfície de contacte és, bàsicament, un procés d'eliminació d'aspreses, podem adonar-nos de la seva importància.

Les aspreses de la superfície creen condicions de contacte específiques que influeixen en l'evolució de les deformacions. Aquest factor té una especial incidència en la trama de les deformacions i en el seu aspecte. En el cas de les varietats de roca de microrelleu irregular i/o abrupte, la presència de nombroses aspreses, i la seva progressiva eliminació per desgast, ofereixen una gran variabilitat de deformacions en funció de la fase del procés en què es trobi. En aquest sentit, la variabilitat interna de les deformacions provocades pel mateix treball es deu a que es tracta de diferents estadis dins d'un mateix procés de deformació. Aquests, venen definits per la quantitat d'aspreses presents, i especialment, com veurem més endavant, en la mesura en què els residus procedents de la seva eliminació modifiquen la composició del medi interfacial.

A aquest nivell, les propietats de la matèria treballada són rellevants en la mesura que condicionen el grau de contacte i d'adhesió entre les superfícies, oferint cada material una resistència específica al lliscament, que repercuteix en la tensió a la que es veu sotmesa la superfície de l'eina. Un altre factor important es dona quan la matèria treballada conté elements abrasius, tant per l'efecte que poden tenir sobre la superfície de l'eina en el contacte directe entre superfícies, com per la seva incorporació al medi interfacial.

En funció de les variables esmentades, la relació entre el microrelleu de la superfície de l'eina i el grau de solcada que aconseguixi sobre la superfície de la matèria intervinguda determinaran el grau de contacte d'ambdues superfícies en el pla vertical. La fricció diferencial de la superfície de contacte de l'eina permet explicar tant la trama del desgast com les variacions laterals cap a la cara.

D'aquesta manera, almenys a nivell teòric, el treball de matèries toves hauria d'afectar més en la vertical, mentre que el de les matèries dures ho faria predominantment en el pla horitzontal. Això explicaria la tendència que tenen les deformacions generades pel treball de matèries toves a tenir un aspecte més voluminós, enfront a la tendència a ser planes de les que han treballat matèries dures. No obstant, no es tracta d'una relació lineal, ja que, com veurem més endavant, les característiques del medi interfacial poden modificar aquest comportament.

Així mateix, les varietats de roca amb poques aspreses poden no passar per alguns estadis de deformació, o patir-los durant un període temporal molt breu, i passar ràpidament a activar mecanismes de desgast que, en el cas de les varietats de roca de textura rugosa, es donen en estadis avançats del procés.

El factor fonamental, que afecta al conjunt de les relacions exposades fins ara, és la composició i característiques del medi interfacial, així com les seves variacions al llarg del procés de treball. El medi interfacial és el resultat de la inclusió en l'espai existent entre la superfície de l'eina i la de la matèria treballada de restes procedents del desgast d'ambdues, d'elements presents en l'entorn incorporats de forma accidental o, en alguns casos, de materials introduïts intencionalment per l'home per actuar com a abrasius o com a lubricants. El seu paper en el procés de deformació de les superfícies és d'una gran importància, ja que modifica les condicions de contacte entre les superfícies. El medi interfacial influeix en les condicions de fricció, ja sigui en forma de lubricant, facilitant el lliscament i inhibint algunes formes de desgast, o bé aportant partícules abrasives que actuen sobre la superfície de l'eina. En aquest darrer cas, el component de solcada derivat de l'acció de les partícules abrasives s'ha de sumar a la força de fricció.

A nivell teòric, en absència del medi interfacial, el tipus de deformació vindria donat, exclusivament, per la resposta de la superfície de l'eina a la tensió generada per la força de fricció resultant del contacte dinàmic entre les dues superfícies implicades. Així doncs, els factors a tenir en compte a l'hora d'explicar les deformacions produïdes serien, tan sols, els derivats de la relació que s'estableix en base a les característiques físiques pròpies de les dues matèries en contacte, a la càrrega i la seva forma d'aplicació. No obstant, aquestes condicions, en un procés de treball normal, no es donen mai en estat pur.

Per aquesta raó, no es fàcil establir una relació directa entre les deformacions creades i les característiques físiques del material treballat. Els factors que fan que

aquesta relació no sigui lineal es troben presents, bàsicament, en el medi interfacial. Les característiques d'aquest i, molt especialment, les partícules abrasives que incorpora, són alguns dels principals agents causants de les deformacions sobre les eines lítiques i de la variabilitat de mecanismes de desgast que poden intervenir en un procés de treball.

Així doncs, les modificacions en la superfície d'una eina lítica no són el resultat d'una sola forma de desgast ni d'un procés lineal. Durant l'ús d'un objecte es donen de forma simultània diferents tipus de desgast, que interaccionen entre si. La seva no és contínua ni regular durant el procés de treball. Depèn, com ja hem vist, de diferents factors que es troben interrelacionats, però entre els quals destaquen la rugositat de la superfície de l'eina i les característiques del medi interfacial. Per aquest motiu, algunes formes de desgast es donen principalment en determinades fases del procés, o bé hi són presents de forma intermitent, mentre que d'altres actuen amb major o menor mesura de forma contínua. L'acció de les contínues es veu limitada o inhibida en alguns moments per l'acció d'altres que, tot i no ser-ho, caracteritzen puntualment alguna fase del procés. Seria el cas, per posar un exemple, dels episodis de microfractura en fases de rugositat elevada, i la seva repercussió sobre les altres formes de desgast.

L'aspecte final de superfícies deformades és diferent en funció de la importància relativa que hagi tingut cada forma de desgast al llarg del procés i, en molts casos, varia en funció de quin sigui el moment en què aquest s'ha aturat. Per això, encara que existeixin determinats caràcters específics o tendències associades al treball dels materials concrets, que fan factible la seva determinació amb cert grau de fiabilitat, el fet que el treball de diferents materials pugui donar lloc a deformacions molt similars, i que el treball sobre un mateix material presenti una gran variabilitat, introdueixen un alt grau de dificultat en la presa de decisions en l'anàlisi funcional, especialment si l'estat de conservació de l'eina no és òptim.

2.3.2. Les deformacions i els mecanismes de desgast

A continuació, repassarem els diferents tipus de deformació i els mecanismes de desgast que es poden donar durant un procés de treball. L'activació de cadascun d'ells, el pes específic que tinguin en cada moment, i la incidència en el conjunt del procés determinen l'aspecte final de la superfície deformada.

A. Tipus de deformació

A1. Deformació elàstica

La resposta de la superfície de l'eina a la pressió a què es veu sotmesa és en un primer moment, d'ordre elàstic. Si l'estructura de l'eina manté una deformació

proporcional a la càrrega, torna a l'estadi inicial un cop la càrrega deixa d'actuar. Aquest tipus de deformació, un cop finalitzat l'esforç, no es documenta ni experimentalment ni arqueològica.

A.2 Fractura fràgil, deformació plàstica i abrasió

La fractura fràgil (a nivell macroscòpic i microscòpic), la deformació plàstica i l'abrasió són els fenòmens responsables del desgast de la superfície de les eines lítiques. Tots ells es donen simultàniament i de forma combinada al llarg del procés de treball, donant lloc, en funció de la incidència de cadascun, a les diferents deformacions documentades en el nostre treball.

B. Mecanismes de desgast

B.1. Desgast per fractura fràgil

La fractura fràgil és la resposta de l'estructura de l'eina a un esforç que no pot dissipar-se mitjançant deformacions elàstiques i/o plàstiques. Aquest fenomen es produeix en el moment en què la tensió deixa de ser proporcional a la deformació (transició elastoplàstica). Coincideix en el temps amb la generació de deformacions plàstiques. Dins de la fractura fràgil podem distingir dos dominis, en base a l'escala a què es produeixen: la macroscòpica i la microscòpica. La fractura fràgil a nivell macroscòpic, el que comunament s'anomena escantellament, es manifesta en el tall, amb fractures de mida mil·limètrica o submil·limètrica, que s'estenen cap l'interior de les cares. És el resultat de l'adaptació de l'estructura morfològica del tall a l'esforç a què es veu sotmès. A nivell microscòpic, la fractura fràgil es dona tant en el tall com en la superfície de desplaçament dels objectes, afectant a les rugositats que ofereixen resistència al lliscament.

Les eines més susceptibles de patir aquests tipus de desgast són les fabricades amb roques fràgils i d'estructura rígida, si bé es dona en tots els materials. Altres factors que influeixen en la intensitat d'aquesta forma de desgast, especialment a nivell macroscòpic, són la duresa de la matèria treballada, l'angle del tall de l'eina, l'angle d'atac i la càrrega que se li aplica.

Normalment, a nivell macroscòpic, en un procés de treball sobre un mateix material, amb càrrega i angle d'atac continu, aquest tipus de deformació es dona en les primeres fases de treball. Inicialment, el tall busca un equilibri a l'esforç a què es veu sotmès. Si l'esforç no es pot dissipar mitjançant deformacions elàstiques i/o plàstiques, els punts del tall actiu que es troben sotmesos a una tensió superior a la seva capacitat de resistència es fracturen. Aquest procés continua fins que s'aconsegueix una distribució regular de la tensió. Un cop s'ha aconseguit l'equilibri,

la fractura fràgil gairebé desapareix, cedint el predomini a altres formes de desgast. No obstant, un augment de la càrrega que s'aplica sobre l'eina, una variació en l'angle d'atac, o variacions en la matèria treballada poden provocar noves distribucions de forces, que donen lloc a nous desequilibris i, consegüentment, a nous episodis de fractura fràgil.

En general, els episodis de fractura fràgil macroscòpica són incompatibles amb la conservació de les deformacions generades per altres formes de desgast, ja que les fractures s'emporten bona part de la superfície deformada. D'aquesta manera, en els casos reals, la presència d'escantells és inversament proporcional a la presència de deformacions generades per altres tipus de desgast.

B.2. Desgast adhesiu

Quan la superfície de l'eina entra en contacte no estàtic amb la de la matèria intervinguda mitjançant l'aplicació d'una càrrega, es produeixen una sèrie d'unions interfacials adhesives. A partir d'aquest moment, les aspreses d'ambdues superfícies en contacte es veuen sotmeses localment a pressions elevades. En els punts en què es supera la pressió de resistència, les aspreses es fracturen o es deformen plàsticament fins que l'àrea de contacte ha crescut suficientment per a suportar la càrrega aplicada. Aquest fenomen es dona de forma continuada mentre dura l'acció, ja que el lliscament continuat de la superfície de l'eina sobre la de la matèria intervinguda causa l'allisat d'unions i en crea de noves. Durant el desenvolupament d'aquest procés, part del material que es desprèn de les superfícies en contacte passa a formar part del mitjà interfacial i en modifica la composició. Aquest és un procés extremadament dinàmic ja que, alhora, les característiques del mitjà interfacial incideixen sobre les condicions de contacte de les superfícies, el que pot provocar nous canvis en la composició del mitjà interfacial, especialment pel que fa al nombre i mida de les partícules de desgast procedents de la superfície de l'eina.

Com podem observar, en aquest mecanisme de desgast, es produeixen fenòmens de fractura fràgil a escala microscòpica, que són els principals responsables de la pèrdua de matèria de la superfície de l'eina. Així mateix, és el principal agent aportador de partícules abrasives, procedents de la superfície de l'eina, al medi interfacial.

Els altres fenòmens que es donen dins d'aquest mecanisme de desgast, són els d'ordre plàstic, derivats del comportament plàstic compressiu de l'estructura de la roca i de fenòmens de translocació.

1. *Comportament plàstic compressiu.* Les unions interfacials que es produeixen durant el procés de treball fan que les aspreses de la superfície de l'eina es vegin sotmeses a repetides càrregues, que tendeixen a allisar-les. L'esforç que pateixen durant la fricció fa que l'energia es dissipï en part en forma de deformacions plàstiques, especialment compressió de l'estructura cristal·lina, per reducció dels espais intermoleculars i intercristal·lins, que s'acumula per repetides càrregues.

Aquest tipus de comportament és el principal responsable de les superfícies llises i les textures fines, que es donen, localment o de forma generalitzada, en zones en què han desaparegut totalment o significativa les aspreses de la superfície de l'eina.

2. *Translocació.* Es produeix quan, a nivell local, es donen unes condicions de tensió el suficientment importants com per produir l'allisat de la superfície per remoció de material de la seva posició original i el seu desplaçament a un punt adjacent, on hi ha redeposició o adhesió en un estat deformat. Aquest comportament es dona habitualment en situacions de contacte d'alta energia, derivades d'una aplicació de la càrrega per impacte, o bé per l'acció de partícules abrasives.

Aquest fenomen no es produeix com a conseqüència d'un comportament plàstic fluid degut a fenòmens de dissolució o fusió. L'únic comportament plàstic fluid que hem pogut documentar en la nostra sèrie experimental està relacionat amb fenòmens mecànics. En la majoria dels casos, el grau d'adhesió entre el material translocat i la superfície on s'ha dipositat és baix, com demostra el fet que aquest tipus de morfologies es vegin afectades pels processos de neteja amb cubeta d'ultrasons i siguin les primeres que desapareixen, per despreniment, en els experiments relatius a les alteracions postdeposicionals lligades a medis fluvials.

B.3. Desgast abrasiu

En el procés de desgast abrasiu, les aspreses de la superfície de la matèria treballada o les partícules abrasives presents en el medi interfacial pressionen la superfície de l'eina, donant-se, en aquesta, una remoció de material per efectes combinats de microsolcada, microtall, microfractura i fluid plàstic associat. En aquest sentit, es pot parlar d'un desgast abrasiu per deformació plàstica i d'un desgast abrasiu per fractura fràgil.

La duresa, dimensions i morfologia (especialment l'angulositat) de les partícules presents en el medi interfacial, així com la seva força d'incidència sobre la superfície de l'eina, determinaran el tipus de desgast i les figures de fregament que s'hi generaran. Així mateix, és important la seva quantitat i la capacitat que tenen d'incidir sobre la superfície. La capacitat d'incisió té molt a veure amb el medi

interfacial i amb les característiques del treball. Així, un medi interfacial poc plàstic (fig. 5.7. B i D) facilitarà l'acció de les partícules, mentre que un de plàstic (fig. 5.7. A i C), especialment si les partícules són poc nombroses, pot incloure-les i no permetre el contacte amb la superfície de l'eina o reduir la força d'incisió per dissipació de l'energia cap al medi interfacial. Per altra banda, el tipus d'acció també influeix en l'efecte de les partícules. Les longitudinals generen un solc per on es desplaça el tall actiu, que facilita que els residus que formen el medi interfacial es mantinguin en contacte amb la superfície de l'eina, ja que hi queden atrapats. La duresa de la matèria treballada influirà en la mesura que les parets del solc siguin més o menys elàstiques i puguin absorbir més o menys la pressió generada entre la superfície de l'eina i el medi interfacial. Quan l'energia es dissipa majoritàriament cap a les parets del solc (fig. 5.7. C i D), l'efecte de les partícules serà menor que quan això no succeeix (fig. 5.7. A i B). En el cas dels treballs que no produeixen un solc, és més fàcil que es doni un desplaçament dels residus que genera el treball cap a zones de menor pressió, i que, per tant, l'acció de les partícules del medi interfacial sigui menor, o almenys, més limitada tant espacialment com temporal.

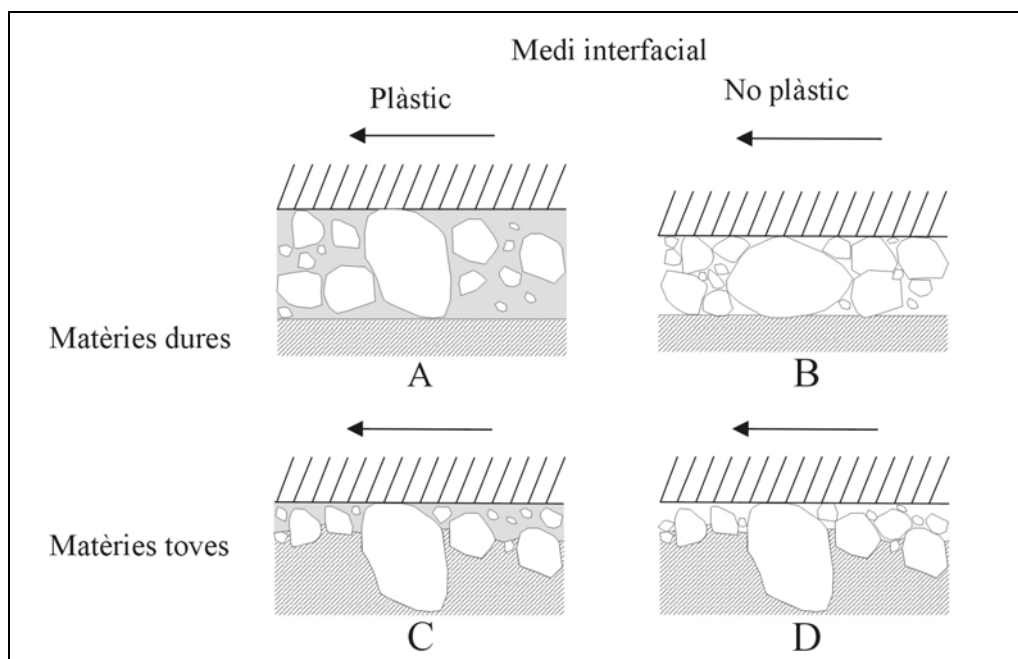


Figura 5.7. Esquema del comportament de les partícules abrasives en funció del medi interfacial i de la duresa de la matèria intervinguda.

En termes generals, el comportament del medi interfacial i, per tant, de les partícules abrasives que s'hi troben incloses, condiciona la zona d'acció d'aquestes. El medi interfacial i les partícules abrasives es veuen desplaçades de les zones de màxima tensió cap a zones on aquesta és menor, és a dir, es traslladen des de la vora del tall cap a la cara de desplaçament. A més, dins d'aquest procés, les partícules abrasives pateixen una selecció en funció de la seva mida i de la gradació de la tensió derivada del grau de contacte entre les superfícies. Per aquest motiu, especialment en els treballs que creen un solc per on es desplaça el tall de l'eina, les figures de fregament causades per les partícules abrasives no es disposen en l'extrem del tall sinó

en la zona immediata. De la mateixa manera, aquest comportament permet explicar perquè, en molts casos, les estries de majors dimensions es troben en la zona deformada més allunyada de la vora o, de forma isolada, en zones immediates a aquesta (fig. 5.8).

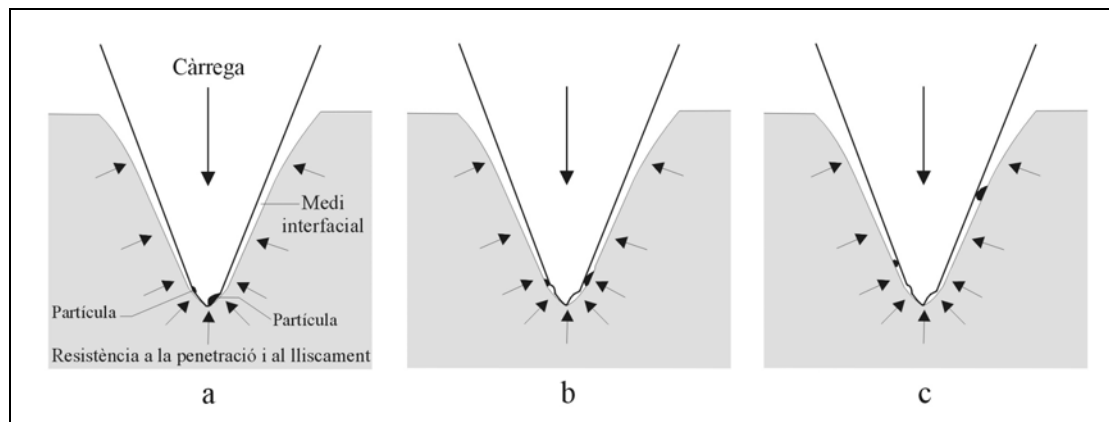


Figura 5.8. Esquema del desplaçament diferencial en el medi interfacial de les partícules abrasives procedents de la microfractura del tall.

Podem concloure, doncs, que el desgast per partícules abrasives no depèn tan sols de la presència o no d'aquests elements, sinó que hi intervenen una sèrie de variables que interrelacionen entre elles, i condicionen el tipus i la intensitat de les deformacions.

B.4. Desgast per fatiga

Durant el procés de treball, part de l'esforç a què es veu sotmesa la superfície de l'eina es dissipa mitjançant deformacions plàstiques, especialment per una progressiva compressió de l'estructura cristal·lina. Les repetides càrregues sofertes fan que en subsuperfície es donin continuadament variacions en l'esforç, el que porta a la formació de cracs subsuperficials. La propagació d'aquests cracs és inicialment inhibida per la pròpia pressió a la que es veu sotmesa la superfície. No obstant, un augment o prolongació de la pressió causa l'expansió dels cracs paral·lelament a la superfície, fins que, finalment, arriben a l'exterior, i donen lloc a descamacions.

Aquesta forma de desgast acostuma a donar-se en fases avançades del procés de deformació. La seva acció incideix de forma acusada en la presència de partícules abrasives en el medi interfacial, motiu pel qual s'associa a episodis de desgast abrasiu força virulents i a la presència de nombroses figures de fregament.

B.5. Altres mecanismes de desgast

Totes les deformacions que hem pogut observar en la nostra col·lecció experimental es poden explicar en base als tipus de desgast que acabem d'exposar. No

obstant, no podem descartar taxativament que es donin processos de dissolució química de les superfícies, ja que teòricament són possibles. El que sí podem afirmar és que nosaltres no els hem observat, el que implica que, de donar-se, ho farien a una escala d'àngstroms, que no seria apreciable amb els mètodes i tècniques que hem utilitzat en el nostre treball. Per tant, en aquest supòsit no serien, ni molt menys, un dels principals processos de deformació de les superfícies dels objectes.

El desgast corrosiu, tot i ésser teòricament possible, tampoc ha estat documentat en la nostra sèrie experimental. La presència de forats sobre la superfície deformada, que alguns autors havien relacionat amb fenòmens de corrosió, no són resultat d'aquest mecanisme de desgast. Com ja hem exposat en la presentació dels nostres resultats experimentals i en la discussió, es tracta de forats relictes, restes de les depressions existents en el microrelleu original de la superfície de l'eina, que el desgast no ha eliminat totalment.

El desgast erosiu s'inscriuria en el nostre cas dins de les deformacions postdeposicionals. Vindria donat per l'acció de partícules impactades, especialment en el cas d'objectes afectats per processos hídrics o eòlics, o bé per mecanismes de desgast derivats de la fricció, similars als documentats en el procés de desgast degut a l'ús, però amb condicions diferents, sobretot pel que fa al medi interfacial.

2.3.3. Model teòric de deformació

Un procés de deformació estàndard d'una superfície d'un objecte lític, que intervingués sobre un material més tou, es desenvoluparia de la següent manera:

Un cop l'eina comença a incidir sobre la matèria treballada s'inicia la fricció entre les dues superfícies, com a conseqüència de la resistència que ofereix la segona al desplaçament del instrument. En un primer moment, es donen deformacions de tipus elàstic que, de no superar el límit de resistència de l'estructura, no deixaran rastre. Si es supera aquest límit, s'entrarà dins del domini de la fractura fràgil i de les deformacions plàstiques. A nivell macro, es donaran episodis de fractura fràgil (escantellament del tall) que modificaran l'estructura morfopotencial del tall fins aconseguir un equilibri d'aquest en relació a l'esforç a què es veu sotmès (fig. 5.9.A).

A nivell micro, les aspreses de la superfície de l'eina es veuran sotmeses a una forta pressió per adhesió i començaran a patir fenòmens de microfractura i deformació plàstica (comportament plàstic compressiu i translocació). En el cas que s'hagin introduït elements abrasius en el contacte entre les dues superfícies es donarà, ja de bon començament, un desgast abrasiu, que marcarà el procés i relegarà a un segon pla les altres formes de desgast.

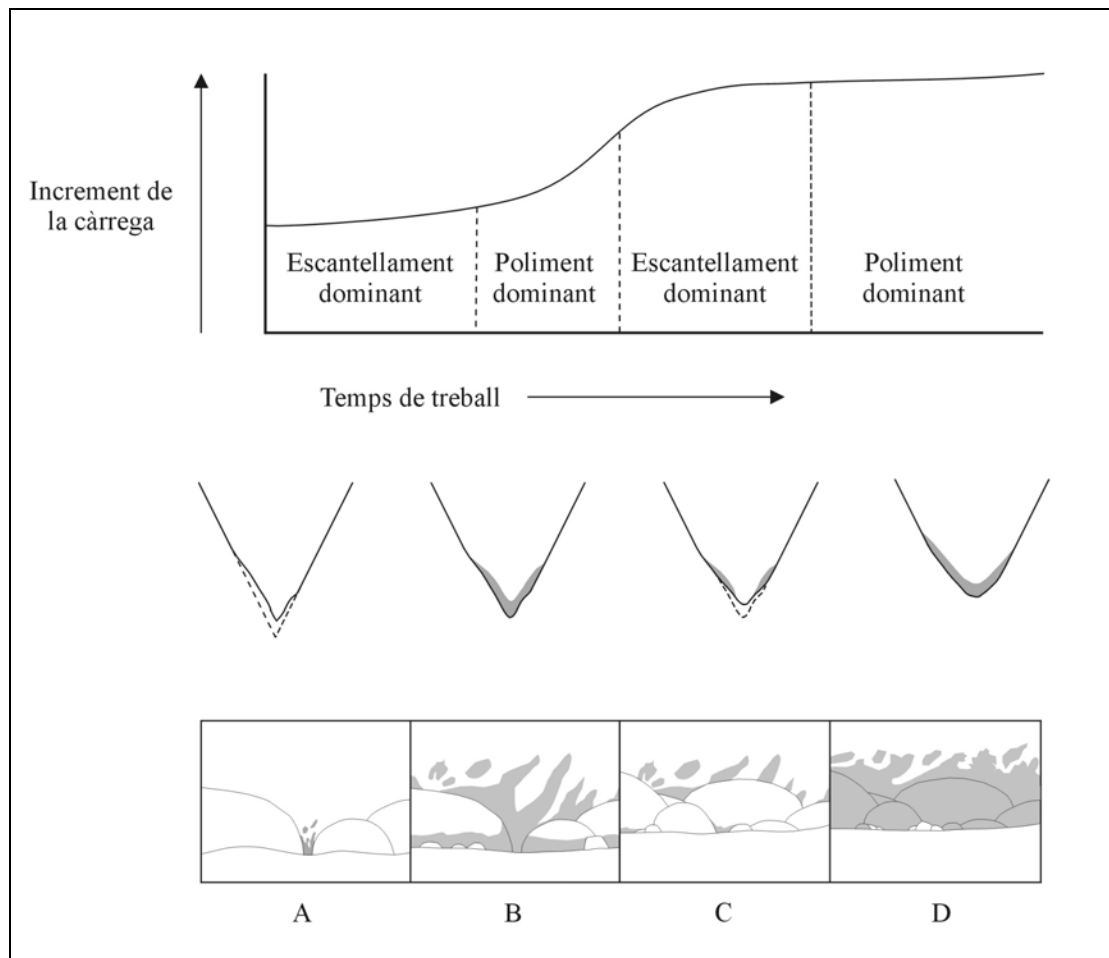


Figura 5.9. Esquema teòric del procés de desgast de la vora d'un instrument en una acció de tallar.

Si no s'ha introduït cap element abrasiu de forma intencional, els residus de la matèria treballada i les restes procedents de l'atracció de la superfície de l'eina generaran un medi interfacial propi, específic del contacte entre els dos materials. Les característiques del medi influiran en el nivell d'adhesió de les dues superfícies i, en el cas que hi siguin presents partícules abrasives, aquestes provocaran microsolcada, microtall i microfractura, associades localment a comportaments de fluid plàstic (desgast abrasiu). Els residus procedents de l'abrasió de la superfície retroalimentaran el medi interfacial, donant continuïtat a aquesta forma de desgast. Aquest procés s'aturarà en el moment en què les rugositats hagin estat eliminades i l'àrea de contacte sigui el suficientment gran com per a suportar la càrrega aplicada. La disminució en l'aportació de partícules al medi interfacial provocarà un descens en la incidència del desgast abrasiu, en favor d'un augment de les deformacions plàstiques, especialment del comportament plàstic compressiu. Això portarà a una estabilització de la superfície de l'eina, i a un progressiu descens del desgast i del desenvolupament de les deformacions.

Normalment, però, arribat aquest moment, l'eina ha perdut per desgast part de la seva capacitat d'interacció (fig. 5.9. B), fet que obliga a augmentar la càrrega per a fer-la operativa. Aquest increment de càrrega provoca més fenòmens de fractura fràgil

en el tall (fig. 5.9.C), que generen noves aspreses. Així doncs, es reinicia el procés però aquest cop, normalment, amb menys desenvolupament temporal, ja que la superfície torna a estabilitzar-se ràpidament (fig. 5.9.D).

Durant el procés o, més comunament, en les darreres fases de l'esforç, es donen cracs subsuperficials com a conseqüència d'un desgast per fatiga, que en superfície es manifesten en forma de descamacions, que provocaran noves rugositats que poden donar continuïtat al procés de desgast.

En el moment en què l'àrea de contacte sigui el suficientment gran com per a suportar la càrrega aplicada, l'aspecte de la superfície pràcticament no variarà, a no ser que es doni un augment de la càrrega o una variació substancial en la cinemàtica de l'objecte que provoqui nous contactes tangencials.

