

FATIGA EN ELS MATERIALS CERÀMICS

per

MARIA ROSA DALMAU

E.T.S. d'Arquitectura de Barcelona
Av. Diagonal 649. 08028 Barcelona

RESUM

El propòsit del present treball és d'ampliar la utilització de tècniques d'indentació a l'estudi de la fatiga dels materials fràgils. Els resultats obtinguts semblen indicar que la tècnica de la indentació pot ésser apropiada per a l'estudi de la fatiga en materials fràgils per l'interval de càrregues per les quals es produeixen esquerdes radials.

SUMMARY

The purpose of the present work is to extend the use of indentation techniques to the study of brittle material fatigue. The results seem to indicate that the repeated indentation technique may become a suitable one in brittle material fatigue studies in the radial crack load interval.

Els materials ceràmics constitueixen avui en dia un dels camps de desenvolupament més espectaculars dins els nous materials. Tendeixen a substituir plàstics i metalls a causa de llurs propietats mecàniques (eines de tall, coixins, etc.), òptiques (transmissió de IR, làser i làmpades de sodi d'alta pressió), elèctriques (cèl·lules solars, materials piezoelèctrics, termistors i substrats de circuits integrats) i per llur resistència a altes temperatures (motors, canonades, etc.) Demés, alguns tipus de ceràmiques són biocompatibles i poden ésser utilitzats com a substituïts d'ossos i articulacions, vàlvules car-

Aquest treball ha estat dut a terme amb un ajut de la CIRIT.

díiques, etc. (El material emprat en el present treball, per exemple, és una alúmina utilitzada per a fer pròtesis òssies).

Els materials ceràmics són sòlids inorgànics amb propietats no metàl·liques típiques i, en general, són combinació d'elements metàl·lics i no metàl·lics.¹

Les propietats dels materials ceràmics depenen altament de llur textura, tant a escala atòmica com a escala de micro- o macroestructura. La textura representa la clau i l'aspecte central de la ciència dels ceràmics que relaciona fabricació i propietats. Demés, un cert nombre de factors externs, particularment l'ambient, la temperatura i les condicions de les proves, són importants en determinar les propietats.

La propietat mecànica més característica dels materials ceràmics és la fragilitat, o sigui, el trencament catastròfic que segueix a una deformació quasi absolutament elàstica (fig. 1). Les fractures fràgils de propagació ràpida tenen lloc per l'aplicació d'una única càrrega suficientment gran, generalment associada a la preexistència d'una esquerda.

El trencament retardat que es produeix en vidres i materials ceràmics sota càrrega constant és un procés principalment controlat per factors corrosius de l'ambient, i hi té poca importància la influència d'esforços variables i invertits.

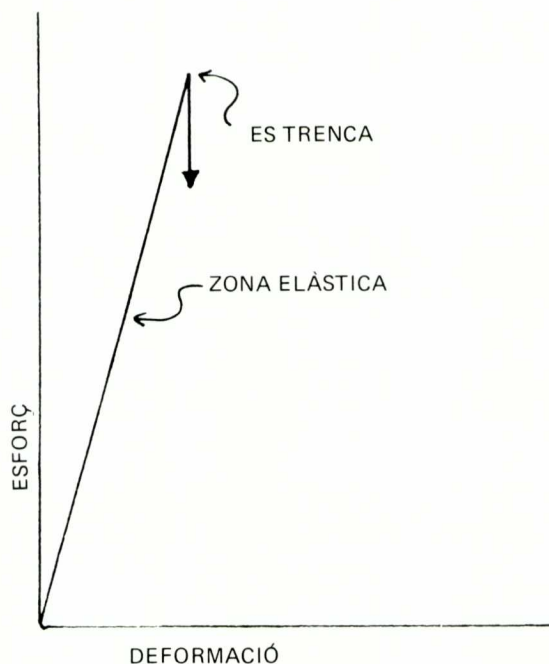


Figura 1. Corba esforç/deformació que indica comportament fràgil.

Un tipus diferent de fractura, molt important en enginyeria, que representa, probablement, més del 90% de totes les fractures que es produeixen, és l'anomenada fractura per fatiga. És el resultat acumulatiu d'un gran nombre d'aplicacions d'esforços, cap dels quals arriba a l'esforç de trencament del material i, generalment, ni tan sols arriben a l'esforç de fluència macroscòpica.

La fatiga pot resultar de la repetició d'una particular càrrega cíclica o d'una variació d'esforços absolutament fortuïta. El primer cas és, naturalment, més tractable per una reproducció experimental i l'anàlisi subsegüent. Una esquerda per fatiga comença, per regla general, en un punt d'alta concentració d'esforços i, gradualment, s'obre camí a través del material. Freqüentment la concentració d'esforços es produeix per una petita esquerda o damnatge preexistent. Una esquerda per fatiga es propagarà quan hom hi apliqui un esforç de tracció o de cisallament, però probablement no amb un esforç de compressió. Dos fets són bàsics en la fatiga: 1) la iniciació de l'esquerda, i 2) la seva propagació a través del material. El tipus d'esforç aplicat en l'experimentació al laboratori sol ésser de tipus sinusoidal tensió-compressió, flexió o torsió. Hom anomena vida de fatiga o enduriment el nombre de cicles que la mostra del material pot suportar abans de trencar-se a un determinat nivell d'esforços cíclics. (Fig. 2)

La qüestió de si els materials fràgils són susceptibles d'ésser damnats per un tractament de fatiga cíclica és molt lluny d'estar resolta.

Com que la majoria de materials ceràmics, sotmesos a un esforç simple a temperatura ambient, presenten poca plasticitat o gens, hom podria pensar que la lenta propagació d'esquerdes sota l'acció d'esforços alterns no és un problema per a aquesta classe de materials. No obstant això, alguns treballs mostren evidència creïble que tals efectes poden existir.^{2, 3}

Malgrat que l'aplicació directa d'esforços de tracció-compressió cíclics a una mostra és la manera més simple i directa de poder-ne estudiar la resposta a la fatiga, aquesta operació és alhora delicada, difícil i cara en el cas dels

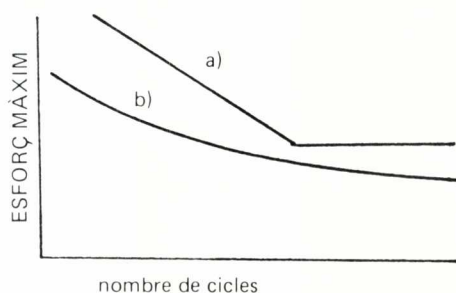


Figura 2. Aspecte típic de dues corbes esforç sinusoidal màxim/nombre de cicles abans de trencar-se la mostra. La corba a) correspon a un material que té un límit definit de fatiga, i b) a un material que no en té.

materials fràgils, per les característiques del material. És per això que hem tractat de desenvolupar un mètode alternatiu, basat en la indentació repetida, per tal de revelar i avaluar els efectes de la fatiga mecànica en els materials ceràmics.

Primerament la indentació fou utilitzada per a determinar la duresa dels materials, la qual pot ésser deduïda de les dimensions de l'empremta per a una càrrega donada.

L'aparició de fractura radial al voltant de les indentacions en els materials fràgils fou considerada, quan hom inicià els tests de duresa, una contrarietat per a realitzar els mesuraments de la duresa en aquests materials. PALMQUIST,^{4,5} però, reconegué que les esquerdes poden proporcionar una mesura de la tenacitat del material. DAWIHL i ALTMEYER⁶ ampliaren el treball de Palmquist i observaren que la longitud de l'esquerda depenia de l'acabat de la superfície, la qual cosa atribuïren, encertadament, a la presència de compressions superficials residuals degudes al poliment. Eliminaren o, almenys, reduïren el problema, utilitzant mostres de superfícies currosament polides. La importància dels esforços residuals a la superfície és un dels temes importants en aquests tipus de tests.

EVANS i WILSHAW,⁷ en llurs estudis de fractura per indentació en ceràmiques policristal·lines suggeriren que podia tenir importància el caràcter elàstic/plàstic del camp de la indentació i estengueren l'anàlisi dimensional de la mecànica de la fractura de règim elàstic a l'elàstic/plàstic. D'aquesta anàlisi hom deduí que la relació de la tenacitat, K_c amb la duresa, H , era el paràmetre clau de l'estudi de la fractura per indentació.

Els detalls essencials de l'anàlisi del fenomen elàstic/plàstic de la mecànica de la fractura han estat fonamentats pel grup de Cambridge.^{8 a 11}

EVANS¹² dugué a terme una anàlisi generalitzada de les possibilitats de la determinació de la tenacitat utilitzant tècniques d'indentació, i demostrà, basant-se en els desenvolupaments dels principis de la fractura per indentació realitzats per LAWN i ALTRES,^{13 a 15} que la tècnica d'indentació és una tècnica viable per a una determinació aproximada de la tenacitat de molts materials fràgils. L'anàlisi que fa no és una anàlisi quantitativa rigorosa de la fractura per indentació (la qual cosa és un problema d'una complexitat extrema); permet, però, d'establir i identificar els paràmetres en joc. L'anàlisi indica que la longitud de l'esquerda deu ésser regida primàriament per la tenacitat (la resistència dels materials al creixement de les esquerdes), la duresa (la magnitud que regeix l'extensió del camp elàstic/plàstic) i el radi del contacte de l'indentador (que determina l'escala del camp d'esforços) a través dels paràmetres K_c , H i \sqrt{r} . L'anàlisi inclou la possibilitat d'altres influències: esforços residuals de la indentació, radi de la zona plàstica (a través de E/H), el coeficient de Poisson, ν , i el coeficient de fricció, μ . Les dades experimentals indicaren que el mòdul de Young hi era important, a través de la relació E/H ; però no hi revelaren cap influència de ν o μ .

En indentar una mostra es produeix una zona plàstica al voltant de la indentació, i les esquerdes estan sotmeses als esforços residuals quan l'indentador es descarrega (fig. 3). La idea que hem mantingut és que si es produeixen indentacions repetides al mateix lloc per càrrega-descàrrega cíclica de l'indentador, les esquerdes estarien subjectes a esforços cíclics de signe altern i aquest podria ésser un mètode barat de posar en evidència i avaluar la fatiga mecànica en els materials fràgils.

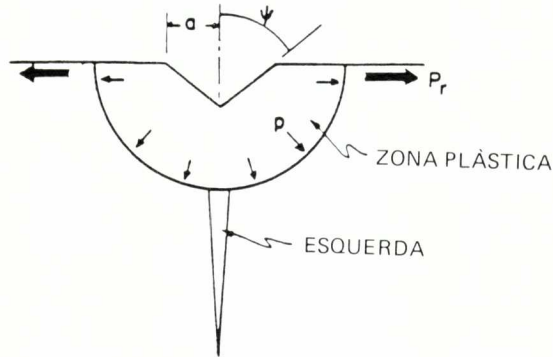


Figura 3. Esquema de les zones elàstica/plàstica en una indentació mostrant la localització de la pressió residual.

EXPERIMENTACIÓ

El material emprat ha estat una alúmina comercial de la qual adjuntem les característiques.

Característiques del material emprat

NOM DEL MATERIAL: «VITOX»

TIPUS DE MATERIAL: ceràmic, Al_2O_3 estabilitzat amb MgO

FABRICAT PER: ANDERMAN + RYDER LTD.

APLICACIONS PER A LES QUALS ÉS FABRICAT: Pròtesi òssia

ESPECIFICACIONS I PROPIETATS:

Contingut d'alúmina: 99,90%

Densitat: 3,95 g. cm^3

Dimensió mitjana del gra: 2 microns

Microduresa: 2300 HV

* Esforç de flexió: > 500 MPa

* Tenacitat a la fractura: 5,7 $MN m^{-3/2}$

* Resistència a la corrosió: no presenta pèrdues en l'esforç mecànic després de bullir durant 2 setmanes en una solució del 5% de sal.

** Mòdul de Young (mesurat en proves de flexió per tres punts en mostres polides i primes)

En mostres de 50 mm de longitud $402,9 \pm 5,9$ GN m⁻²

En mostres de 20 mm de longitud $398,8 \pm 5,9$ GN m⁻²

** Mòdul de rigidesa: Mostra 1 160,2 6 Pe
Mostra 2 160,1 6 Pa

** Coeficient de Poisson: Mostra 1 0,25
Mostra 2 0,24

** Mòdul de volum: Mostra 1 3,96
Mostra 2 3,96

* Proves fetes en una solució de Ringer

** Proves fetes a temperatura ambient

EXPERIÈNCIES REALITZADES

Amb la mostra perfectament fixada, hom indentà una i altra vegada el mateix punt i foren mesurades a continuació les dimensions de la indentació i les de les esquerdes que es produïen (fig. 4). Hom observà també com anava danyant-se la mostra en indentacions successives.

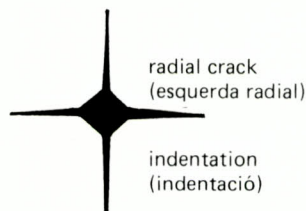
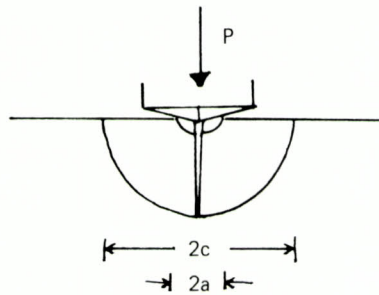


Figura 4. Esquerdes observables en una indentació amb una punta Vickers.

Per a dur a terme les indentacions fou utilitzat un duròmetre MOUNFIELD M-4 MAJOR (càrregues de 1 Kp en endavant) que hom adaptà per a poder ésser utilitzat amb càrregues més petites (fins de 0,5 Kp), i un microduròmetre Zeiss (càrregues de 1p fins a 200 p). Les puntes de diamant utilitzades en ambdós casos foren puntes Vickers, que produeixen les indentacions i esquerdes de la forma indicada en la figura 1.

RESULTATS

1. CÀRREGA DE L'INDENTADOR ENTRE 5 Kp i 100 Kp

Hom comprovà que

1.1. Les dimensions de la indentació i de les esquerdes no variaven quan hom no utilitzava l'automatisme de l'indentador i es mantenia el contacte entre la mostra i l'indentador amb la càrrega aplicada per a temps més llargs, fins de més d'una hora. Això indica que el dany creixent que hom observa en la mostra en anar augmentant el nombre d'indentacions no és degut al temps d'actuació de l'indentador, sinó del procés de càrrega — descàrrega successiu.

1.2. Les dimensions de la indentació i de les esquerdes són funció de la càrrega de l'indentador la qual cosa ens permeté de dibuixar la gràfica de la tenacitat de la figura 5.

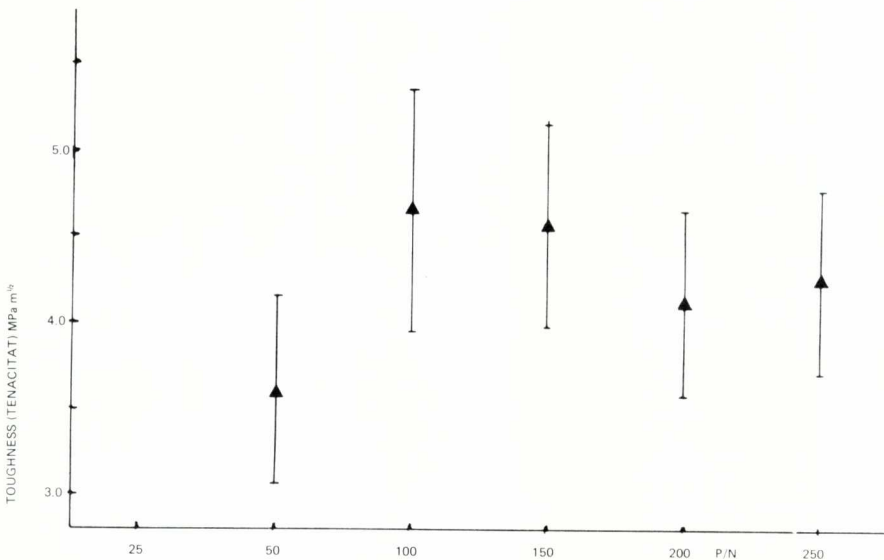


Figura 5. Gràfica de la tenacitat.

1.3. Les dimensions de l'empremta de les indentacions i de les esquerdes no augmenten apreciablement amb el nombre d'indentacions; però hom observa un aixecament successiu del material que rodeja la indentació fins que se'n desprèn un troç (fig. 6). La figura 7 és la representació gràfica del nombre d'indentacions que hom pot fer en el mateix punt de la mostra abans que es desprengui un troç del material, en funció de la càrrega de l'indentador.

2. CÀRREGA DE L'INDENTADOR ENTRE 1 p 1 200 p

Les experiències de microdureza dutes a terme demostraren que

2.1. Per a aquest interval de càrregues, la indentació no presenta esquerdes radials.

2.2. Si intentem successivament la indentació en el mateix punt amb càrregues compres dins aquest interval, a la segona vegada o a la tercera es produeixen escrostonaments al voltant dels límits de la indentació, no essent aquests reproduïbles.

CONCLUSIONS

La repetitivitat dels resultats sembla indicar que la tècnica de la indentació successiva pot ésser una tècnica apropiada per a l'estudi de la fatiga en materials fràgils utilitzant càrregues suficients per a produir esquerdes radials.

La manera com es desprèn un tros de material comprès entre les esquerdes al cap d'un cert nombre d'indentacions sense haver-se produït creixement de les esquerdes radials, fa pensar que les esquerdes que van creixent en les indentacions successives són les laterals (fig. 8), i el fet que la mostra no presenti més dany quan està actuant més temps l'indentador, indica que la propagació de les esquerdes es produeix en el procés successiu de càrrega-descàrrega.

Quan les càrregues són molt petites (0-200 p), si les esquerdes laterals més profundes no es produeixen just a sota de la punta de l'indentador, seran més pròximes a la superfície que les esquerdes produïdes per càrregues més grans, i això podria explicar que l'escrostonament de la indentació es produeixi relativament aviat encara que la càrrega sigui molt petita.

És clar que encara queda una gran quantitat de treball per fer abans d'entendre perfectament el mecanisme que porta a les esquerdes que estan sota la superfície fins a aquesta; però els resultats preliminars que aquí expliquem porten a confirmar l'existència d'un efecte real de fatiga en els materials ceràmics fràgils quan les esquerdes són sotmeses a condicions de càrregues cícliques.

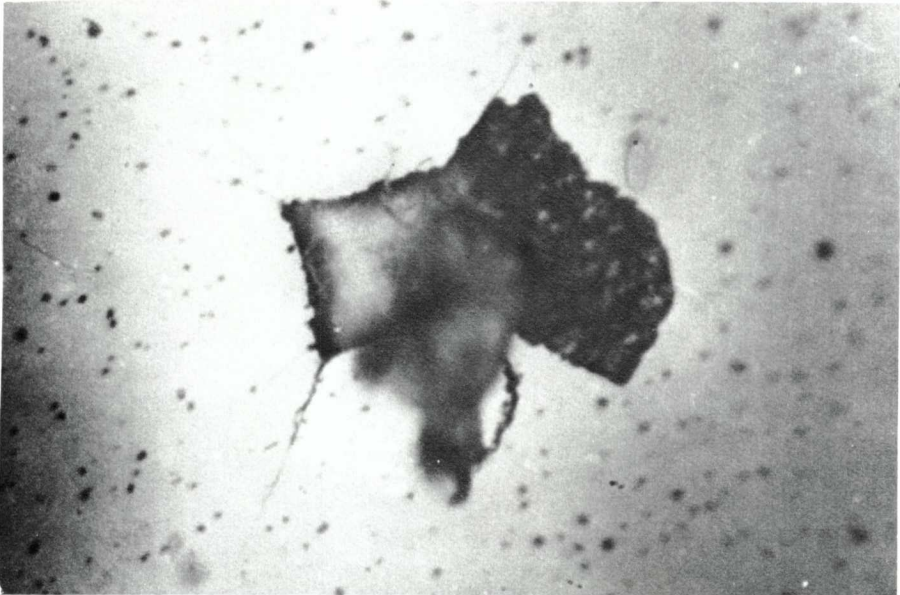
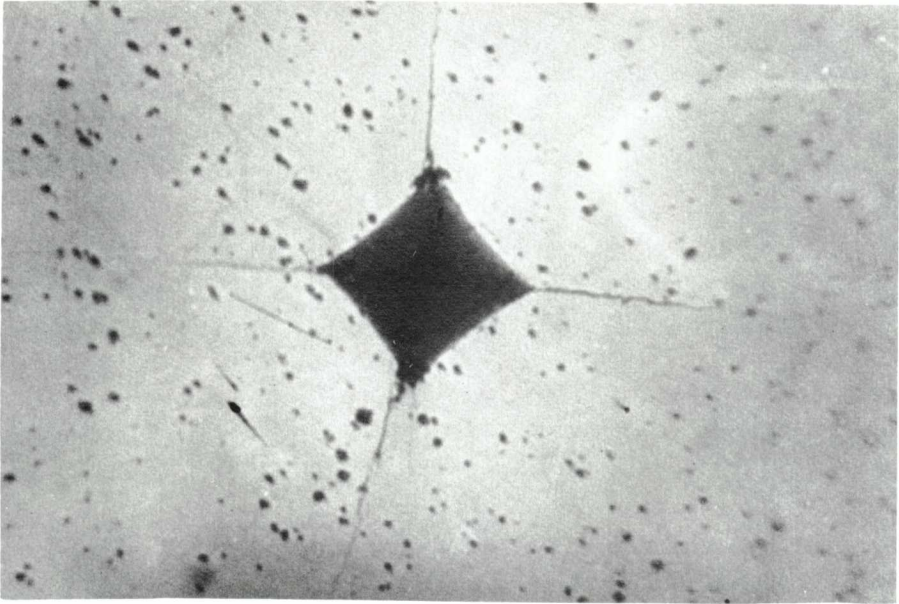


Figura 6. La fotografia a) mostra una indentació corresponent a una càrrega de l'indentador de 100 N, i en la fotografia b) hom pot observar que un tros de material entre dues esquerdas s'ha després quan hom ha indentat 8 vegades el mateix lloc amb la mateixa càrrega.

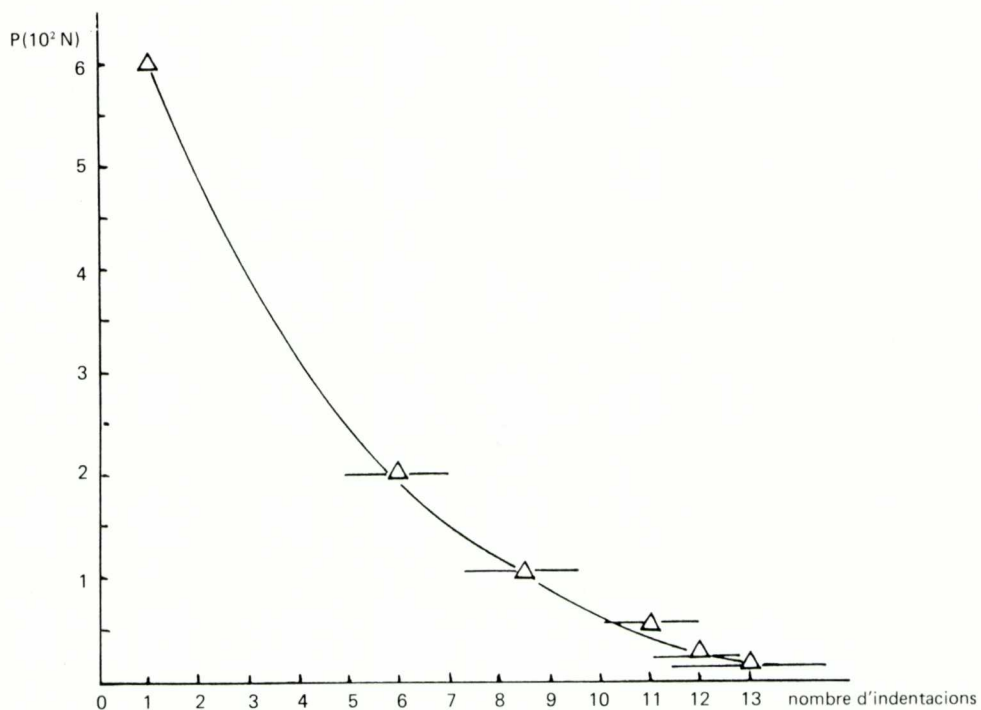


Figura 7. Nombre d'indentacions dutes a terme abans que es desprengués un tros de material en funció de la càrrega.

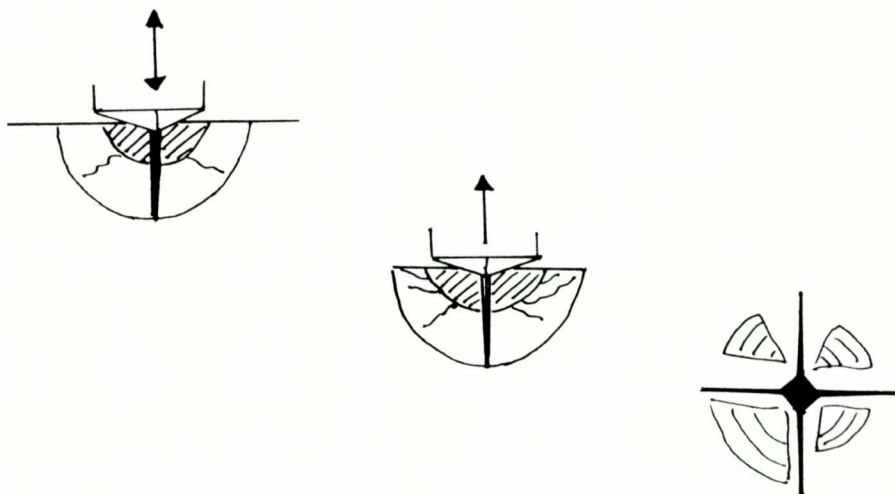


Figura 8. Formació d'esquerdes en una indentació amb punta Vickers.

REFERÈNCIES

1. CASTELLS, M. et al.: Nuevas Tecnologías. Alianza Ed., p. 358.
2. EVANS, A.C.: Int. J. Fracture, 16 (1980), p. 485.
3. GUIU, F. J.: Mat. Sci. Let., 13 (1978), p. 1357.
4. PALMQUIST, S.: Arch. Eis. 33 (1962) p. 629.
5. PALMQUIST, S.: Jernk. An. 167 (1963) p. 208.
6. DAWIHL, V.W.: Altmeyer, G. Z. Met. 55, (1964) p. 231.
7. EVANS, A. G., WILSHAW, T.T.: Act. Met. 24 (1976) p. 939.
8. JOHNSON, K.L: Jour. Mech. Phys. Sol. 18 (1970) p. 115.
9. SWAIN, M.V., HAGAN, J.T.: Jour Phys. D. 9 (1976) p. 2201.
10. STUDMAN, C.J., FIELDS, J.E.: Jour. Phys. D. 9 (1976) p. 857.
11. STUDMAN, C.J., FIELD, J.E.: Jour. Mat. Sc. 12 (1977) p. 215.
12. EVANS, A.G.: A.S.T.M. S.T.P. 678 (1979) p. 112.
13. LAWN, B.R., SWAIN, M.V.: Jour. Mat. Sc. 10 (1975) p. 113.
14. LAWN, B.R., WILSHAW, T.R.: Jour. Mat. Sc. 10 (1975) p. 1049.
15. LAWN, B.R., FULLER, E.R.: Jour. Mat. Sc. 10 (1975) p. 2016.