

Predicció de vida en estructures

Estudi i tractament de la durabilitat estructural. Una ressenya breu

Sergio Oller, Eugenio Oñate

Departament de Resistència de Materials i Estructures en
l'Enginyeria Universitat Politècnica de Catalunya.
Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
Campus Nord, UPC.

Resum

Aquest treball és una ressenya breu sobre problema de la predicció de vida, o estudi de la durabilitat, dels materials estructurals sotmesos a accions mecàniques, tèrmiques i químiques. Aquest article està enfocat a les tècniques numèriques i ressalta la potencialitat d'aquest tipus d'eina en l'estudi d'estructures sotmeses a fenòmens altament complexos i acoblats.

Paraules clau

Mètodes numèrics, elements finits, fatiga, dany i degradació, vida i durabilitat dels materials

Breu ressenya sobre els fenòmens que redueixen la vida dels materials estructurals. Durabilitat

La millora en el rendiment industrial dels processos de fabricació de les estructures exigeix noves tècniques de predicció gràcies a les quals aquests processos esdevinguin més fiables, més ràpids i més econòmics. A això hi hem d'afegir que la responsabilitat futura sobre les estructures fa que el fabricant exigeixi també més fiabilitat en el producte obtingut.

La fiabilitat és un concepte que s'ha d'estendre en el temps, és a dir, cal garantir la "durabilitat" del material estructural. Aquesta exigència de "fiabilitat" i "durabilitat" és molt complexa, per tant, és molt arriscat garantir-la a priori. Tanmateix, actualment existeixen eines de simulació del comportament de "predicció de vida" i "integritat" durant la vida de la peça estructural que es basen en tècniques numèriques i en la mecànica clàssica. Com a exemple d'aquestes eines, el Mètode dels Elements Finitos (MEF) (Zienkiewicz, Taylor -1998-, Oñate -1992) amb les seves diverses aplicacions a l'estudi i control dels processos mecànics.

La durabilitat estructural és un concepte que cal precisar segons el tipus d'element estructural i la utilització, ja que no es pot exigir la mateixa integritat en el temps per a tota mena d'estructures i sota qualsevol acció. La definició del període de durabilitat estructural s'estableix a partir de la seguretat requerida a través de les demandes del mercat i està molt renyida amb els costos de producció de l'estructura. Per tant, cal aprofundir en la investigació i el desenvolupament d'eines capaces de garantir qualitativament i quantitativament la integritat d'una peça estructural durant un període establert per a la prestació del servei per al qual ha estat dissenyada.

Normalment la durabilitat estructural depèn de diferents situacions:

- Una correcta solució dels problemes del disseny estructural geomètrica per obtenir una forma òptima. Aquest problema es resol mitjançant tècniques numèriques d'optimització a partir de la definició

d'una funció objectiu, la minimització del qual, respecte de les variables de disseny, dona la resposta a la forma òptima buscada.

- El control del deteriorament en el material produït per accions mecàniques, tèrmiques, higromètriques i químiques, previstes o no, durant el temps de vida estructural. Aquests problemes estan causats per les accions:
 - Estàtiques i/o dinàmiques (impactes, vibracions, càrregues de vent, sismes, moviments diferencials, etc.)
 - De les altes i baixes temperatures (criogenització, acció del foc, etc.)
 - De la humitat i d'agressions químiques (oxidació en metalls, aluminosi i carbonatació dels ciments, etc.)
 - Acció de les radiacions i efectes de descomposició de la matèria (radiacions ultraviolades en compostos, etc.).

Aquestes situacions provoquen deteriorament estructural en forma de microfisures, fractures, fatiga i distorsions de l'estructura interna del material, i s'han d'estudiar sota l'òptica de fenòmens mecànics de fractura, degradació, plasticitat, viscoelasticitat, fatiga i dany químic i mecànic.

Totes aquests concurrències complexes de situacions que es desenvolupen en un material provocades per les diverses causes esmentades són les que posen en perill la durabilitat del material i, indirectament, l'estructura. Les tècniques numèriques, com el MEF, són de les poques eines disponibles de disseny, control i predicció de vida que garanteixen seguretat i bon funcionament estructural durant el temps esperat de vida per a la peça en qüestió.

Tècniques per a l'estudi de la durabilitat

La indústria busca constantment tenir un coneixement fiable sobre la durabilitat dels materials, sobretot aquells que compleixen funcions estructurals. Antigament la idea qualitativa sobre la vida o la durabilitat dels materials estructurals s'establia traient conclusions dels fets succeïts i dels errors comesos. Naturalment, aquesta forma d'estudi no garanteix ni satisfà la indústria ni el consumidor, perquè la certesa sobre la durabilitat resulta posterior a la utilització de l'estructura. Això ha forçat a desenvolupar estudis quantitius que aportin més dades sobre la durabilitat estructural, i així podríem dir que han sorgit dues tècniques d'estudis:

- una basada en estudis experimentals de laboratori,
- una altra que parteix de simulacions prèvies mitjançant tècniques numèriques.

Es pot dir que en un principi ambdues tècniques són complementàries entre si, però cada vegada més s'intensifiquen els estudis numèrics, perquè són més barats, ràpids de fer i darrerament se n'està verificant la gran fiabilitat. A continuació exposarem una breu presentació de tots dos procediments.

Mètodes d'estudi i avaluació basats en assaigs de laboratori

La primera vegada que es va abordar l'estudi de la durabilitat estructural d'una manera científica es va partir d'estudis realitzats en el laboratori (Wöhler, 1871; Forrest, 1962; Osgood, 1982). Els resultats que se'n van obtenir són fonamentals per conèixer el comportament i la durabilitat del material, i a més serveixen com a base d'estudi i parametrització de mètodes analítics numèrics.

D'això es desprèn el caràcter d'indispensable de l'estudi experimental, si bé sempre cal analitzar objectivament el tipus d'estudi que es pot realitzar i el consegüent resultat que es pot obtenir per la via experimental. D'una anàlisi ràpida es desprèn que els resultats obtinguts experimentalment no es poden extrapolar fàcilment a la realitat que es vol estudiar. A més, l'elevat cost d'un estudi experimental i les limitants condicions d'observació que ofereix un laboratori per reproduir el comportament en el temps d'estructures reals no permeten obtenir mitjançant aquesta metodologia tots els resultats concloents i segurs que la indústria i el consumidor exigeixen.

D'aquesta breu presentació del problema es dedueix que cal afegir a l'estudi experimental un altre de "mecaniconumèric" complementari. Això permet d'estendre les conclusions del laboratori al problema real a partir de bases sòlides fonamentades en les lleis de la mecànica i utilitzades a través de tècniques numèriques. Dit de manera resumida, es pot dir que la simulació en el temps, predicció de vida o durabilitat, d'una estructura real necessita basar-se en:

- Assaigs de laboratori dels materials i parts estructurals
- La mecànica de medis continus
- Les tècniques numèriques, particularment el mètode dels elements finits.

Donat que el present treball s'orienta a presentar l'estudi "mecaniconumèric" del problema de durabilitat estructural, deixarem aquí l'apartat sobre les tècniques experimentals per dedicar-nos a les tècniques numèriques d'estudi, que se centraran bàsicament en el mètode dels elements finits.

Mètodes basats en tècniques numèriques

Com ja hem esmentat abans, els estudis mecaniconumèrics permeten una "extrapolació conceptual" dels fenòmens observats en el laboratori. Existeixen diferents procediments numèrics per aproximar la mecànica a la resolució d'un problema real. Alguns mètodes, com el de les diferències finites, es basen a aproximar les equacions diferencials de la mecànica, i d'altres, com el mètode dels elements finits, estan orientats a aproximar els camps incògnites establerts per les lleis de la mecànica. Naturalment, aquestes metodologies no resolen el problema per si soles, ja que només estableixen el "vehicle" sobre el qual s'introduiran les formulacions de la mecànica. En el cas particular de l'estudi de la durabilitat estructural, el mètode numèric té la missió de gestionar l'acoblament entre les formulacions mecàniques següents:

- Llei de comportament de microfisuració i fractur.
- Llei de comportament de plasticitat en metalls i extensió de la formulació a problemes no metàl·lics
- Llei de comportament de degradació o dany estructural
- Llei de comportament viscoelàstic i viscoplàstic
- Llei de comportament que faci sensible les lleis de la mecànica al problema de fatiga de metalls i no metalls
- Lleis que estableixen l'acoblament químicomecànic en materials metàl·lics i no metàl·lics.

El mètode d'elements finits (MEF) com a tècnica d'aproximació del comportament no lineal de les estructures

El MEF és un mètode molt apropiat per resoldre molts dels problemes de la mecànica ja que el seu èxit rau, des del punt de vista de l'usuari, a oferir moltes virtuts i pocs defectes. Entre els avantatges més importants podríem destacar els següents:

- la facilitat que ofereix per a l'aproximació de les variables de la mecànica en dominis complexos

- la facilitat per incorporar les condicions de contorn real del problema a resoldre
- la ja provada i eficient forma d'implementació computacional.

Tot això ha estat possible gràcies al gran desenvolupament que han viscut els ordinadors en els darrers vint anys. Si no s'hagués produït aquest avenç, avui no seria possible presentar el mètode d'elements finits com una eina d'avaluació de comportament estructural eficaç per a la indústria.

Els orígens del mètode d'elements finits fan de mal precisar, ja que hi ha tècniques matemàtiques molt semblants establertes ja a la segona meitat del segle XIX, com ara el mètode de Ritz (Zienkiewicz, Taylor, 1998). Malgrat això, el MEF utilitzat com a eina de càlcul en l'enginyeria és més recent, i podríem dir que fou Courant qui, l'any 1943, va utilitzar aquesta tècnica per resoldre el problema de torsió de Saint-Venant tot establint les bases per a futures aplicacions en enginyeria. L'any 1953, Argyris, Turner, Clough, Martin i Topp firmen el primer treball amb el títol de "mètode d'elements finits" que parteix de les bases del mètode de Ritz. En aquella mateixa època apareixen ja treballs d'altres investigadors com Zienkiewicz, Melosh, Tocher, etc., coneguts avui com els pioners de la utilització del MEF en la solució de problemes de la mecànica i més concretament de problemes estructurals i geotècnics.

Les diferències fonamentals entre el mètode de Ritz i el MEF són les següents (Zienkiewicz, 1994):

- Ritz: Utilitza una formulació aproximada del camp incògnita en tot el domini i aquesta ha de complir les condicions de conformitat en tot el domini.

- MEF: Utilitza una formulació aproximada del camp incògnita per a una part del domini, denominat "element finit". Aquesta funció ha de complir les condicions de conformitat localment dins de l'element finit, i a més ha de complir determinades condicions de continuïtat entre elements adjacents.

El mètode dels elements finits (MEF).

Subdivisió del domini

L'exigència de la "condició de compatibilitat de desplaçaments" en una formulació mecànica aplicada a la resolució d'estructures porta a un mètode les incògnites del qual són les forces. Com a alternativa es pot exigir

la "condició d'equilibri entre forces", i d'aquí resulta una formulació el camp incògnita de la qual són els desplaçaments. Aquestes dues formes conjugades de presentar la formulació per a la resolució de les estructures poden ser tractades pel MEF, i fins es pot proposar una forma mixta de formulació. Malgrat aquesta diversitat de possibles formulacions, per la simplicitat en el tractament de les condicions de cantell és més habitual utilitzar el MEF en el context d'una formulació en desplaçaments.

Un cop definit el camp incògnita, el MEF estableix un procediment d'aproximació funcional en dos nivells:

- **Aproximació a escala elemental:** Definició de l'aproximació funcional en un domini finit contingut dins del domini global (vegeu Figura 1).
- **Aproximació a escala global o estructural:** Imposició de les condicions de compatibilitat i equilibri entre dominis elementals (vegeu Figura 1).

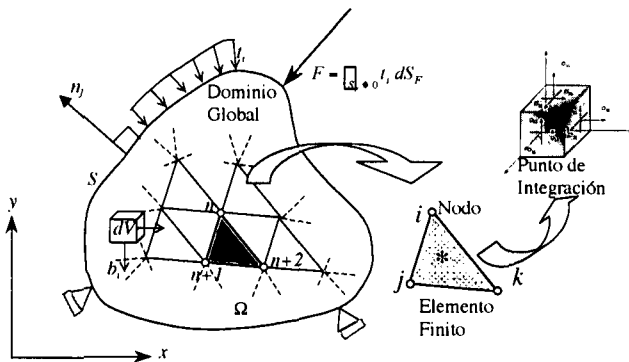


Figura 1 Representació esquemàtica d'un domini global i la seva subdivisió en dominis locals.

El mètode dels elements finits (MEF). Definició de l'equilibri elemental i global

L'equació d'equilibri mecànic d'un sòlid sotmès a accions termomecàniques externes es pot obtenir directament a partir de la primera llei de la termodinàmica. La seva solució consisteix a obtenir els desplaçaments $u_j(x,y,z)$ d'una estructura sotmesa a accions externes (forces, variació de temperatures, etc.). Per resoldre el problema es proposa aproximar aquestes funcions mitjançant polinomis normalitzats del tipus $N_{jk}(x,y,z)$, que reben el nom de funcions de forma (Zienkiewicz, Taylor, 1998; Oñate, 1992).

$$u_j(x, y, z) \Big|_{\Omega^e} = N_{jk}(x, y, z) U_k \Big|_{\Omega^e}$$

Aquesta funció de forma $N_{jk}(x,y,z)$, definida en el domini d'un element finit, permet aproximar el camp de desplaçaments $U_k(x,y,z)$ mitjançant la valoració de les magnituds U_k en un nombre finit de punts denominats nodes, que pertanyen al domini Ω^e .

Des d'un punt de vista mecaniconumèric, la no-linealitat en l'equació d'equilibri pot estar originada per diferents fenòmens:

- No linealitat constitutiva, que resulta de la pèrdua de linealitat entre el camp de tensions i deformacions, exigeix una definició especial d'una llei de comportament del material, tal com succeeix en la plasticitat, dany, fractura, fatiga, etc.
- No linealitat per grans deformacions, que són degudes a la influència no lineal que té el canvi de configuració del sòlid en el camp de deformacions. A més, aquests canvis de configuració són produïts per grans moviments, traslacions i rotacions, i també produeixen canvis en el sistema de referència local en els punts del sòlid, que per tant afecten al tensor de compatibilitat de deformacions.
- No linealitat per grans desplaçaments, que a diferència de les grans deformacions només afecta al tensor de compatibilitat de deformacions, perquè només es produeixen canvis en el sistema de referència local dels punts del sòlid com a conseqüència de grans moviments.

L'equació d'equilibri a nivell d'un element finit Ω^e participa en domini global Ω mitjançant l'operació d'"acoblament" A , que representa una "suma ordenada" entre els components de la força, tenint en compte la posició i la direcció de les forces elementals.

En el cas que hi hagi linealitat en el comportament del sòlid, es compleix la següent relació d'equilibri global, que resulta de l'acoblament de les equacions d'equilibri local

$$0 = \mathbf{A} \left[f_k^{mas} + f_k^{int} - f_k^{ext} \right]_e = \Delta f_k \Big|_{\Omega}$$

siguent $f_k^{int} \Big|_{\Omega^e}$, $f_k^{mas} \Big|_{\Omega^e}$ y $f_k^{ext} \Big|_{\Omega^e}$ els conjunts ordenats, en forma de matrius columna, de les forces interna, màsica i externa que es desenvolupen en cada punt del sistema discret que apropa el continu.

Qualsevol forma de no linealitat en el sòlid es manifesta com un desequilibri entre les forces interiors i les exteriors, $\Delta f_k|_{\Omega}$, que en un cert instant de temps "t" es pot eliminar mitjançant la linealització d'aquesta força desequilibrant en la proximitat de l'estat d'equilibri actual.

L'equació d'equilibri dinàmic en el sòlid complet s'acostuma a presentar en la següent forma matricial (S. Oller, 2001),

$$0 = {}^{i+1}[\Delta f]_k \approx {}^i[\Delta f]_k + \underbrace{\left[M \frac{f\ddot{U}}{fU} + K^T + D^T \frac{f\dot{U}}{fU} - \frac{ff^{ext}}{fU} \right]_{\Omega}}_{} \gamma^{i+1} [\Delta U]_k$$

Aquesta equació representa l'equilibri de forces que participen en l'estructura, linealitzada en el camp dels desplaçaments. En aquesta equació $[J]_{\Omega}$ representa la matriu de rigidesa tangent, $[M]_{\Omega}$ és la matriu de massa, $[D]_{\Omega}$ és la matriu d'esmoreïment tangent, totes elles definides en tot el domini Ω i C_{ijst}^T el tensor tangent corresponent a la llei constitutiva utilitzada en cada punt del sòlid. La força desequilibrada en el sòlid ${}^{i+1}[\Delta f_k]_{\Omega}$ s'elimina seguint una resolució de Newton-Raphson fins que aquest residu resulti menyspreable, una situació que es coneix com convergència del procés linealitzat fins a la solució exacta. Per a estudis més aprofundits, es recomana consultar el llibre de Zienkiewicz i Taylor (1998).

No linealitat dels materials. Inclusió de les lleis de comportament dels materials en el MEF, per a l'estudi de la durabilitat

La llei de comportament del sòlid en un punt (Punt d'integració numèrica) s'introdueix en l'equació d'equilibri (3) mitjançant una formulació denominada llei constitutiva. Aquesta formulació defineix la tensió O_{ij} , el tensor constitutiu C_{ijkl} , la viscositat \hat{t}_{ijkl} i la influència de la no linealitat cinemàtica. Això permet realitzar un estudi mecaniconumèric, que porta a una anàlisi racional de predicció del comportament de l'estructura en el temps i, per tant, permet estudiar la durabilitat de les estructures.

La influència de les càrregues i del temps produeix en alguns sòlids estructurals comportaments irrecuperables. Bàsicament es poden establir tres tipus de comportaments no lineals dependents del temps (Malvern, 1969):

- **Elasticitat retardada o "creep"**, en la qual hi ha creixement de deformació a tensió aplicada constant (vegeu Figura 2).
- **De tensions**, en la qual es produeix pèrdua de tensió mentre el nivell de deformacions es manté constant. Aquest comportament, si bé no és invertible, representa la forma implícita inversa de l'elasticitat retardada (vegeu Figura 2).
- **Viscoplasticitat**, que té un comportament no lineal i es deu a un creixement del camp de deformacions inelàstiques, per això el camp de tensions sempre supera uns líndars preestablerts (vegeu Figura 4).

També hi ha materials el comportament no lineal dels quals és independent del temps (Malvern, 1969; Lubliner, 1990; Oller, 2001) i aquesta situació pot ser conseqüència de diferents fenòmens, com ara:

- **Plasticitat o comportament amb flux instantani**. Aquest comportament es pot establir matemàticament com un cas particular del comportament viscoplàstic, si bé la física del problema és qualitativament diferent (vegeu Figura 3).
- **Dany o degradació de rigidesa**, que produeix en els materials una pèrdua de resistència com a conseqüència d'una degradació en l'elasticitat del material.

Aquests comportaments es poden presentar de manera aïllada o tots alhora en diferent grau. El tractament adequat d'aquests fenòmens permet sensibilitzar el comportament dels materials a fenòmens acoblats com:

- **La fatiga**, extensió conceptual de la plasticitat i el dany, influïda pels cicles de càrrega (Suero, Oller, 1998; Oller, Suero, 1999; Salomón, Oller, Car, Oñate, 1999; DARCAST, 2000; González Torre, 2001).
- **Influència fisicoquímica**, com és el cas de la degradació de les propietats del material en presència d'humitat. N'és un exemple el fenomen d'aluminosi i carbonatació dels ciments en presència d'humitat, que es pot tenir en compte en la definició constitutiva com una extensió conceptual de la plasticitat i dany en les formulacions del qual es pot incloure la definició d'un potencial químic (Bosch, 1998; Car, Oller, Oñate, 1998).

Sobre la modelització constitutiva i la seva influència en el comportament estructural cal aprofundir en fonts

concretes, especialitzades en cada àrea. Això no obstant, en les Figures 3, 4 i 5 es mostra la definició de les formulacions bàsiques que es poden utilitzar per estudiar la durabilitat del material (fatiga, fractura, acoblament fisicoquímic).

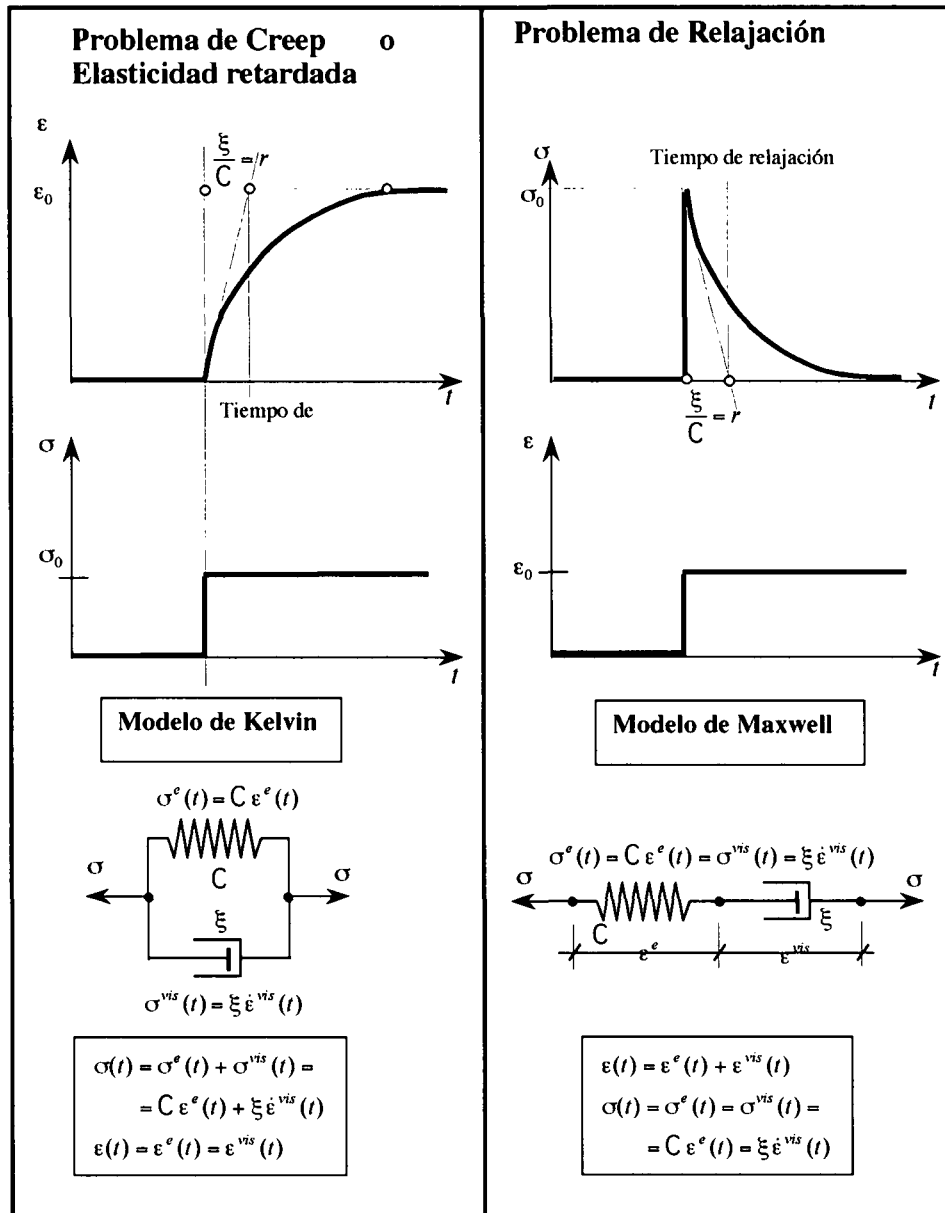


Figura 2. Formes simplifiades d'entendre els modes constitutius viscosos de Kelvin i Maxwell

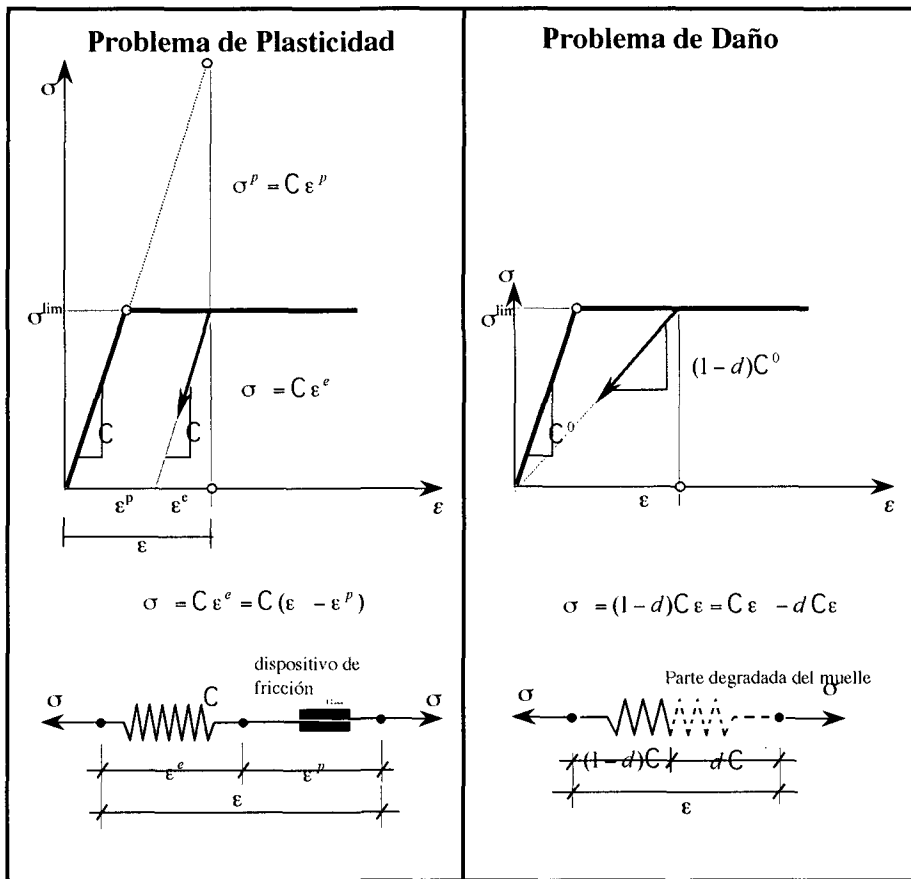


Figura 3. Formes simplifiades d'entendre el comportament elastoplàstic i dany

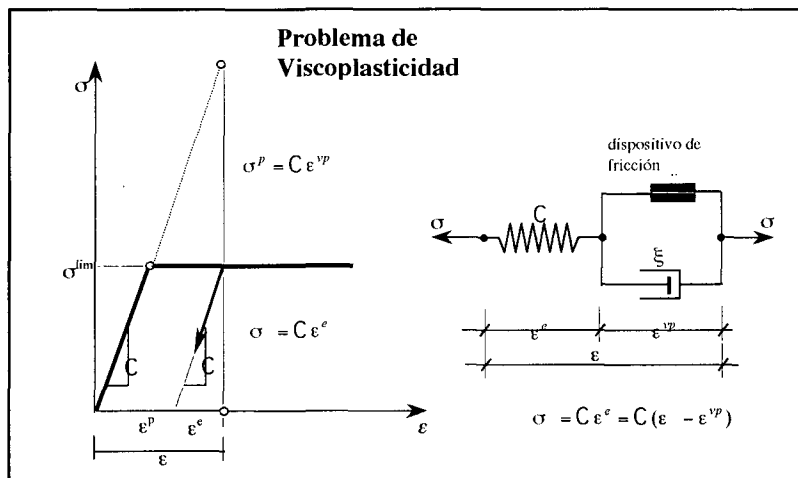


Figura 4. Formes simplifiades d'entendre el comportament viscoplàstic

Exemples de simulació numèrica de durabilitat estructural

Prova a fatiga d'un motlle per a solidificació de peces d'alumini

Es presenta un motlle d'acer per a injecció d'alumini, que serà representat per un quart de la part simètrica. Aquest motlle treballa sota un cicle imposat de temperatures i altes pressions, és a dir, que té un comportament termomecànic acoblat. S'ha estudiat la vida útil d'aquest motlle per a l'estat de càrregues imposat, i per això s'ha resolt un problema de fatiga a través d'un model constitutiu de dany influenciat pel nombre de cicle (Oller, 2001). La geometria, aproximació de la malla finita i propietats dels materials es resumeixen a continuació (Salomón, Oller, Car, Oñate, 1999).

Propietats del material, geometria i malla d'elements finits

Elements: 280, Nodes: 909, Quadrilàters 8 nodes, amb 4 punts de Gauss

Característiques del material

Acer sotmès a un comportament de microfisures mitjançant un model de dany isòtrop.

$$E = 2.15 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, \nu = 0.3, S_o^f = 1.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2, G_f = G_c = 30 \cdot 10^5 \text{ N/m} \\ m^o = 7800 \text{ kg/m}^3, k = 25 \text{ W/m}^\circ\text{C}, c_k = 460 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}, h_{ar} = 10 \text{ N/MS}^\circ\text{C}, \\ \alpha^{TER} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \theta^{rf} = 20^\circ\text{C}$$

$\theta = 20^\circ\text{C}$	$S^f = 1.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 2.15 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 400^\circ\text{C}$	$S^f = 1.3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	
$\theta = 500^\circ\text{C}$	$S^f = 1.1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 600^\circ\text{C}$	$S^f = 0.8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 1.65 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 650^\circ\text{C}$	$S^f = 0.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	

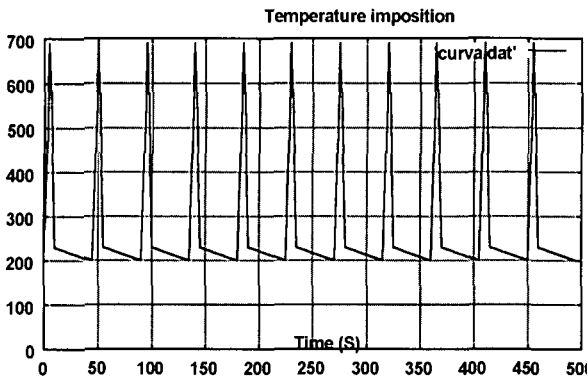
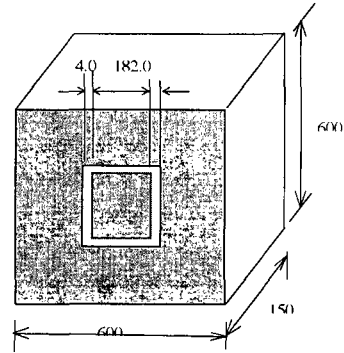
Característiques del material

Alumini sotmès a un comportament elàstic isòtrop

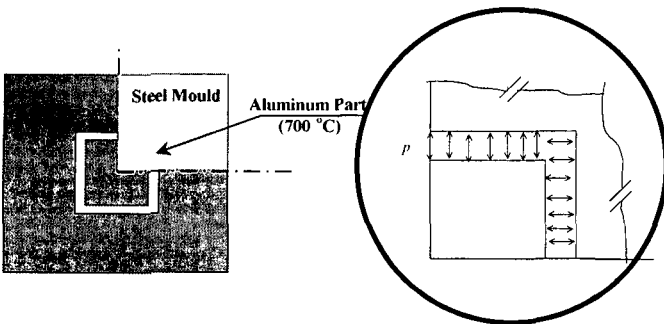
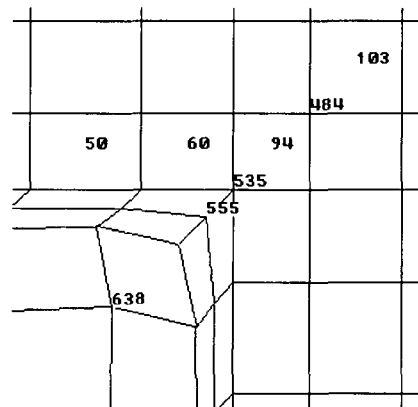
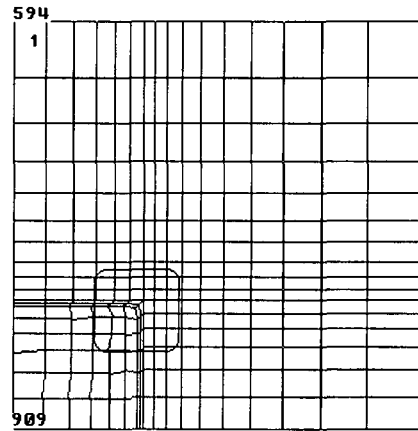
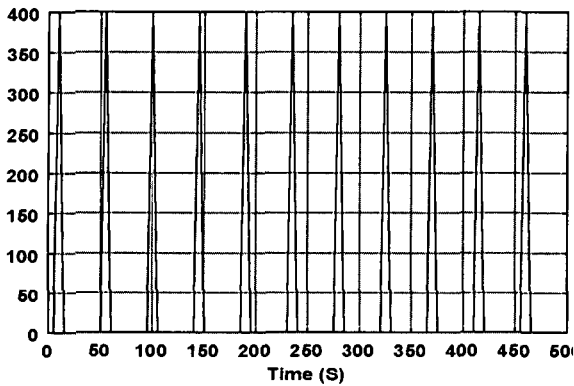
$$E = 6.93 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2, \nu = 0.37, m^o = 2650 \text{ kg/m}^3, \\ k = 234.46 \text{ W/m}^\circ\text{C}, c_k = 955 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}, h_{ar} = 10 \text{ N/MS}^\circ\text{C}, \\ \alpha^{TER} = 12.19 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \theta^{rf} = 20^\circ\text{C}$$

Característiques de la càrrega

Imposició de temperatura en l'alumini, seguint la història que es mostra a continuació:



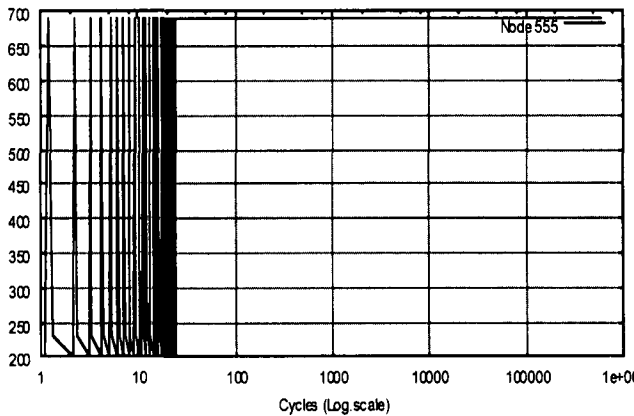
Imposició de pressió sobre les cares del motlle en contacte amb la fundició:



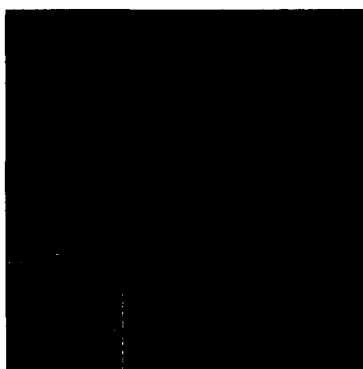
Malla utilitzada per a l'anàlisi numèric (1/4 del problema sencer) i detall de la cantonada interior. Els nodes i elements presentats són aquells per als quals es presenten les corbes i els gràfics de resposta.

Evolució de la temperatura que actua en la cara en contacte amb l'alumini injectat

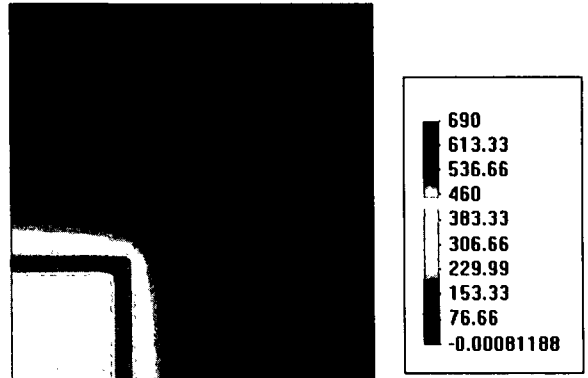
Es consideren dos intervals de càrrega: el primer de 24 cicles de 45 segons amb increments de 5 segons (la càrrega de temperatura comença als 200°C i assoleix una cresta de 690°C quan l'alumini s'injecta, després es redueix a 230°C quan la peça d'alumini s'extreu i finalment el cicle conclou quan el motlle es refreda 200°C). Durant el segon estat de càrregues, la temperatura es manté en els màxims assolits al final del primer interval i els increments es consideren en números de cicles, en lloc de temps.



Evolució de la temperatura en diferents punts del motlle. S'observa la cíclicitat del comportament en punts propers a l'alumini injectat.

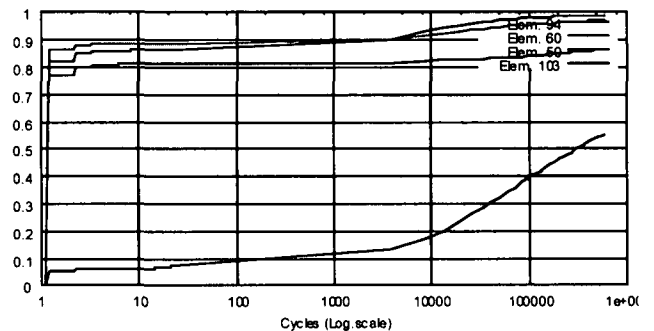
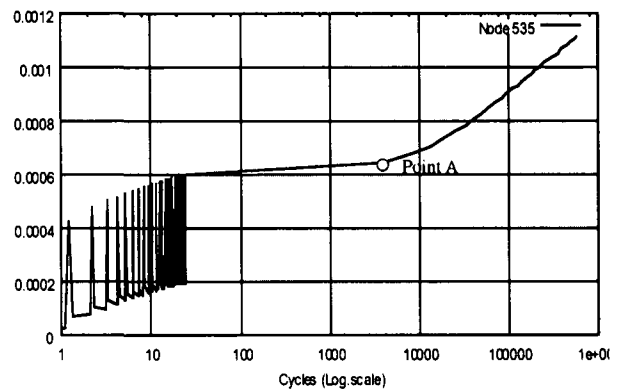


Distribució de temperatures en el primer pas

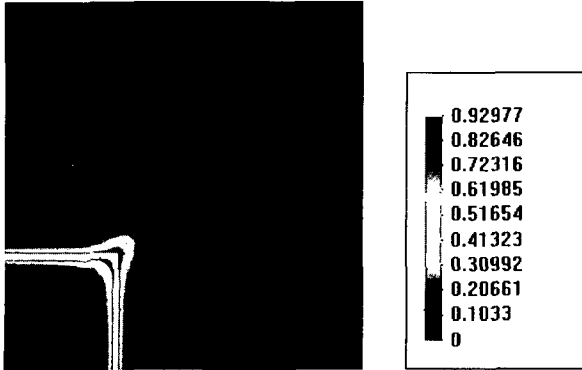


Distribució de temperatura al final del primer increment de càrregues (i al final del procés).

Evolució del desplaçament en la cantonada interna del motlle. El punt A mostra el clar canvi que pateix el comportament mecànic del motlle. Des d'un punt de vista conceptual, aquest increment excessiu de desplaçament, acompanyat d'una pèrdua de resistència (vegeu fig. de tensions), es pot considerar com el límit de vida útil en fatiga per al motlle, perquè s'inicia la fractura.



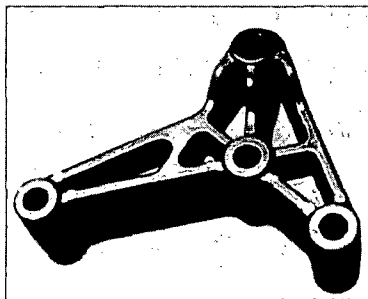
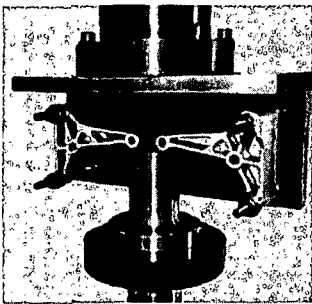
Història de l'index de dany en el primer punt de Gauss de l'element proper a la cantonada interna



Índex de dany en acabar el procés.

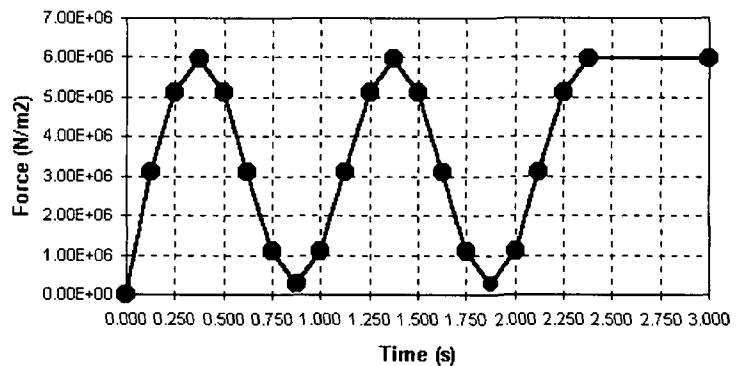
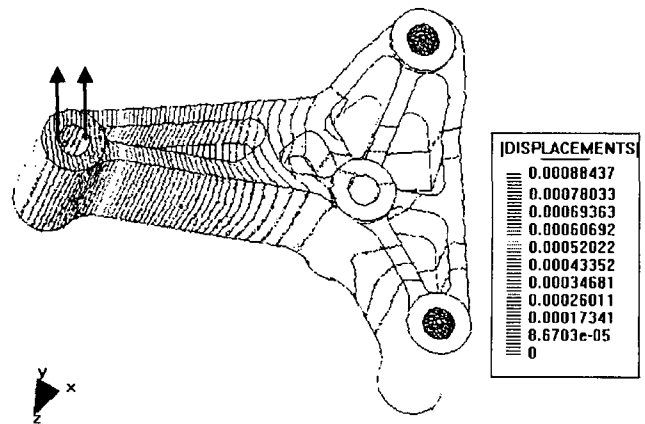
Prova a fatiga d'una peça d'alternador construïda en alumini

En aquest apartat es presenta una anàlisi numèrica i experimental sobre el problema de fatiga en una peça d'alumini per a suport d'alternador com la que es mostra a la figura següent. L'estudi experimental ha estat desenvolupat pel Politècnic de Torí sotmetent la peça a una càrrega cíclica en el seu extrem, en la manera que es mostra a la figura. L'assaig en aquest apartat numèric ha estat desenvolupat per CIMNE (DARCAST, 2001).

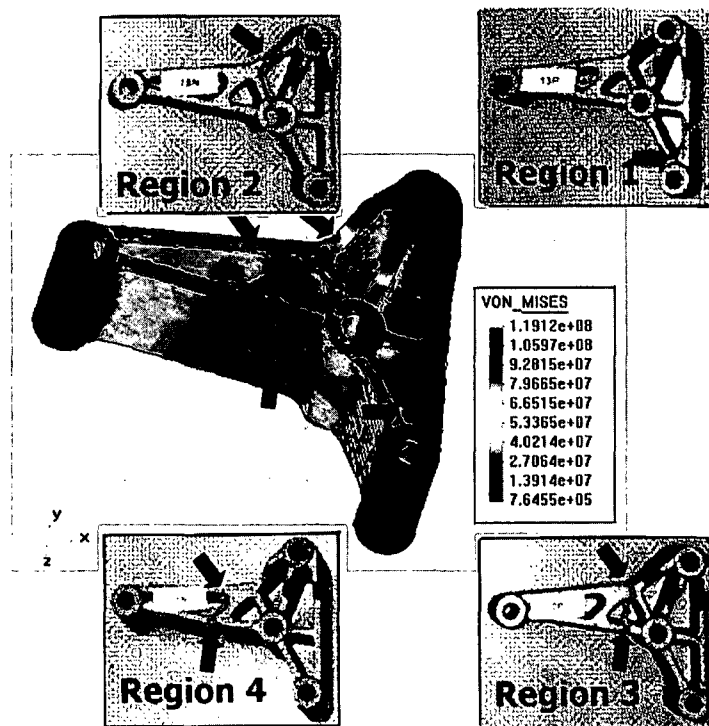


Fotografia de la peça d'un alternador construïda en alumini i manera en què s'hi aplica la càrrega per realitzar l'assaig de fatiga

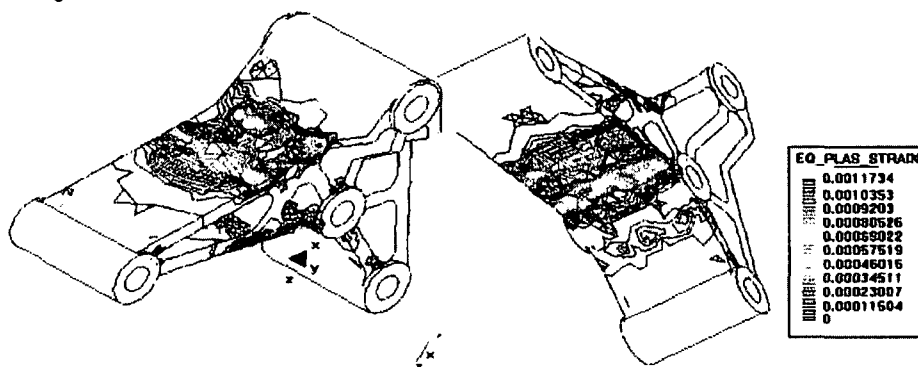
Al voltant de cinquanta peces s'han sotmès a l'assaig de fatiga a fi d'obtenir conclusions experimentals fiables. Un cop acabat l'assaig experimental s'han realitzat anàlisis radiogràfiques per conèixer l'estat de la porositat a l'interior de la peça i les superfícies fracturades han estat analitzades mitjançant estudis metal·logràfics. Això ha permès ajustar els paràmetres del material i fer un estudi numèric de verificació a través d'elements finits. En aquesta plana es mostra la forma en què s'aplica la càrrega cíclica en la peça analitzada per elements finits. En la figura que a continuació es mostra es pot veure la coincidència entre els resultats experimentals i els numèrics.



Càrrega cíclica aplicada al suport d'alternador



Mapa de deformacions plàstiques que mostra les zones on s'inicia el deteriorament per fatiga



Anàlisi numèrica de predicció de vida en minicomponents hidràulics

En aquest apartat es mostra una simulació numèrica per elements finits (MEF) encaminada a fer una predicció de vida útil de "minibombes hidràuliques" sotmeses a cicles d'altas pressions. Els resultats numèrics que s'hi mostren han estat desenvolupats dins del projecte europeu MINIHAP (2001) sobre bombes fabricades i assajades en laboratori per l'empresa Roquet SA. Aquestes bombes s'han construït amb dos materials diferents, en alumini tipus Eural 7003 i en fundició de ferro globular GGG-40.

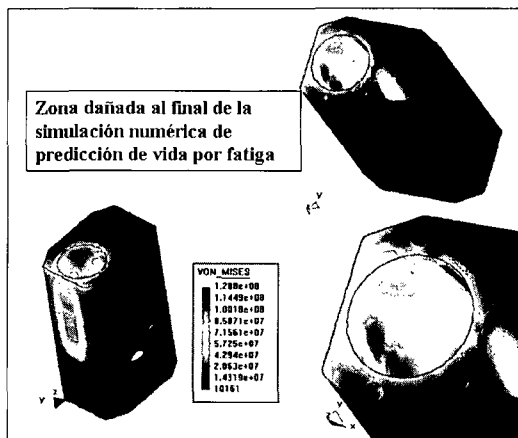
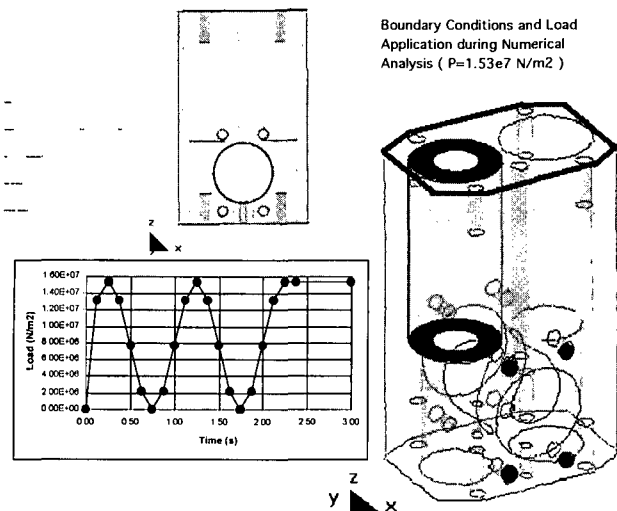


La predicció de vida d'aquestes "minibombes hidràuliques" ha estat estudiada numèricament per CIMNE. S'ha treballat amb una geometria en 3-Dimensions sobre plànols reals i s'ha imposat una pressió interior cíclica representativa de la real (vegeu Figura que es presenta a continuació). Les propietats del material s'han considerat segons dades ofertes pel fabricant.

CIMNE ha obtingut, mitjançant la simulació numèrica, una excel·lent aproximació a l'assaig experimental, tant en la localització del punt de màxima fatiga (vegeu Figura) com en el nombre de cicles a què s'assoleix aquest estat. L'assaig experimental mostra que la fractura per fatiga s'assoleix als 75.811 cicles i l'assaig numèric confirma aquesta dada amb 80.000 cicles.

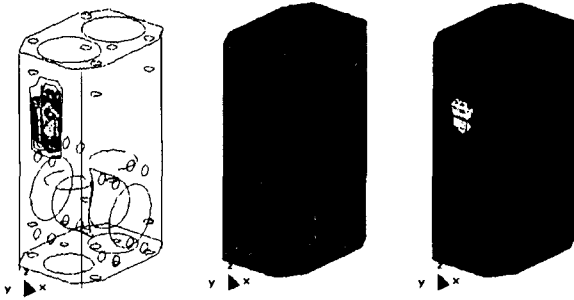
Geometria de la mini bomba i cicles de càrrega al qual es sotmet el cos de la bomba.

A les corbes de "tensió-nombre de cicles" i "dany-nombre de cicles", que es presenten a continuació, es pot veure com cau la resistència, mentre el dany creix, quan s'assoleix el llindar de dany per fatiga als 80.000 cicles de pressió a l'interior de la bomba.



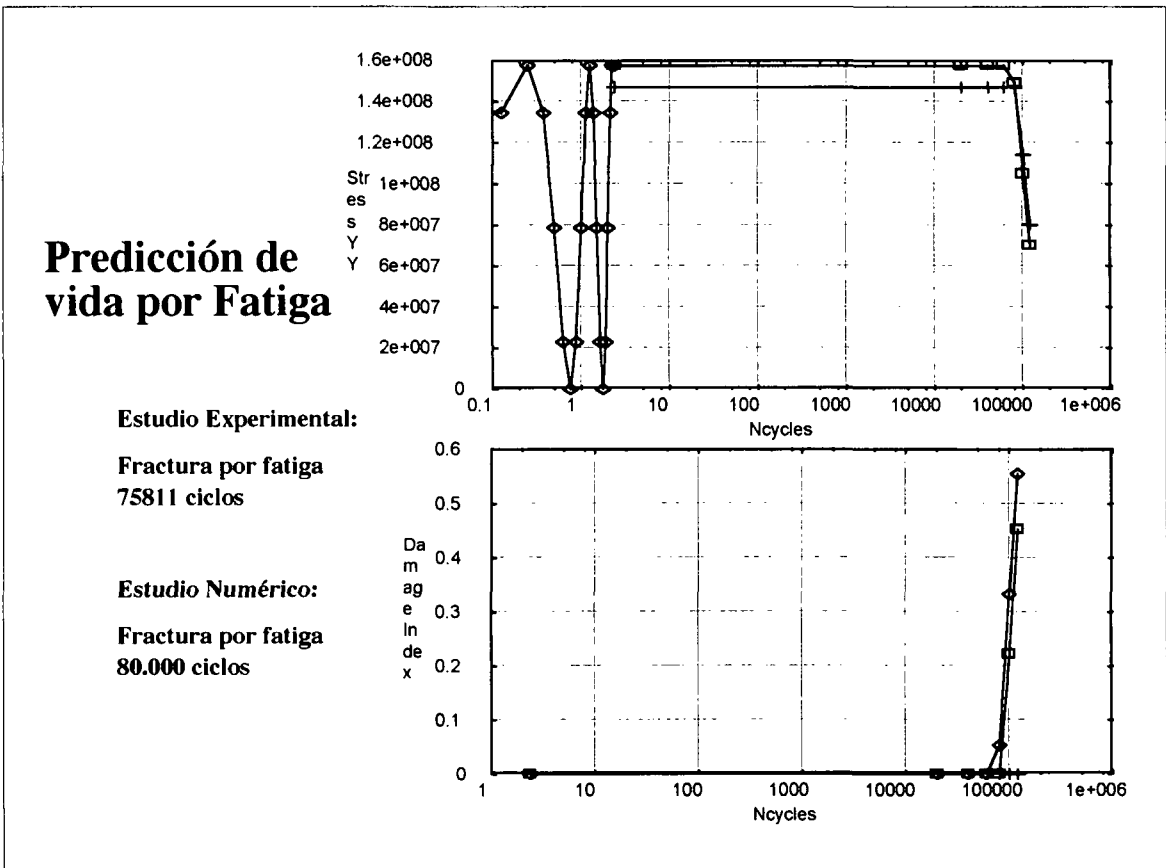
Daño por Fatiga

Comparación de la zona dañada entre el estudio experimental (figura de la izquierda) y el numérico (dos figuras de la derecha).



Conclusions

La mecànica de mitjans continus, assistida per les tècniques numèriques, especialment el mètode dels elements finits, constitueixen una eina molt potent per a l'estudi i la predicció de vida de peces que compleixen la funció estructural. En aquest article només hem ofert una introducció que mostra les bases d'aquesta tècnica i hem ofert diversos exemples que indiquen les grans possibilitats del mètode. Per acabar, indiquem unes referències bibliogràfiques que ajuden a completar la lectura i a adquirir una idea més clara de les possibilitats que aquesta via de treball ofereix.



Bibliografía

- Armero F., Oller S. (2000). A General Framework for Continuum Damage Models. Part I: Infinitesimal Plastic Damage Models in Stress Space. *International Journal of Solids and Structures*. Vol.37, No.48-50, pp. 7409-7436.
- Armero F., Oller S. (2000). A General Framework for Continuum Damage Models. Part II: Integration Algorithms, with Applications to the Numerical Simulation of Porous Metals. *International Journal of Solids and Structures*. Vol.37, No.48-50, pp. 7437-7464.
- Bosh E. (1998). *Tractament Mecanico-numeric del Fenomen de Degradació del Formigó Produït per la Humitat i el Temps*. Tesis de Especialidad de la Carrera de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Universidad Politècnica de Catalunya – Barcelona – España.
- Car E., Oller S., Oñate E. (1998). Un Modelo Elasto Plástico Acoplado con Daño Mecánico e Higrométrico. Aplicación a Pavimentos Flexibles. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Vol. 3, No.1, pp. 19-37.
- COURANT R. (1943). Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. *Bull. Am. Math. Soc.*, Vol 49, 1-23.
- DARCAST (2000). *Enhanced Design and Manufacturing of High Resistance Casted Parts*. Final Technical Report. Craft Project N° : BES2-5637 funded by the European Community.
- FORREST P. (1962). *Fatigue of Metals* – Pergamon Press, London.
- GONZÁLEZ TORRE M. (2001). *Estudio de Fatiga Termo-mecánica, para Piezas Metálicas y Compuestos*. Tesis de Especialidad de la Carrera de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Universidad Politècnica de Catalunya – Barcelona – España.
- LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, OÑATE E. (1989). A plastic-damage model for concrete *International Journal of Solids and Structures*; 25 (3): 299-326.
- LUBLINER J. (1990). *Plasticity Theory* - Macmillan Publishing - U.S.A.
- LUCCIONI B., OLLER S., DANESI R. (1996). Coupled Plastic-Damage Model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 129, No. 1-2, pp. 81-90. 1996.
- MALVERN L. (1969). *Introduction to the Mechanics of Continuos Medium* - Prentice Hall USA.
- MINIHAP(2001)- Enhanced Design And Manufacturing Of Mini-Hydraulic Products. Project Growth No.: G1RD-CT-1999-00079-Mid-Term Report CIMNE - by O. Salomón
- OLIVER J., Cervera M., Oller S., Lubliner J. (1990). A Simple Damage Model For Concrete, Including Long Term Effects. *Second International Conference on Computer Aided Analysis And Design of Concrete Structures*. Vol. 2 pp. 945-958. Zell Am See, Austria. Viena.
- OLLER S., OÑATE E., MIQUEL J. AND BOTELLO S. (1996). A Plastic Damage Constitutive Model for Composite Materials. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 33, No.17, pp. 2501-2518. 1996.
- OLLER S., SUERO A. (1999). Tratamiento del Fenómeno de Fatiga Isotérmica Mediante la Mecánica de Medios Continuos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y diseño en Ingeniería*, Vol. 15, No.1, pp. 3-29.
- OLLER S. (2001). *Fractura Mecánica - Un Enfoque Global*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) - Ediciones UPC.
- OÑATE, E. (1992). *Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal*. Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Barcelona.
- OSGOOD C. (1982). *Fatigue Design*. Pergamon Press, 1982.
- SALOMÓN O, OLLER S, CAR E, OÑATE E. (1999). Thermomechanical fatigue analysis based on continuum mechanics. *Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM'99*, Mendoza, Argentina (Publicado en CD).
- SLUZALEC A. (1988). An analysis of thermal effects of coupled thermo-plasticity in metal forming processes. *Comm. Appl. Num. Meth*; 4: 675-685.
- SUERO A, OLLER S. (1998). Tratamiento del Fenómeno de Fatiga Mediante la Mecánica de Medios Continuos, Monografía CIMNE N° 45, Barcelona.
- WÖHLER A. (1871) Test to determine the forces acting on railway carriage axles and capacity of resistance of the axle – *Engineering*; 11: 199.
- ZIENKIEWICZ, O. C. AND TAYLOR, R. (1994). *El método de elementos finitos Vol. 1 y 2*. Ed. McGraw Hill-CIMNE. Barcelona.