

MODELITZACIÓ NO LINEAL AMB ELEMENTS FINITS

D'ELEMENTS DE FORMIGÓ ARMAT

En el càlcul d'estructures existeixen casos singulars que poden requerir un anàlisi més detallat en el que s'hagi de tenir en compte un comportament més ajustat a les lleis constitutives dels materials (no linealitat del material) i/o s'hagi de contemplar la influència de les possibles deformacions de la mateixa estructura (no linealitat geomètrica). En aquests casos, una de les eines més utilitzades és la simulació mitjançant el mètode dels elements finits. Tradicionalment, al grup de recerca AMADE, aquestes modelitzacions numèriques s'han fet amb programes genèrics d'elements finits, adaptant els models de material disponibles a les característiques del formigó. A vegades però, aquesta adaptació no és fàcil. És per això que s'ha decidit buscar un programa especialitzat en anàlisi no lineal d'estructures de formigó armat que estigui pensat -des dels seus orígens- per aquest tipus d'anàlisis: el programa ATENA.

Així doncs, l'objectiu de l'estudi és l'anàlisi d'elements de formigó armat emprant la simulació numèrica amb el programa d'elements finits ATENA, amb la finalitat de determinar la idoneïtat del programa per a la simulació d'estructures de formigó armat.

L'abast de l'estudi inclourà la verificació dels models constitutius que el programa ofereix per simular formigó -inicialment, sense reforç-, tenint en compte el seu comportament no lineal (ruptura a compressió i fissuració a tracció). Es comprovarà el comportament sota dos estats de tensions diferents; primer de manera uniaxial i després sota un estat de tensions biaxial. A continuació, es passarà a estudiar la seva interacció amb acer. S'analitzaran tres tipologies diferents d'elements estructurals de formigó armat -provetes, bigues i tirants- per tal de validar, respectivament, els tres grans estats de càrrega sota els quals podem trobar el formigó armat: compressió, flexió i la tracció pura. Abans, però, caldrà aprendre el funcionament del programa ATENA, és a dir, la correcta introducció i obtenció de dades. Finalment, es generaran unes guies tècniques que recullin aquest aprenentatge.

Tal i com s'ha comentat, ATENA disposa de diferents models de material per tal de modelitzar tant formigó com reforç. Per la modelització de formigó el programa ofereix dos models diferents: i) CC3DNonLinCementitious2, que és el material que el programa ofereix per defecte i que l'anomenarem amb el nom de Formigó ATENA (FA); ii) CC3DNonLinCementitious2User que ens permet modificar les seves condicions de no-linealitat per tal d'adaptar-lo a les característiques que desitgem i que l'anomenarem Formigó No Lineal (FNL). Addicionalment, el programa ofereix un tercer material, anomenat *SBeta*, per la modelització del formigó no lineal en 2D. Finalment, la

modelització del material de reforç es pot fer amb el material *Reinforcement*, que permet tant la definició d'un comportament lineal (AL) com la definició d'un comportament no lineal (ANL).

Una vegada presentats els models de material disponibles, descrivim les simulacions realitzades. Les simulacions fetes les podem agrupar en dos grans grups: modelitzacions on estudiem les característiques del formigó i modelitzacions on estudiem la seva interacció amb l'acer.

En el primer bloc, comencem estudiant uns assajos uniaxials i després en fem uns altres per estudiar el comportament sota un estat de tensions biaxial. Dels assajos uniaxials validem principalment les característiques bàsiques del formigó (f_t, f_c, E), alhora que ens serveix per aprendre el funcionament del programa i de quina manera s'han d'entrar les dades i obtenir els resultats. De les simulacions biaxials, comprovem principalment la forma de la superfície de falla, que ens serveix alhora per validar els resultats del model uniaxial (en la intersecció amb els eixos) i la simetria existent entre eixos.

A continuació, al segon bloc, per comprovar la interacció amb l'acer, plantegem tres assajos, cadascun amb un estat de càrrega diferent. Comencem estudiant la compressió mitjançant la simulació d'unes provetes amb barres de reforç d'acer. Tot seguit, estudiarem la tracció i un fenomen associat, que és l'efecte tenso-rigidesa (*tension stiffening effect*), en uns tirants. Aquest efecte consisteix en que el formigó suporta tensions entre esquerdes quan el tirant es fissura, proporcionant així una rigidesa addicional a la resposta dels elements de formigó reforçat. Finalment, estudiarem el comportament a flexió amb unes bigues que contindran en el seu interior un armat, amb barres longitudinals i estreps transversals. Amb aquests 3 tipus d'assajos tindrem una visió global dels 3 grans comportaments sota els quals es sotmet el formigó armat: compressió, tracció i flexió.

De les provetes a compressió plantegem 7 assajos diferents que ens serveixen per analitzar si el programa simula correctament la no linealitat del formigó i la de l'acer, per determinar la diferència entre el FNL i el FA i per veure el comportament per a un valor més elevat de resistència a compressió.

Per estudiar l'efecte tenso-rigidesa simulem un primer triant de referència per veure quines són les diferències quan modelitzem amb les dues versions que ens ofereix Atena, el *Fixed Crack Model* (FCM) -tant en 2D com en 3D- i el *Rotated Crack Model* (RCM) -només en 2D-. Una vegada comprovat això, fem 5 simulacions addicionals en les modelitzem una campanya d'assajos experimentals sobre tirants realitzada a les

instal·lacions d'AMADE. D'aquesta manera podem fer una triple comparació ja que tenim els resultats simulats, els experimentals i els analítics que podem extreure de les equacions pertinents.

Per últim, de les bigues a flexió, estudiem 10 casos en Atena 3D amb finalitats semblants al cas de les provetes, és a dir, comprovar les no linealitats del formigó i acer quan interaccionen i veure la diferència entre els formigons no lineals. Els dos últims casos modelitzem la biga completa (en els altres només simulem mitja biga) per tal de comprovar que les condicions de simetria aplicades anteriorment són correctes.

Després del pertinent anàlisi dels resultats obtinguts a través de les simulacions realitzades, arribem a les conclusions següents.

En els casos uniaxials, tant a tracció com a compressió, podem afirmar que les simulacions segueixen el comportament descrit teòricament abans i durant el pic de màxima tensió a tracció/compressió, ja que en tot moment l'error és inferior a l'1%. Tanmateix, després de la ruptura el comportament és força diferent.

En el cas biaxial, per mitjà de la intersecció de la superfície de falla amb els eixos hem aconseguit validar el model uniaxial, ja que els resultats presenten errors inferiors al 2%. Tot i que es produeix una simetria entre els resultats de la part inferior i la superior de la superfície de falla, comparant-a amb el model analític hem detectat una certa discrepància en el cas biaxial a compressió. A més, hem pogut corroborar que el formigó treballant sota un estat de tensions biaxial pot suportar més càrrega que en el cas uniaxial, cosa que no passa a tracció.

De les provetes a compressió podem concloure que el programa reproduïx correctament les no linealitats, tant del formigó com de l'acer. A més, podem afirmar que la modelització numèrica amb formigó ATENA reproduïx fidedignament les expressions analítiques pel comportament de formigó recollides a la Instrucció EHE quan treballa amb acers a la zona no lineal, mentre que presenta algunes diferències significatives d'aproximadament el 15% quan ho fa a la zona lineal. De l'estudi de la influència de la resistència a compressió del formigó en la bondat de les simulacions numèriques d'ATENA, podem confirmar que els resultats numèrics del programa comparen bé amb les expressions analítiques àmpliament acceptades, així com la resta de casos estudiats prèviament en aquest apartat.

Per tal d'avaluar correctament la validesa dels resultats obtinguts amb els tirants hem de diferenciar entre les simulacions 2D i les 3D. Les primeres presenten uns resultats molt iguals amb els diferents models, sobretot en relació a la resposta a la zona d'estabilització d'esquerdes. A més, la càrrega de fissuració s'assoleix correctament en

tots els casos -sempre amb un certa variabilitat-, però en cap cas superior al 15%. També s'ha comprovat que el 2D FCM presenta un error relatiu inferior al RCM, independentment del nombre d'esglaons. També hem après que la fissuració en 2D resulta ser més distribuïda al llarg de tot el tirant, de manera que el dany es troba menys localitzat. Com a conseqüència, els resultats obtinguts són menys propensos a estar afectats per processos locals de dany. Per contra, les simulacions 3D resulten tenir una fissuració més local, fet que ens ha distorsionat alguns resultats obtinguts a 0,4 m de la longitud del tirant. D'aquest fet hem après que la col·locació dels punts de monitoratge de desplaçament a l'extrem del tirant i a la part superior és necessària per obtenir uns resultats satisfactoris de la resposta dels tirants a la zona d'estabilització d'esquerdas. Per contra, els valors de la càrrega de fissuració obtinguts no han estat els esperats. Després d'una anàlisi més profund, hem conclòs que la modelització de la càrrega de fissuració per part d'Atena 3D és deficient i que necessita ser objecte d'estudi en futurs projectes.

Finalment, respecte el comportament del formigó no lineal (FNL) i el formigó Atena (FA) a flexió hem constatat que les diferències són pràcticament inexistents tant si treballen amb acer lineal com amb acer no lineal. Comparant els resultats simulats amb els analítics hem detectat que la càrrega de fissuració no és adequada en els models realitzats en 3D, com tampoc ho és en els models 2D realitzats (mitja biga i biga completa), donat que segueixen amb la mateixa discrepància. Aquest fet que ens permet afirmar que aquesta mancança en la modelització és intrínseca al model del formigó i no pas a les condicions de contorn, càrrega o extracció dels resultats. Alhora, els models 2D han revelat que les simulacions fetes perden exactitud en la determinació de la càrrega de fluència.

En general, aquest estudi ens ha permès aprofundir de manera progressiva en el comportament del formigó armat, vist sota la perspectiva de la compressió, la tracció i la flexió, els tres grans estats de càrrega que està sotmès el formigó. Dels resultats obtinguts en aquest treball confirmem que el programa ATENA és un programa a considerar en un futur per a la simulació d'estructures de formigó armat, ja que ofereix una alta adaptabilitat de les característiques dels materials per part de l'usuari i presenta uns resultats que, en la majoria de les vegades, reproduïx fidelment els comportaments experimentals i/o analítics. Tot i això, els resultats numèrics també ens mostren que cal aprofundir més en l'ús d'aquest programa per tal de garantir una correcta modelització numèrica d'estructures de formigó armat.

Signat

Aniol Castany Feixas



Girona, 10 de juny de 2020