

Capítol 5: Construcció del model

5.1 Introducció

El model realitzat per a analitzar el Qutb ha estat definit amb el programa de preprocés i postprocés, desenvolupat pel CIMNE, GiD 7.2. Aquest programa permet múltiples possibilitats, gràcies a les quals ha estat possible modelar el minaret. Al tractar-se d'una estructura simètrica de revolució s'ha modelitzat la totalitat de l'estructura a partir d'una part. Part del procés seguit s'ha basat en un altre estudi similar, amb resultats satisfactoris (Martínez et al., 2006).

Per tal d'elaborar un model ajustat a la realitat estructural s'han desenvolupat diversos models complementaris que ens han permès d'escollir aquell més correcte i construir el model definitiu. Aquests models s'exposen en la part final d'aquest capítol.

5.2 Construcció de la geometria

Escales

Les escales es consideren com a plans horitzontals que uneixen la part exterior amb el nucli intern. S'ha optat per aquesta hipòtesi per simplicitat geomètrica i de modelització, ja que una escala helicoïdal situada entre seccions variables genera grans dificultats de modelització. D'altra banda, la situació considerada en la hipòtesi no s'allunya de la realitat ja que cada escala actua individualment i no en interacció amb les altres, en conseqüència si considerem una petita variació en la seva situació en altura podem generar plans horitzontals que intentin simular una volta de l'escala helicoïdal. En les dos seccions que es mostren en la figura 5.1 es pot apreciar la disposició adoptada de les escales helicoïdals i la disposició real. S'ha de destacar que el pas de l'escala helicoïdal en cadascuna de les voltes s'ha respectat en el model, tal com es pot apreciar en les acotacions. El gruix del pla que representa un pas de les escales és de 0,2 metres i coincideix amb el gruix real d'un esglaó, d'aquesta manera s'intenta aproximar el model a la realitat (figura 5.2).

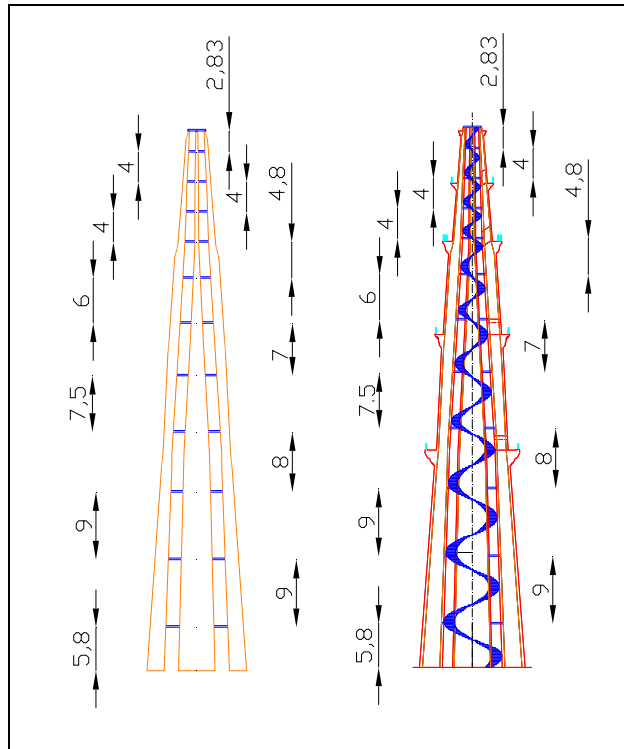


Figura 5.1 Escales del model i les reals

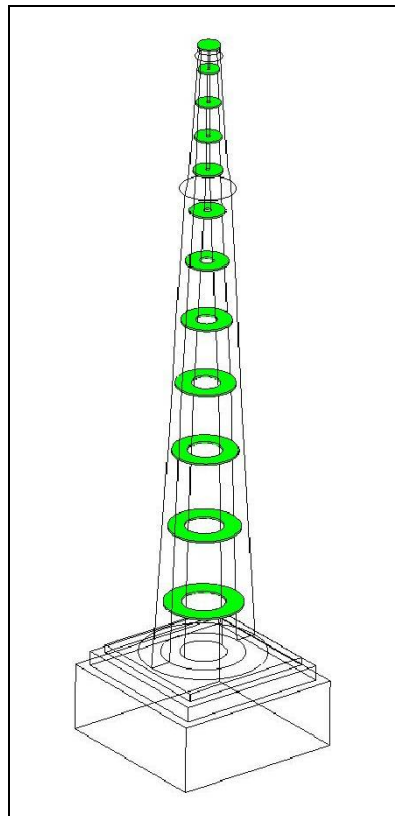


Figura 5.2 Modelització de les escales

Part externa

L'espessor considerat en el model correspon a la capa interna de la part exterior, donat que s'ha suposat que la part interior i exterior de les escales tenen un espessor petit i podrien tenir una importància estructural menor que la part interna. La geometria del model es pot observar en la figura 5.3, en la secció de l'esquerra amb els espessors considerats en la base i en la part superior, la secció real és la de la dreta. La figura 5.4 correspon a la capa exterior en el model generat.

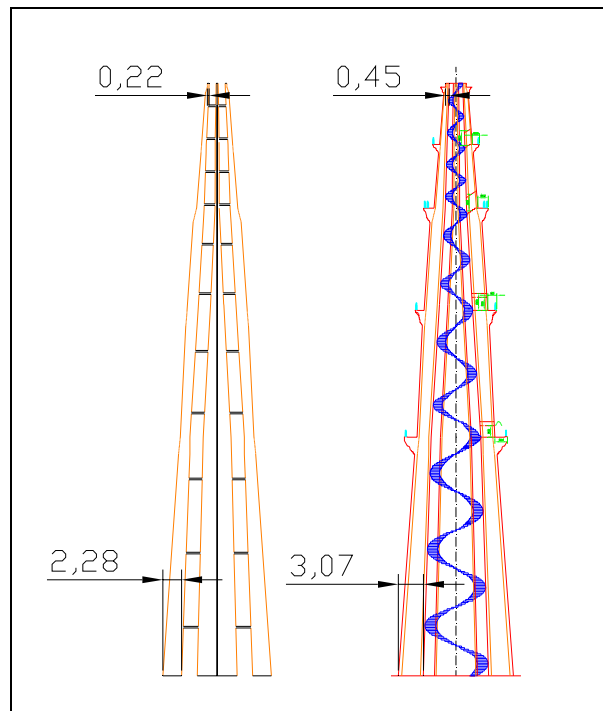


Figura 5.3 Espessors del model i els reals

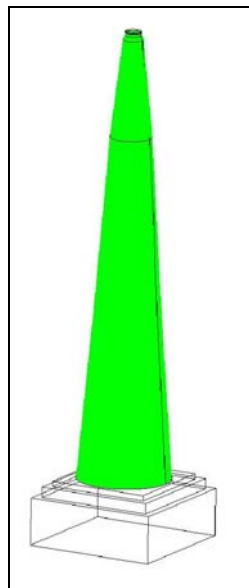


Figura 5.4 Part exterior del model

Nucli intern

L'espessor considerat en el model correspon a la capa interna del nucli interior, donat que s'ha suposat que la part exterior del nucli té un espessor petit i podria tenir una importància estructural menor que la part interna. La geometria del model es pot observar en la figura 5.5, en la secció de l'esquerra amb els espessors considerats en la base i en la part superior, la secció real és la de la dreta. La figura 5.6 correspon al nucli en el model generat.

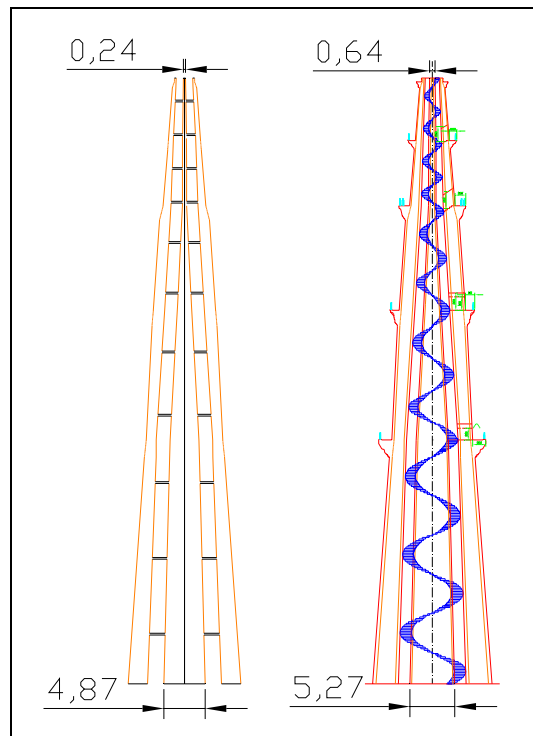


Figura 5.5 Espessors del nucli intern en el model i en la realitat

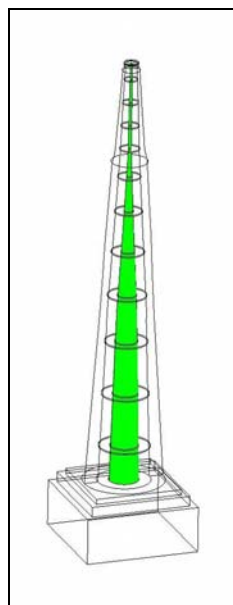


Figura 5.6 Nucli intern del model

Obertures

S'han omès els forats de ventilació i els balcons, donat que realitzem un estudi estructural de caràcter global. Les diferències que s'obtidrien per l'anàlisi estructural serien petites, ja que es realitza un estudi modal. D'altra banda, la consideració dels forats podria elevar la complexitat del model, fet que ens dificultaria la modelització i la interpretació posterior dels resultats. Per fer un estudi posterior més acurat i introduint-hi accions com sismes, seria més adequada la consideració dels forats, donat que la secció transversal queda disminuïda. Tal com es pot observar en la figura 5.7, no s'ha considerat cap forat de ventilació ni els balcons.

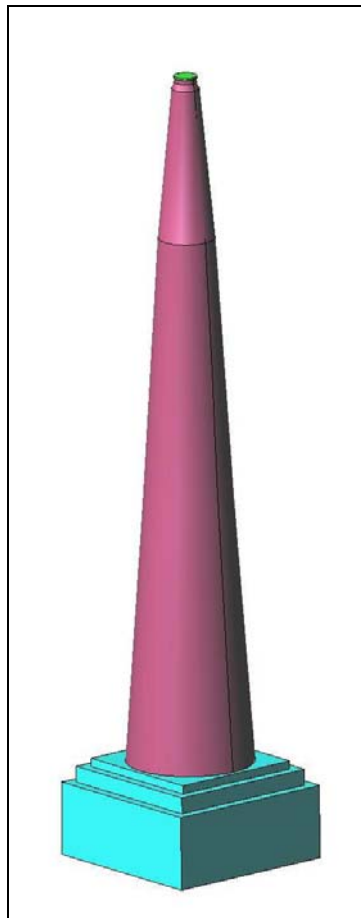


Figura 5.7 Geometria del model

Existència de simetria de revolució

Es considera simetria de revolució respecte l'eix que passa pel nucli intern, per simplificar la seva modelització. Pel que fa a la fonamentació no existeix simetria de revolució, fet que en produeix una pèrdua d'aquesta i que aquesta tingui dos simetries diferents, amb dos plans de simetria per cas. En la figura 5.8 es mostra la simetria de revolució existent en el nucli interior, les escales i la part externa, excepte en les fonamentacions.

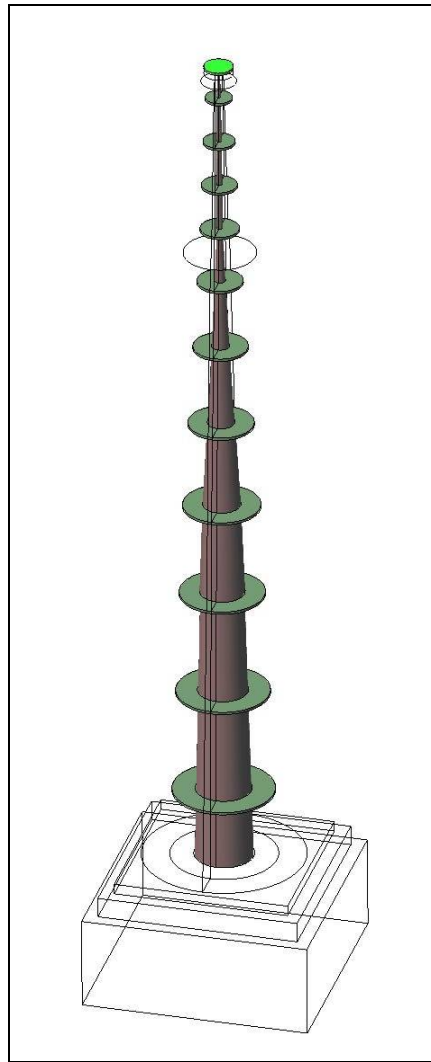


Figura 5.8 Detall de la geometria

Fonamentacions

Les fonamentacions s'han modelitzat segons les dimensions reals. Donat que es disposa d'informació sobre les fonamentacions, s'han modelitzat segons el patró real per intentar aproximar el model a la realitat (figura 5.9). Les fonamentacions al no tenir simetria de revolució com la torre del minaret, ens introdueix certa asimetria que pot introduir una complexitat en l'anàlisi estructural. D'altra banda, s'ha modelitzat d'aquesta manera per després poder interpretar el comportament real del minaret segons els valors obtinguts "in situ".

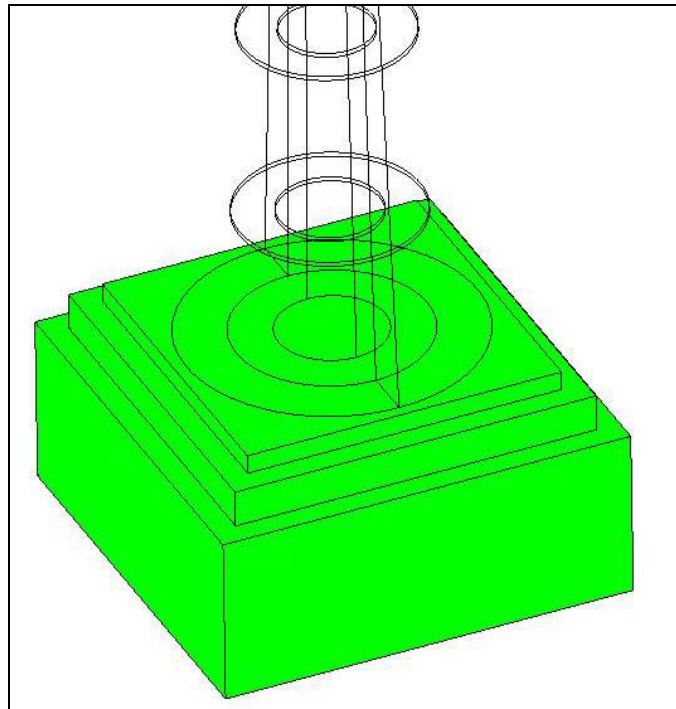


Figura 5.9 Fonaments del model

5.3 Materials

La fàbrica de la qual es compon el Qutb no és uniforme en tota la seva estructura, pel que s'ha considerat utilitzar fàbriques de diferents característiques a diferents alçades del Qutb. En concret, s'ha dividit el model en tres alçades iguals, en les quals podrem treballar amb diferents característiques materials. Aquestes són variables que s'utilitzaran posteriorment per tal d'ajustar-lo a les mesures de que es disposen.

5.4 Condicions de contorn

S'ha considerat que la cara més profunda dels fonaments, en contacte en el terreny natural, estan restringides al moviment en qualsevol direcció (figura 5.10). Aquesta hipòtesis té un cert grau d'incertesa per desconèixer del tot el tipus de restriccions existents. S'ha descartat la modelització del terreny per evitar introduir més variables en l'anàlisi, fet que ens pot dificultar el treball d'interpretació de les variables que intervenen en el model.

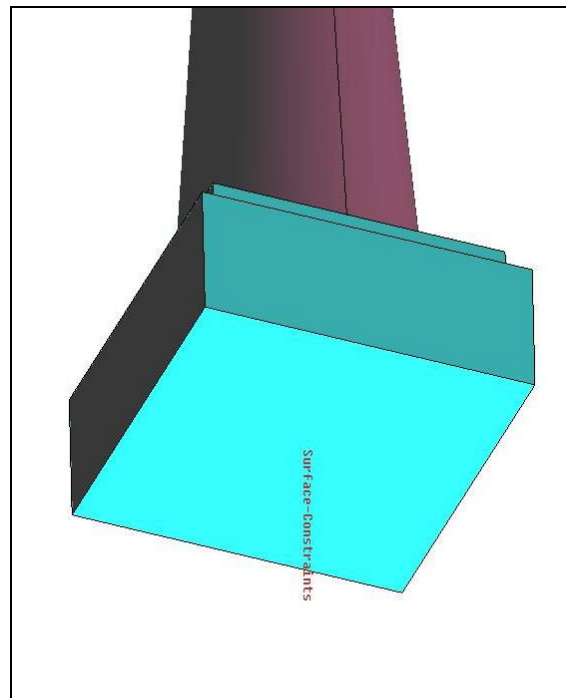


Figura 5.10 Condicions de contorn del model

5.5 Malla del model

Com el model és en 3 dimensions la malla que s'usa és del tipus volumètrica. Dintre d'aquest grup es troben dos tipus d'elements generadors: el tetraedre i l'hexaedre. Encara que l'hexaedre és un element molt més eficaç a nivell de càlcul, no existeix una aplicació que generi una malla hexaèdrica en una geometria complicada com la nostra. Per contra el tetraedre, element clàssic en la generació de malles volumètriques, ofereix una adaptabilitat excel·lent en geometries irregulars i el GiD posseeix generadors potents per a malles d'aquest tipus. L'evident estalvi de temps que suposa poder generar la malla de forma automàtica és el motiu principal que la malla escollida sigui tetraèdrica.

Existeixen dues consideracions que determinen la grandària de mallat que s'escull per a un model. L'equilibri entre elles ens donarà la malla òptima per al càlcul.

El primer aspecte és que com més fina és la malla millor precisió s'obté en els resultats. Segons aquesta variable la malla es crearia amb la grandària més petita possible.

En segon lloc i no per això menys important, tenim el cost, en temps de càlcul, que suposa tenir una certa malla. Com més fina sigui la malla més temps de càlcul serà necessari per a obtenir la solució. En aquest sentit es tendirà a una malla amb el menor nombre d'elements.

Per generar-la s'han mallat els volums, amb un tamany de malla de 4 metres, amb un error cordal de 0,1 i un tamany mínim de 0,01 metres. El nombre total de tetraedres generats és de 25.011. El nombre d'elements de la malla és suficient per

obtenir un comportament correcte de l'estructura. En la figura 5.11 es pot apreciar la densitat de la malla. En la figura 5.12 es pot apreciar el contorn de la malla.

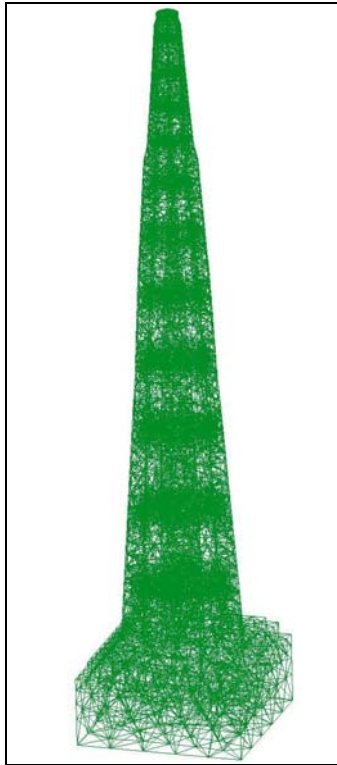


Figura 5.11 Malla del model

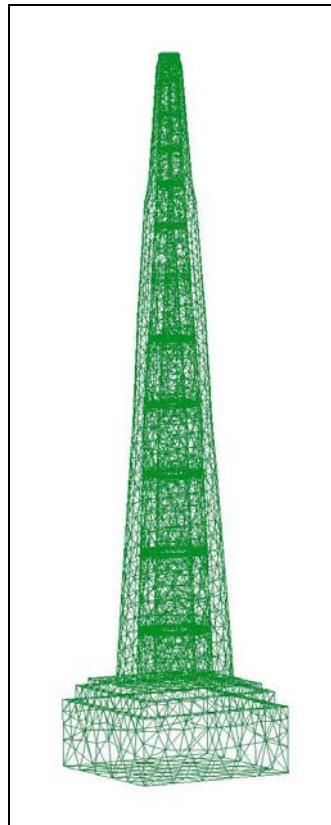


Figura 5.12 Contorn de la malla

La qualitat de la malla es pot analitzar segons diferents criteris. En el nostre cas estudiarem tres: criteri del menor angle dièdric, criteri del volum i criteri de la mínima aresta. El criteri del menor angle dièdric és el més vàlid pel nostre cas, donat que tenim diferents tamanyes de tetraedres, ja que aquest ve condicionat per la geometria existent del model, i l'angle és independent del tamany, fet que no succeeix pels restants criteris, més vàlids en casos de volums més uniformes (CIMNE, 2006).

Criteri de menor angle dièdric

Aquest criteri es fonamenta en que els elements amb menor angle del díedre són pitjors. Aquest és bon criteri en cas de tetraedres. Tal com es pot observar en la figura 5.13, la distribució s'aproxima a una normal, els angles majoritaris són entorn de 30° a 40°. I només un petit nombre de tetraedres tenen un angle menor als 15°. Com a conclusió es pot dir que la qualitat de la malla és correcta.

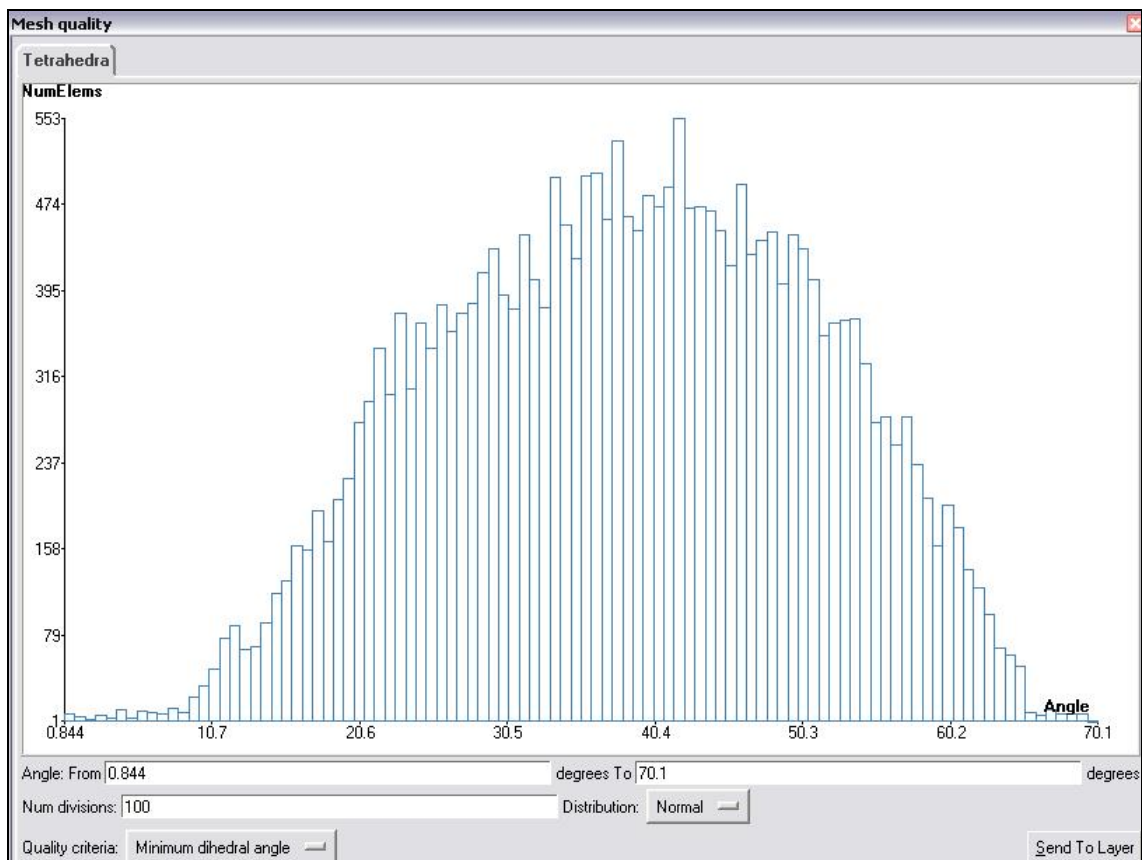


Figura 5.13 Criteri del menor angle dièdric

Criteri de volum

En la figura 5.14 es fa patent que la geometria del minaret condiciona el volum dels tetraedres. Donat que necessitem tetraedres relativament més petits per les zones de les escales, tindrem major nombre de tetraedres amb menor volum. Situació del tot contrària en el cas dels fonaments, on els volums dels tetraedres seran molt més grans i, per tant, seran menors en nombre. Aquests fets es reflecteixen clarament en el següent gràfic. El criteri del volum queda en aquest cas sense valor qualitatiu.

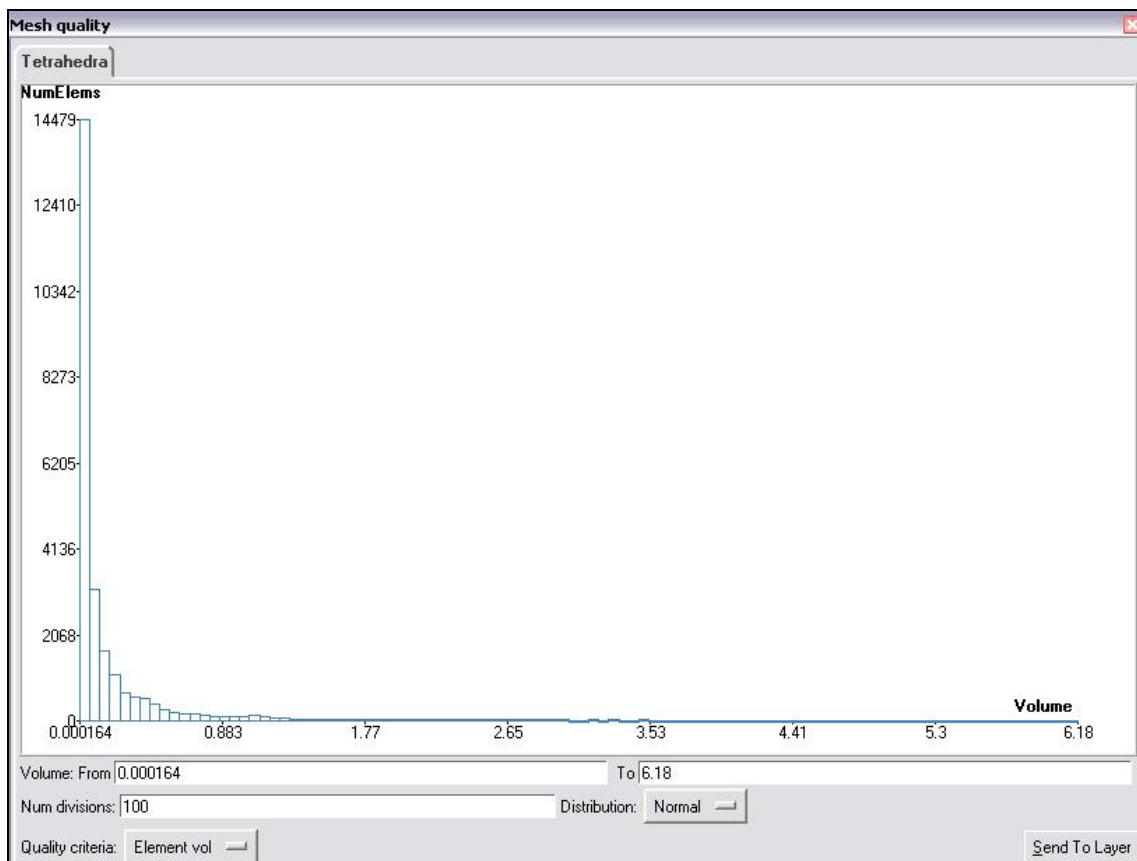


Figura 5.14 Criteri de volum

Criteri de la mínima aresta

Elements amb arestes petites són considerats pitjors. En la figura 5.15 es mostren clarament dos tipus de tetraedres, el primer que correspon al pic major, són els elements situats en les escales i prop d'aquestes; el segon correspon a la capa exterior del minaret i dels fonaments. Tal com es pot observar si apliquen el criteri per cada tipus de tetraedre, es fa patent que la qualitat és correcta, doncs tenim un nombre mitjà de tetraedres amb aresta mínima menor que la majoritària per a cada cas de tetraedre.

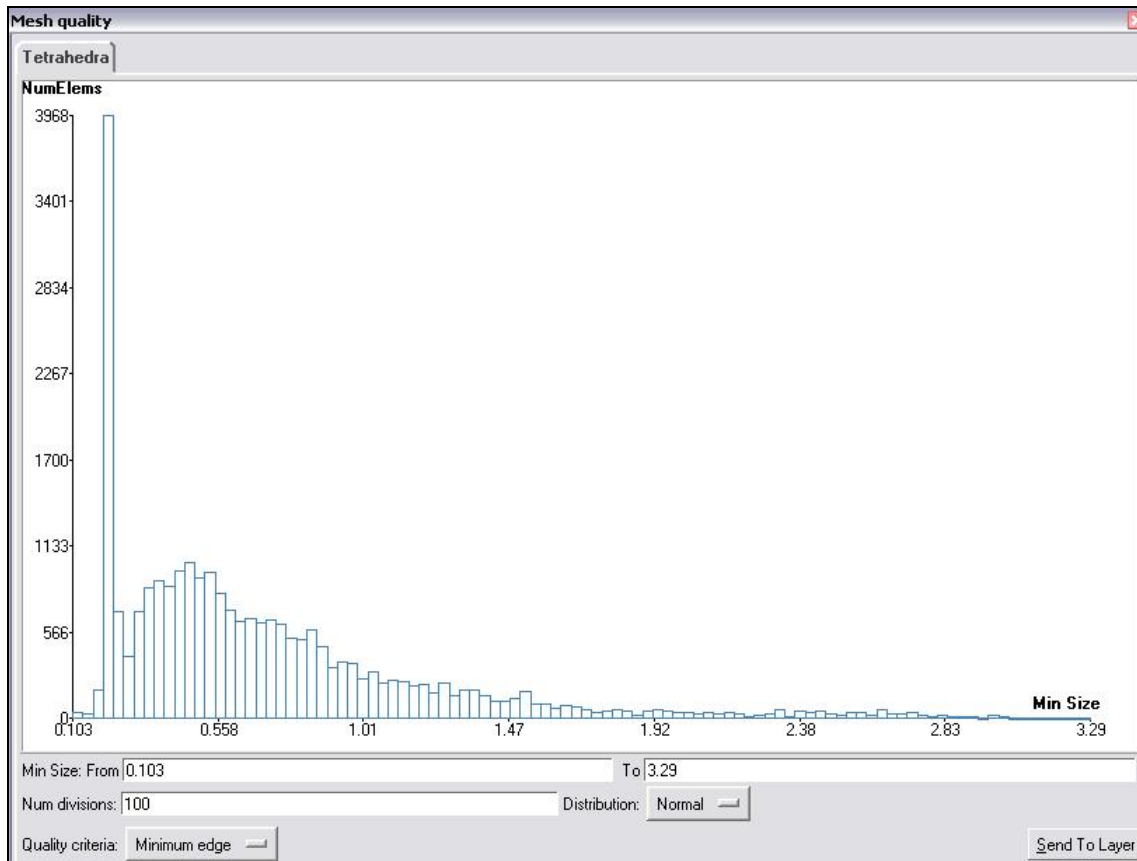


Figura 5.15 Criteri de la mínima aresta

5.6 Models complementaris

Un dels aspectes bàsics per tal de modelar correctament el minaret és esbrinar el comportament estructural de cadascun dels elements que l'integren. Per tant, s'ha considerat oportú generar diferents models estructurals del minaret per tal d'aconseguir aproximar el model a la realitat mesurada "in situ".

L'element que més dubtes presenta són les escales, les quals poden representar un cert grau d'unió del nucli amb la part exterior. D'aquesta manera es generen tres models que van dels dos extrems: des del que no té cap tipus d'unió amb les dos parts fins al que les dos parts estan unides solidàriament formant una secció massissa en tota l'alçada.

Un cop generats els models es farà un estudi modal i es compararan els resultats obtinguts amb els mesurats "in situ". S'analitzaran els resultats i s'escollirà l'opció més correcta per modelar les escales i consegüentment el minaret.

Model 1

Aquest model té la peculiaritat d'estar format per la part exterior del minaret, sense tenir nucli interior ni escales (figures 5.16 i 5.17).

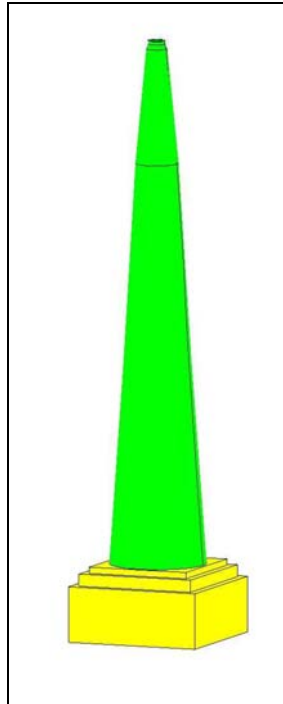


Figura 5.16 Model 1, forma general

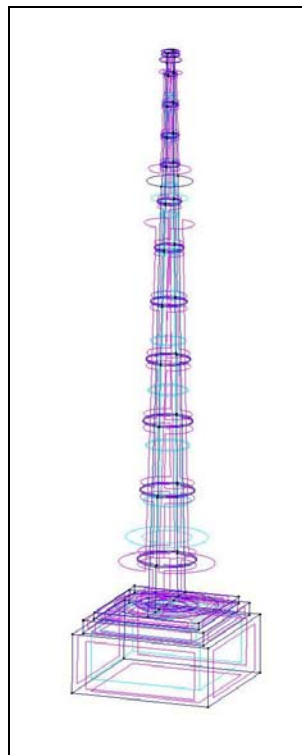


Figura 5.17 Model 1, detall geometria

Model 2

Aquest model és el que té en consideració la contribució de les escales a nivell estructural, unint el nucli interior amb la part externa del minaret (figures 5.18 i 5.19).

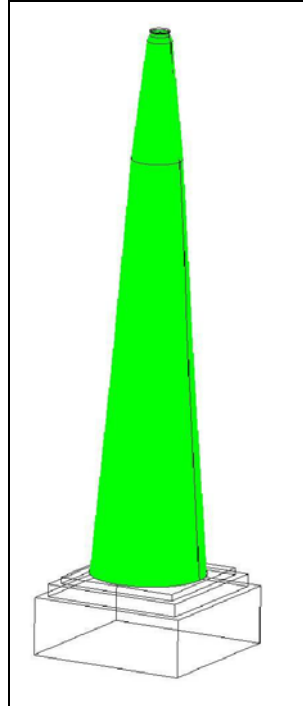


Figura 5.18 Model 2, forma general

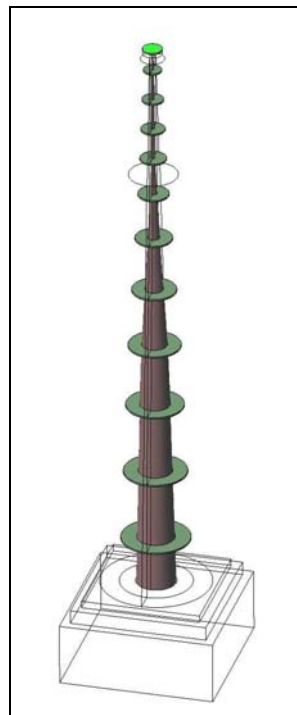


Figura 5.19 Model 2, detall geometria escales

Model 3

Aquest model és el que té en consideració la contribució de les escales de forma que es considera el minaret com una secció massissa en tota la seva alçada, unint totalment el nucli interior amb la part externa del minaret (figures 5.20 i 5.21).

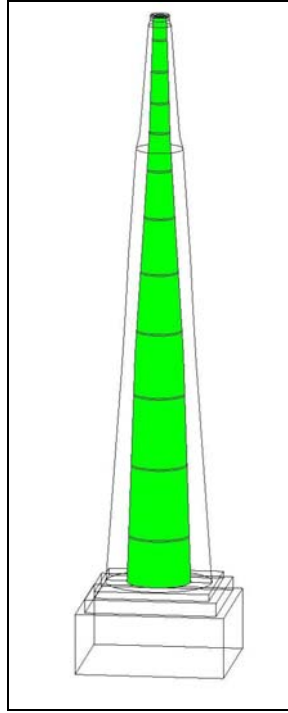


Figura 5.20 Model 3, part intermitja massissa

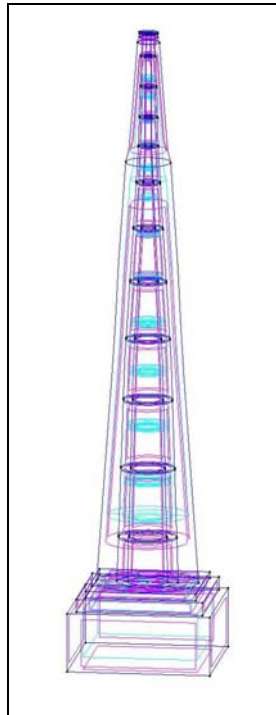


Figura 5.21 Model 3, detall geometria