3. ESTUDI D'INFILTRACIÓ AMB MODEL ELASTIC

3.1. OBJECTIUS

L'estudi d'infiltració pretén estudiar com es produeix aquesta en el talús objecte d'estudi mitjançant un càlcul hidromecànic acoblat. Al mateix temps, aquesta fase d'estudi serveix per valorar quines són les millors condicions inicials i de contorn per un millor rendiment i funcionament de les simulacions.

3.2. DOMINI DE CÀLCUL, CONDICIONS INICIALS I CONDICIONS DE CONTORN

El domini estudiat en aquest cas és un talús sintètic amb un pendent de valor 0.5 les dimensions del qual es poden observar en la Figura 16. En la mateixa figura es mostra la malla de càlcul utilitzada en aquest cas. Es tracta d'una malla no estructurada composada per elements triangulars de tipus normal, és a dir que hi ha un node en cada vèrtex i no en els vèrtex i en els punts mitjos dels elements tal com passa en els elements de tipus quadràtic. La malla es composa de 1427 nodes i 2709 elements.

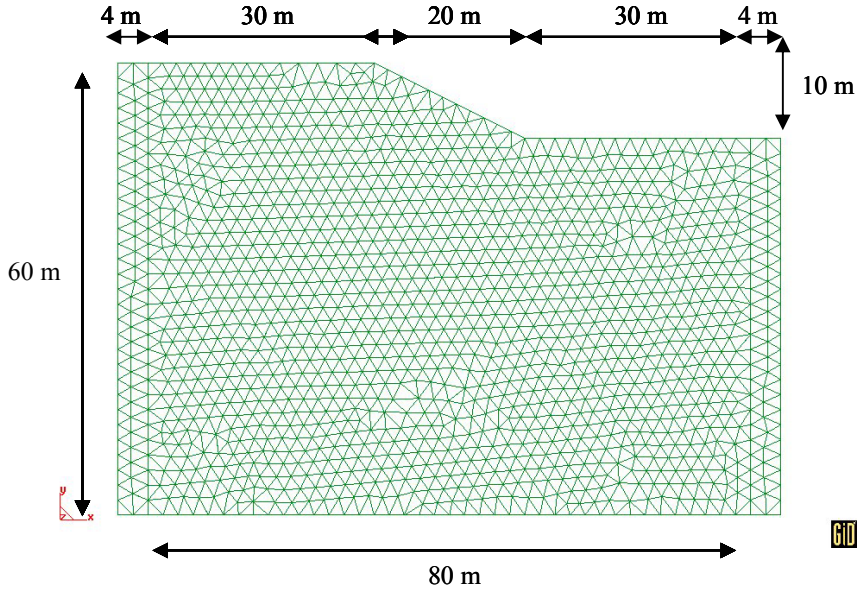

Figura 16 Geometria i dimensions del talús considerat.

Les hipòtesis aplicades a aquest cas són les de estudi bidimensional en deformació plana, pressió atmosfèrica constant (0.1 MPa) i temperatura també constant. Aquestes hipòtesis són les mateixes per a totes les simulacions que s'han dut a terme en el present treball. En el cas elàstic la malla de discretització del domini d'estudi està composada per elements triangulars (Figura 16).

Es tracta d'un talús homogeni d'argila la pendent del qual té un valor de 0,5. L'argila que s'ha utilitzat per a totes les simulacions d'aquest treball és l'argila vermella de Barcelona, present en els terrenys en els que s'ubica el Campus Nord per tal de donar un caire més aplicat a les simulacions. Les dades característiques corresponents a aquest tipus de sòl es poden veure en la Taula 6 i han estat preses de l'estudi de Barrera (2002) [4].

PROPIETATS MECÀNIQUES		PROPIETATS HIDRÀULIQUES	
Mòdul de Young *E*	30 MPa	Permeabilitat (isòtropa) Kw	$6.9 \cdot 10^{-9}$ m/s
Coeficient de Poisson *v*	0.33	Paràmetres de la corba de retenció (model de Van Genuchten 1980, segons Barrerra, 2002 [4])	
Porositat *n*	0.46	α	15.25 MPa^{-1}
Mòdul d'inflament per canvis en succió *a*	$5 \cdot 10^{6}$ MPa^{-1}	m	0.27
Densitat seca	1.45 gr/cm^3	n	1.38
Densitat de les partícules	2.71 gr/cm^3	Expressió de la corba de retenció segons el model de Van Genuchten 1980 [7] $Sr = \left(\frac{1}{1+(\alpha s)^n} \right)^m$ (veure corba de retenció en Annexe 1)	

Taula 6 Propietats del sòl utilitzat en les simulacions.

Les columnes que s'observen a ambdós costats del talús corresponen al mateix tipus de sòl, però amb la permeabilitat tres ordres de magnitud inferior. Els paràmetres de comportament mecànic són idèntics als del sòl que conforma la resta del talús i en aquest sentit la seva incidència és nul·la. Aquestes columnes s'han afegit per tal d'impedir que es produeixin sobrepressions intersticials.

Quan no s'afegeixen aquestes columnes en els laterals del domini del talús, es genera una acumulació d'aigua en la part dreta del talús quan s'hi aplica un règim d'infiltració i, tot i que la cara superior del talús permet la sortida i l'entrada d'aigua, es produeixen pressions intersticials massa elevades i el programa deixa de convergir. D'aquesta forma, les columnes de sòl més permeable actuen en favor de la convergència del programa, permeten una distribució lineal de pressions d'aigua i al mateix temps permeten el moviment del nivell freàtic.

Pel que fa a les condicions inicials del problema hidràulic, s'imposa una distribució hidrostàtica de la pressió d'aigua de forma que el nivell freàtic se situa 15 metres per sota de la plataforma més elevada del talús (Figura 17). Per sobre del nivell freàtic s'imposa un gradient de succió de tipus lineal de forma que en els punts més allunyats de la làmina d'aigua s'arriba a una pressió negativa de -0.15 MPa. Per tant la distribució de pressions d'aigua és lineal tant per sota com per sobre del nivell freàtic.

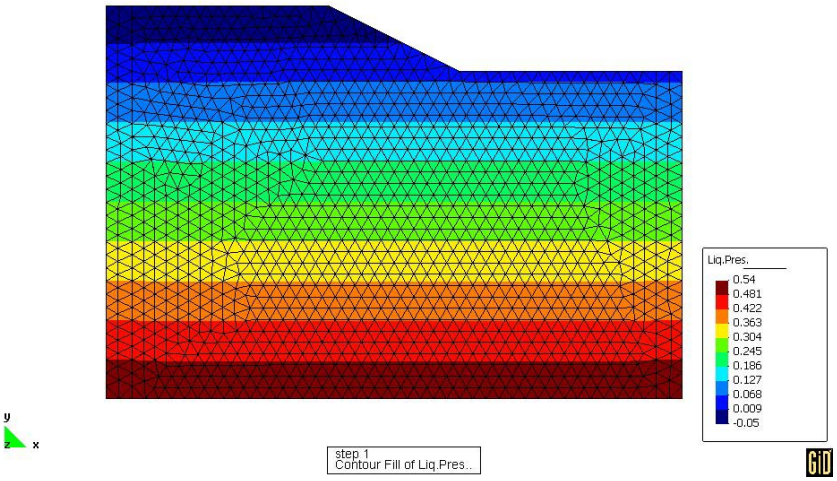

Figura 17 Distribució inicial de pressions d'aigua. Valors en MPa.

Per arribar a un equilibrat ràpid de les pressions d'aigua en l'estadi inicial es crea un primer interval en el que s'augmenta la permeabilitat del medi en tres o quatre ordres de magnitud per tal que el codi equilibri les pressions d'una forma ràpida.

Pel que fa a les condicions de contorn, en els límits laterals s'imposa flux nul, i en el contorn inferior o base del talús es fixa la pressió. Aquest valor és el corresponent a la columna d'aigua que genera la posició inicial del nivell freàtic. Val a dir que les propietats hidràuliques del medi determinen la importància d'aquesta condició en els canvis de la posició del nivell freàtic. Quant menys permeable sigui el medi, més temps s'inverteix en equilibrar les pressions d'aigua respecte a la condició de contorn en el límit inferior del domini. Com s'ha vist en la fase de revisió bibliogràfica la profunditat d'afectació pel que fa al canvi de pressions intersticials degut a la infiltració depèn de la relació entre la permeabilitat i el coeficient d'emmagatzematge k/m_w (Ng i Shi, 1998 [39]).

La darrera condició de contorn a imposar en el problema hidràulic és el flux per precipitació. La precipitació imposada ha estat l'espectre anual de pluja de la ciutat de Barcelona mesurat a l'observatori Fabra l'any 2002 (Figura 18). La simulació d'aquest espectre pluviomètric s'ha portat a terme utilitzant les intensitats diàries mesurades i generant un interval diferent per cada un dels dies de l'any.

La imposició de la pluja s'ha realitzat sobre tot el contorn superior exceptuant el límit de les columnes de sòl més permeable, ja que la imposició de flux en aquestes zones genera problemes de convergència per sobrepressions d'aigua en l'extrem dret del talús.

En la resta de contorn superior s'imposa el flux de forma que es permet la circulació d'aigua en dos sentits: es permet la entrada i la sortida d'aigua al mateix temps. El codi regeix la imposició de les condicions de pressió i de flux mitjançant una única de expressió:

$$j_l^w = j_l^0 + \gamma_l (P_l^0 - P_l) \quad (34)$$

On:

j_l^w : Flux d'aigua

j_l^0 : Flux d'aigua a imposar

γ_l : "*Leakage coefficient*" o coeficient de goteig.

P_l^0 : Pressió a imposar

P_l : Pressió de líquid

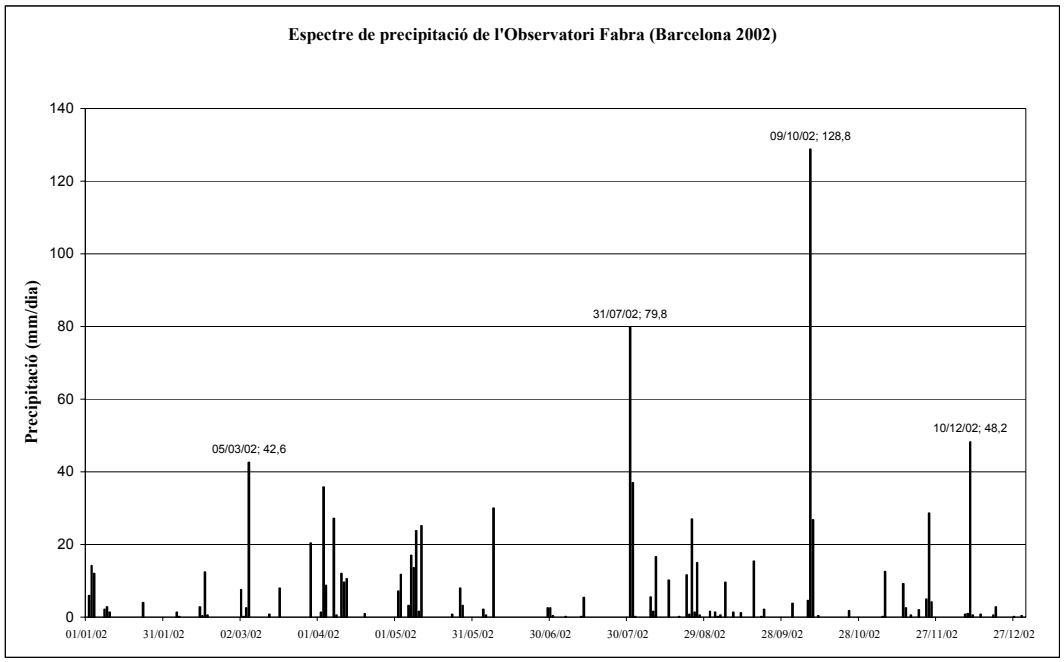

Figura 18 Espectre d'intensitats diàries de pluja durant l'any 2002 (Observatori Fabra)

El valor del coeficient γ_l és el que determina si la condició és en pressió ò en flux. Per imposar condicions de pressió el valor del coeficient ha de ser positiu i molt elevat (de l'ordre de 10^6); en canvi si el que es pretén és fer una imposició de flux s'utilitzarà un valor baix o nul d'aquest paràmetre. El valor que s'ha imposat per imposar els fluxos corresponents a la intensitat diària de precipitació ha estat el d'un gamma elevat en valor absolut i de signe negatiu, ja que aquest valor permet el flux en dos sentits, sortida i entrada.

Quan la capacitat d'infiltració del sòl és sobrepassada per la precipitació, és a dir quan el sòl se satura, no es permet l'acumulació d'aigua en la cara superior del talús. D'aquesta forma, en els nodes de la cara superior del talús la pressió d'aigua mai serà superior a la pressió atmosfèrica ja que no s'hi pot acumular una columna d'aigua. Així, quan els porus corresponents a aquests punts del domini assoleixen aquest valor de pressió (0.1 MPa), vol dir que el sòl s'ha saturat i que l'aigua que segueix caient sobre el talús se'n va per escolament superficial.

Pel que fa a les condicions de tipus mecànic, en els contorns laterals es bloqueja el moviment horitzontal, i en el contorn inferior es bloqueja el moviment vertical. En la cara superior del talús s'imposa una pressió constant de 0.1 MPa com a condició de contorn que correspon al valor de la pressió atmosfèrica. No s'utilitza cap tipus de condició inicial de tipus tensional i es deixa que el codi faci el equilibrat tensional donant com a resultat una distribució lineal de tensions. La relació entre les tensions verticals i horitzontals ve donada per la següent expressió de K_0, obtenint per aquesta constant un valor de 0.5 prenent un valor de υ de 0.33.

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (35)$$

3.3 ESTUDI DE LA INFILTRACIÓ

Un dels objectius principals de l'estudi amb el model elàstic és l'anàlisi de la infiltració per precipitació en el talús proposat; dit d'una altra manera, l'estudi de la variació del grau de saturació i les pressions d'aigua després d'un any de pluja, prenent com a punt de partida les condicions inicials esmentades. S'han escollit diverses seccions del talús i en elles s'hi ha generat els perfils de pressió intersticial i de grau de saturació (veure en l'Annex 2 la situació exacte de les seccions considerades), obtenint l'evolució dels mateixos al llarg de l'any.

En les figures 19, 20, 21 i 22, s'observa que en tot el talús es genera un front de saturació que avança en profunditat. En la part superior del talús, l'abast d'aquest front en profunditat és de 3,4 metres, mentre que en la secció central del talús la profunditat assolida pel front de saturació és de 3,5 metres. En canvi en el peu i en la plataforma inferior del talús, l'abast de l'avanç del front de saturació és major, d'uns 5 metres. Això és degut a que en la part inferior el nivell freàtic està molt més a prop de la superfície del talús, i en conseqüència, les pressions de succió corresponents són molt més baixes. Això implica un grau de saturació més elevat i una major permeabilitat relativa en front al flux d'infiltració.

En els estudis revisats en la fase de recerca bibliogràfica s'apunta a la formació d'un nivell freàtic penjat com un element a considerar en l'evolució del valor del factor de seguretat. En el nostre cas s'observa la formació d'un nivell freàtic penjat o front de saturació tenint en compte que es considera que el medi està saturat quan els graus de saturació són iguals o superiors a 0.9.

En la part superior del talús, la presència d'aquest nivell, al cap d'un any, es limita al primer metre de profunditat (Figura 19). En aquesta zona, la formació de la capa d'aigua a la profunditat esmentada té lloc al cap de 120 dies, és a dir, quatre mesos, i l'avanç d'aquest front durant la resta de l'any és pràcticament negligible. En la secció central del talús, en canvi (Figura 20), s'observa la formació d'un nivell colgat a una profunditat de 1,75m al cap de 239 dies, i al final de l'any la profunditat d'aquest nivell és de 3 metres.

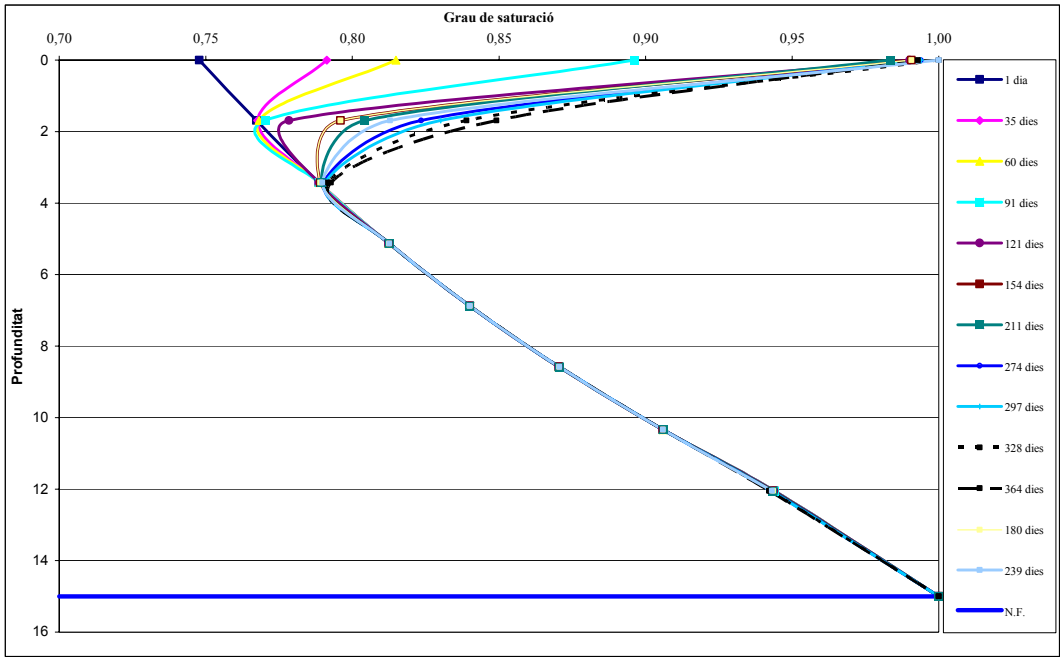

Figura 19 Evolució del perfil de grau de saturació en la part superior del talús (vertical del node 1341).

En el peu i la part inferior del talús la proximitat del nivell freàtic principal dóna una repartició inicial de contingut en aigua molt propera a la saturació. De fet tots els punts dels perfils estan, pràcticament, per sobre d'un grau de saturació de 0.90. (Fig. 21 i 22).

En aquestes zones perd interès l'estudi de la profunditat del front de saturació, ja que per condicions inicials els punts es troben bastant propers a la saturació completa. El fet més interessant que es produeix en l'evolució d'aquests perfils és la connexió entre el front de saturació i el nivell freàtic.

En la secció corresponent al peu del talús la connexió entre el nivell freàtic inicial i el front de saturació en descens es produeix al cap de 225 dies. En les evolucions mostrades dels perfils de saturació, el contacte entre els dos nivells es manifesta per mitjà d'un perfil vertical en el valor de grau de saturació 1. Això vol dir que el sòl està completament saturat en profunditat. Tot i així, es pot observar que el perfil corresponent a 364 dies s'inclina cap a valors més baixos del grau de saturació degut a un període més sec en els últims 30 dies de l'any.

La variació del valor del grau de saturació registrada a causa d'aquest període més sec, així com la que es produeix entre els 90 i els 120 dies, són variacions molt petites, de l'ordre de menys de 0.05 punts. Aquests dos períodes d'assecament superficial s'observen millor en el perfil corresponent a la plataforma inferior del talús (Figura 22).

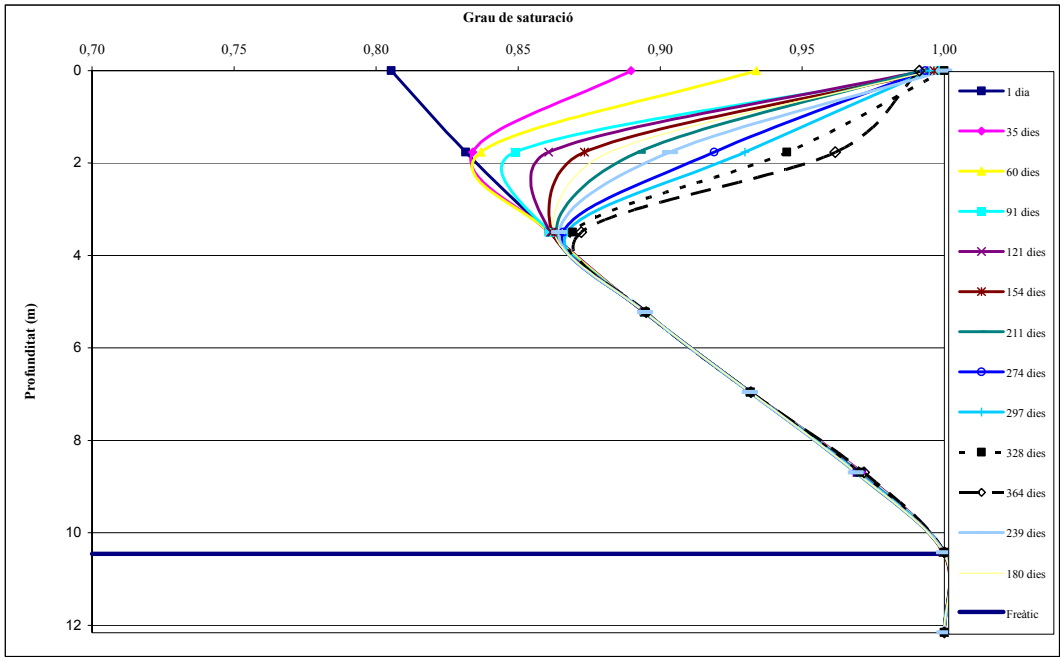

Figura 20 Evolució del perfil de grau saturació en la part central del talús (vertical del node 973).

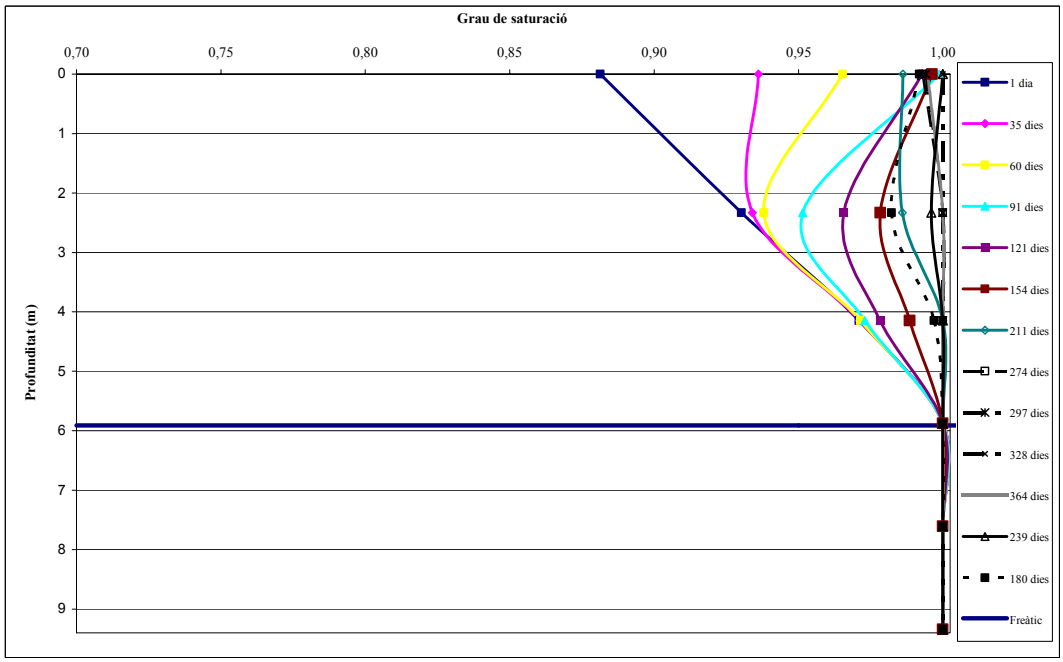

Figura 21 Evolució del perfil de grau de saturació en el peu del talús (vertical del node 808).

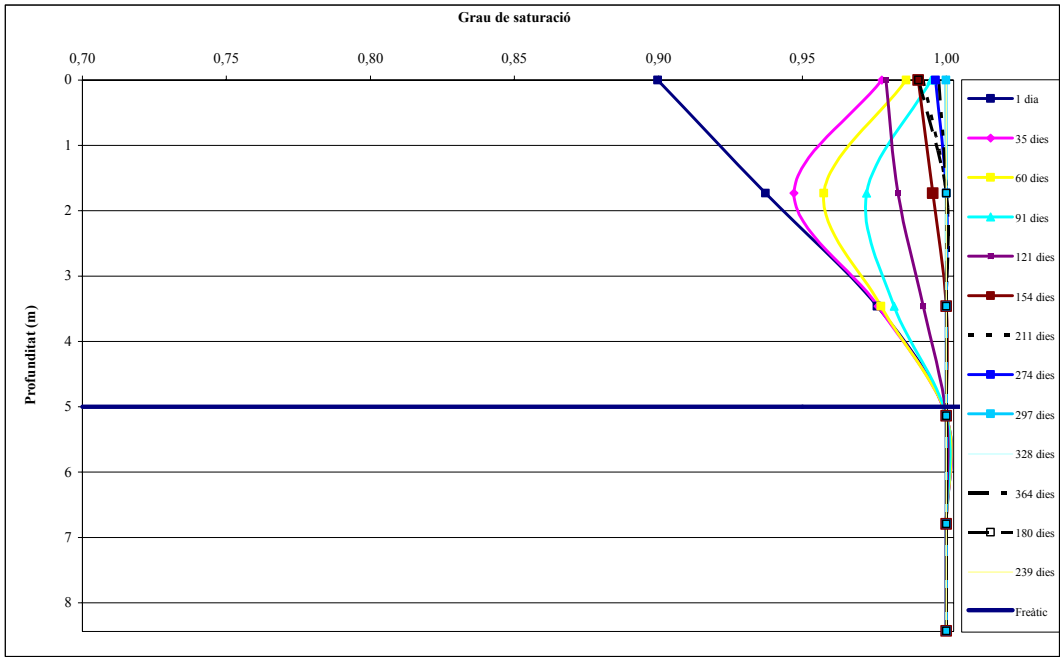

Figura 22 Evolució del perfil de grau de saturació en la plataforma inferior del talús (vertical del node 657).

En el cas del període sec que té lloc entre 90 i 120 dies, no es pot determinar amb exactitud quina és la profunditat d'afectació d'aquest assecament, però és com a màxim d'1 metre. En el cas del període sec que té lloc els últims dies de l'any, la variació és més petita, i es pot veure que, encara que poc, el grau de saturació es veu reduït fins a una profunditat de 1,5 metres (Figura 22).

Una de les millors maneres de valorar l'efecte de l'augment del grau de saturació en profunditat és observant l'evolució dels perfils de pressió de les seccions considerades. Els perfils més interessants són els que s'han obtingut en el peu del talús i en la plataforma inferior del mateix.

En les Figures 23 i 24 es pot apreciar que en els primers 90 dies els perfils es "desenganxen" per la part superior, varia la distribució de pressions d'aigua a causa de l'augment del grau de saturació lligat a l'avanç del front de saturació en profunditat. En el perfil corresponent a 120 dies és desplaça cap a la dreta però per a tots els punts del perfil, tant en el cas del peu del talús com en el de la plataforma interior. Això vol dir que els punts més profunds comencen a notar l'efecte de la ressaturació i l'aigua continguda en els porus comença a connectar-se i tendeix a adoptar la distribució hidrostàtica corresponent a la nova columna d'aigua.

Els perfils de pressió es fan ressò també de l'assecament que es produeix en superfície en els períodes més secs. Donat que disminueix el contingut d'aigua en la zona més superficial del sòl per manca de pluja, aquests punts pateixen una disminució dels valors de pressió, que d'igual manera que en el cas del grau de saturació, no és de magnitud molt considerable.

En el cas del peu del talús la distribució de pressions que s'obté al cap de l'any no és ben bé la que correspondria a una làmina d'aigua situada en superfície, ja que el perfil és una mica irregular i demostra que la connexió del front de saturació amb el nivell freàtic no ha tingut lloc de forma completa. En canvi, el perfil corresponent a la plataforma inferior del talús mostra una distribució lineal que es correspon millor amb una làmina d'aigua en superfície.

Tot i que els perfils de saturació ens mostren de quina manera es produeix la infiltració a causa de la precipitació en el medi, els perfils que mostren més interès en el cas d'un estudi d'estabilitat són els perfils de pressió; i val a dir que, el més eloqüent en el nostre cas és el perfil corresponent al peu del talús. En aquest perfil observem que al cap d'uns 270 dies tots els punts compresos entre la superfície del talús i el nivell freàtic passen de tenir pressions de porus menors a la pressió atmosfèrica (negatives) a tenir valors de pressió d'aigua per sobre del valor de la pressió atmosfèrica (positives). És a dir, que passem de tensions netes a tensions efectives, cosa que farà disminuir notablement el factor de seguretat del talús.

En el perfil corresponent al peu del talús (Figura 23) podem constatar que, pel que fa a les pressions, no es pot considerar que la situació sigui la corresponent a la presència d'una columna d'aigua amb làmina en superfície. Si fos així, la pressió a registrar a 8 metres de profunditat i al cap de 364 dies de pluja seria de 0,18 MPa (pressió d'aigua + pressió atmosfèrica), mentre que el que enregistrem és una pressió de 0,14 MPa. Tot i així, en els punts situats entre el nivell freàtic i la superfície del talús el canvi en el valor de les pressions és considerable. Per exemple, en un punt situat a 4 metres de profunditat i a dos per sobre del nivell freàtic es passa de 0,0849 MPa a 0,116 MPa. Aquesta variació es pot considerar com la variació mitja del valor de la precipitació al cap d'un any de pluges per a tots els punts dels perfil.

En la plataforma inferior del talús (Figura 24), la variació és del mateix ordre de magnitud per a un punt situat 1.5 metres per sobre del nivell freàtic i a 3.5 metres de profunditat, encara que en aquest punt el perfil de pressions obtingut al cap de 364 dies mostra una distribució més lineal que la observada en el peu del talús. Això és degut a que, a igualtat de profunditat, els punts del perfil del peu de talús tenen unes pressions de succió més elevades que els del perfil de la plataforma inferior; i aquestes ofereixen més dificultat al pas de l'aigua de precipitació, provocant un ascens més feixuc del grau de saturació i del valor de les pressions.

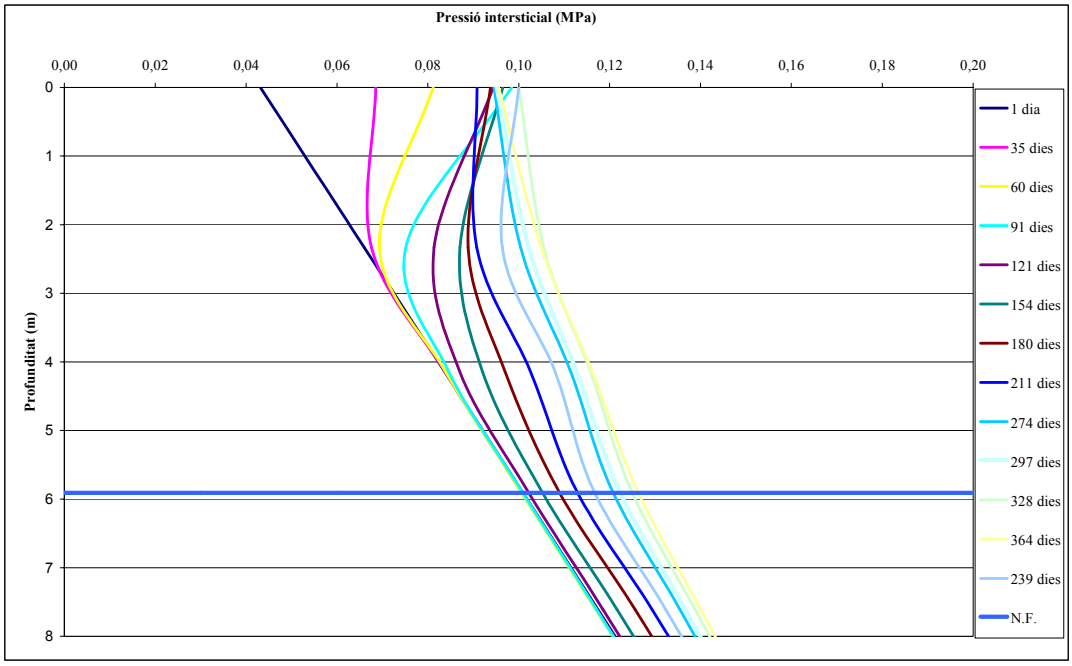

Figura 23 Evolució del perfil de pressions en el peu del talús (vertical del node 808).

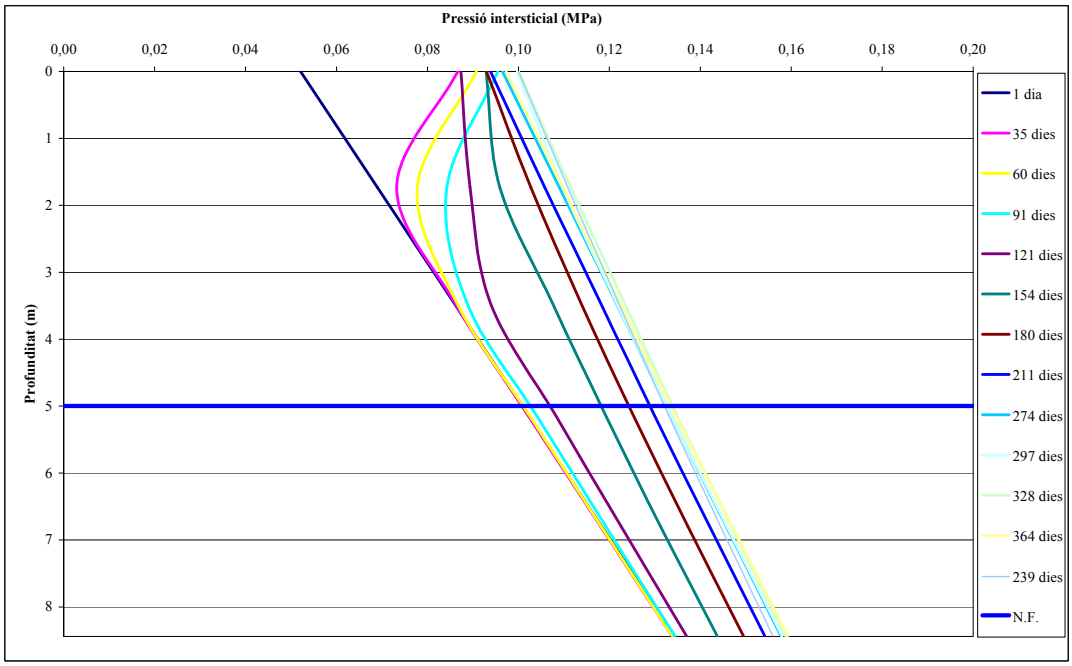

Figura 24 Evolució del perfil de pressions en la plataforma inferior del talús (vertical del node 657).

L'estudi dels vectors de flux revela que durant els primers 120 dies predomina el flux d'infiltració en la part més superficial del talús (Figura 25). El flux és vertical en les plataformes inferior i superior, mentre que en la cara inclinada del talús el flux d'infiltració és perpendicular a la superfície. Es comprova que en la part inferior del talús la magnitud del flux és

considerablement més gran que en la part superior. Aquest fet és degut, com en els casos anteriors, a la proximitat entre el nivell freàtic i la superfície; fet que resulta en pressions de succió inicials més baixes i per tant una major permeabilitat relativa al flux d'entrada .

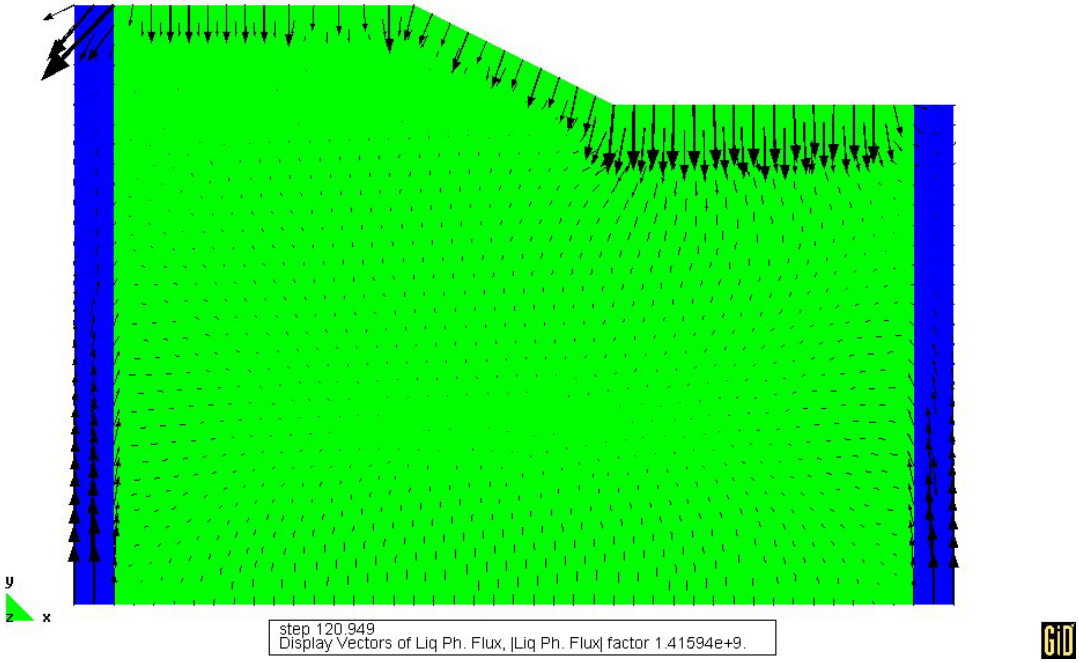

Figura 25 Vectors de flux al cap de 120 dies de precipitació

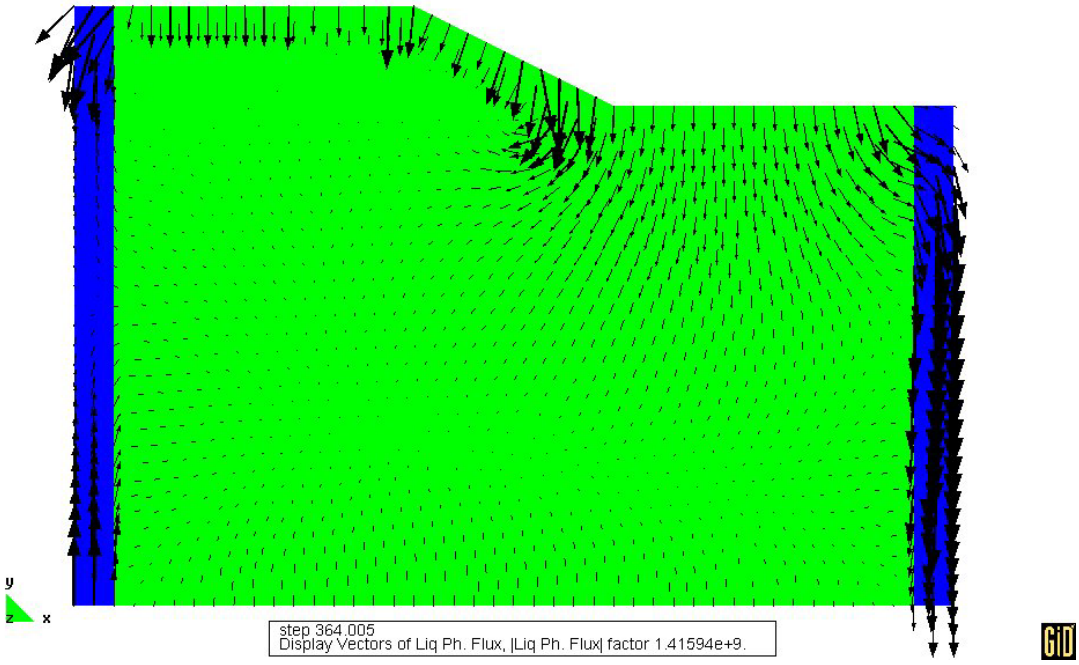

Figura 26 Vectors de flux al cap de 364 dies de precipitació

A mesura que el temps passa, la magnitud del flux va creixent en profunditat degut a l'avanç del front de saturació; i al cap d'uns 120 dies es comença a formar en el peu del talús un flux que tendeix a saturar la pendent i la part esquerra del talús. En la part més allunyada de la pendent, en l'extrem dret, el flux es dirigeix cap a les graves. La magnitud dels fluxos registrats és de l'ordre de la permeabilitat del medi travessat; i al cap de 364 dies (Figura 26) oscil·len entre $1.5 \cdot 10^{-9}$ i $7.5 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Els moviments generats en el talús degut a la infiltració durant la simulació sota llei elàstica estan regits per una llei que proporciona el valor dels canvis de volum associats als canvis de succió que tenen lloc durant la infiltració. Aquesta llei ve donada per la següent expressió:

$$\Delta\varepsilon_v = 3a_0\Delta(Pg - Pl) \quad (36)$$

On:

a_0: Coeficient de variació volumètrica per canvis en succió (MPa^{-1})

$\Delta(Pg - Pl)$: Variació de succió

Utilitzant aquesta llei els moviments observats en el talús han estat d'inflament durant tota la duració de l'espectre, i els desplaçaments màxims s'obtenen en la part dreta del talús, tal i com era d'esperar, ja que és en aquesta zona on es produeix la màxima variació de pressió intersticial. El valor d'aquest desplaçaments al cap d'un any és de 5,7 centímetres. El inflament és degut a la pèrdua de succió i al posterior augment de les tensions efectives. Aquest estudi de desplaçaments, però, té una validesa limitada, ja que s'emmarca dins d'un estudi amb llei constitutiva de tipus elàstica. Això implica menysprear els desplaçaments associats a possibles zones de plastificació i atendre només a criteris de canvi de volum per canvis en les pressions intersticials.

En resum, a través de l'estudi elàstic es conclou que l'espectre de pluges de l'any 2002 genera, en un talús amb les citades condicions inicials, un front de saturació d'1 metre de profunditat en la plataforma superior i en la zona en pendent del talús (Figura 27). En el peu del talús i en la plataforma inferior, a causa de pressions inicials de succió menors degudes a la proximitat entre el nivell freàtic i la superfície, es produeix una connexió entre el front de saturació i el nivell freàtic que té lloc al cap d'uns 120 dies. La conseqüència més remarcable d'aquest fet és el pas de tensions netes a tensions efectives i el posterior augment d'aquestes en una zona tant important com és el peu del talús. La llei de canvi volumètric utilitzada resulta en un inflament del talús que té el seu màxim en la part dreta del mateix, allà on es registren les variacions més importants de la pressió d'aigua.

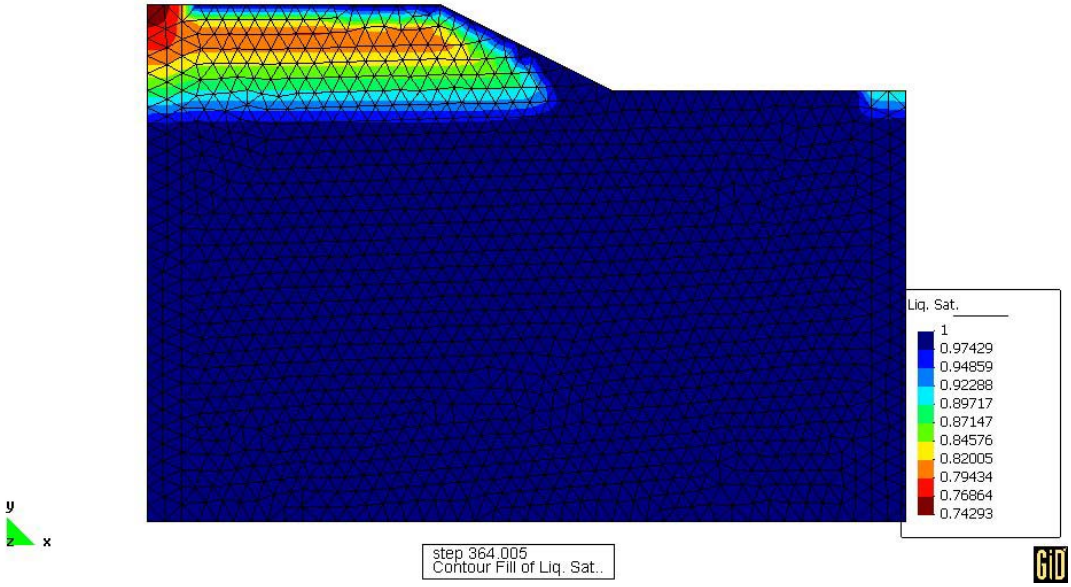

Figura 27 Distribució dels valors del grau de saturació al cap de 364 dies de precipitació