



# Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Anàlisi del grau d'estabilitat i de la freqüència de reactivació de l'esllavissada de la Font del Bullidor (Fígols, Berguedà)

Treball realitzat per:

**Adrià Morales Fresquet**

Dirigit per:

**Jose Moya Sánchez**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, **22/09/2016**

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

**TREBALL FINAL DE GRAU**



# RESUM

---

Aquesta tesina es planteja amb l'objectiu d'analitzar la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat del lliscament de la Font del Bullidor (Fígols, Berguedà). Es tracta d'un lliscament translacional desenvolupat en argiles de la fàcies Garumnià. Els afloraments d'aquest material són abundants al Pirineu i es caracteritzen per ser molt susceptibles a l'esllavissament. El treball s'emmarca dins d'un estudi regional, aportant un cas més per estudiar la relació entre la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat en esllavissades formades en aquest tipus de material.

Amb l'objectiu de caracteritzar l'esllavissada de la Font del Bullidor, s'ha realitzat una cartografia detallada a escala 1:1250. S'han delimitat els elements morfològics del moviment de vessant (escarpaments, lòbuls, esquerdes,...). A més a més, s'han extret mostres del material, que han estat assajades al laboratori per conèixer les propietats del sòl.

Per obtenir la freqüència de reactivació, s'han mostrejat arbres inclinats del lliscament i s'ha realitzat una anàlisi dendrogeomorfològica. S'ha pogut identificar una única reactivació en els últims 69 anys, corresponent a l'any 2010. És evident que en aquesta situació obtindrem una freqüència de reactivació mínima (0.0144 casos/any) i un període de retorn màxim (69 anys), fet que no és l'ideal.

Per caracteritzar la susceptibilitat a l'esllavissament, s'ha dut a terme una anàlisi d'estabilitat amb el mètode de l'equilibri límit. S'ha realitzat també una anàlisi de sensibilitat per conèixer quines variables afecten més al factor de seguretat. S'han tingut en compte diferents profunditats de la superfície de trencament, diverses posicions del nivell freàtic i un rang d'angles de fricció residual. Els resultats han demostrat que el factor de seguretat és molt sensible tant a la variació de l'angle de fricció com a les diferents posicions del nivell freàtic, mentre que la profunditat de la superfície de trencament influeix molt poc.

Segons els resultats, l'esllavissada de la Font del Bullidor només és estable (factor de seguretat major a la unitat) per valors de l'angle de fregament majors a  $15^{\circ}$ , això en condicions seques. En condicions de nivell freàtic en superfície, s'haurien de donar angles de fricció de  $20^{\circ}$  o més per garantir l'estabilitat del vessant. No obstant això, l'angle de fricció residual obtingut al laboratori és dins del rang  $10.3-11.7^{\circ}$ , que és massa petit segons l'anàlisi d'estabilitat. Per tant, aquest resultat per l'angle de fricció no es considera representatiu de la realitat, ja que el lliscament no està actiu. En altres estudis de la resistència al tall dels materials del Garumnià també s'han obtingut angles de fricció massa petits, pel que es conclou que la seva caracterització geotècnica és problemàtica.

Finalment, els resultats obtinguts en la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat de la Font del Bullidor, es comparen amb quatre moviments de la mateixa zona estudiants amb anterioritat. La varietat dels resultats fa difícil establir conclusions generals. Tot i això, existeix una certa tendència que demostra que un moviment de vessant és més estable (major factor de seguretat) contra més baixa és la freqüència de reactivació.

# ABSTRACT

---

This thesis aims to analyse the reactivation frequency and the degree of stability of the landslide of *la Font del Bullidor (Fígols, Berguedà)*. It consists of a translational slide composed of Garumnian clays. This material is very common in the Pyrenees and it usually produces landslides. The work frames in a regional study, contributing with a case more to study the relation between the reactivation frequency and the degree of stability in landslides formed by this type of material.

With the aim to characterise *la Font del Bullidor* landslide, a detailed 1:1250 scale cartography has been made. We have identified the morphological elements of the mass movement (scarps, lobes, cracks,...). In addition, we have extracted samples of the material that have been tested in the laboratory to find out the properties of the soil.

To obtain the reactivation frequency, we took tree samples of the landslide and a dendrogeomorphologic analysis has been carried out. We could identify only one reactivation in the last 69 years, corresponding to the year 2010. It is clear that in this situation we obtain a minimum reactivation frequency (0.0144 cases/year) and a maximum return period (69 years), which it is not the ideal.

To characterize the landslide, a stability analysis is carried out using the limit equilibrium method. An attempt to predict the variables that mainly affect the safety factor was performed thanks to a sensibility study. Different depths of the sliding surface and the groundwater level and a range of residual friction angles have been studied. The results show that the safety factor is very sensitive to the variation of the friction angle and to the different groundwater levels, whereas the depth of the sliding surface barely influences.

The results show that the landslide of *la Font del Bullidor* only starts to behave in a stable fashion (safety factor greater than one) from values of the friction angle of  $15^{\circ}$ , and this is in dry conditions. In saturated conditions we need to reach values of the friction angle of at least  $20^{\circ}$  for the stability of the slope to be ensured. Nevertheless, the residual friction angle obtained in the laboratory ( $10.3-11.7^{\circ}$ ) is too low according to the sensibility analysis. Therefore, this result for the friction angle is not considered representative of the reality, since the slide is not active. In other studies of the shear resistance of Garumnian materials, the friction angle obtained was too low, so we can conclude that its geotechnical characterization is problematic.

Finally, the results obtained in the reactivation frequency and the degree of stability of *la Font del Bullidor*, are compared with four movements of the same area which were previously studied. The variance of the results makes it difficult to establish general conclusions. However, a certain trend exists that shows that the more stable (greater safety factor) a landslide is, the lower the reactivation frequency is.



# TAULA DE CONTINGUTS

<b>1. INTRODUCCIÓ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. PLANTEJAMENT.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. CONTEXT I PROBLEMÀTICA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. OBJECTIUS I TREBALLS REALITZATS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMÒRIA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. ANTECEDENTS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. LOCALITZACIÓ GEOGRÀFICA DE LA ZONA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. CONTEXT GEOLÒGIC .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. MOVIMENTS DE VESSANT.....</b>	<b>7</b>
2.3.1. Classificació.....	7
2.3.1.1. Despreniments o caigudes ( <i>falls</i> ) .....	8
2.3.1.2. Bolcament ( <i>topples</i> ) .....	9
2.3.1.3. Lliscaments ( <i>slides</i> ).....	10
2.3.1.4. Expansions laterals ( <i>lateral spreads</i> ).....	12
2.3.1.5. Fluxos ( <i>flows</i> ).....	13
2.3.2. Forma i dimensions.....	15
2.3.3. Factors que intervenen en l'estabilitat .....	16
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. CARTOGRAFIA GEOMORFOLÒGICA .....</b>	<b>18</b>
3.1.1. Foto-interpretació.....	18
3.1.2. Cartografia de camp .....	19
<b>3.2. DENDROGEOMORFOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.2.1. Introducció a la datació dendrogeomorfològica.....	19
3.2.1.1. Creixement de les plantes llenyoses .....	20
3.2.1.2. Anàlisi dendrogeomorfològica dels lliscaments .....	21
3.2.1.3. Basculament i altres criteris utilitzats per a la datació de lliscaments. ....	21
3.2.2. Treball realitzats .....	22
3.2.2.1. Reconeixement dendrogeomorfològica .....	22
3.2.2.1.1. Tria d'arbres per mostrejar .....	22
3.2.2.1.2. Extracció i preparació de les mostres .....	22
3.2.2.2. Procediment d'anàlisi .....	24
<b>3.3. CARACTERITZACIÓ GEOTÈCNICA DEL MATERIAL DE L'ESLLAVISSADA.....</b>	<b>25</b>
3.3.1. Extracció de la mostra .....	25
3.3.2. Assajos de laboratori .....	26
3.3.2.1. Granulometria .....	26
3.3.2.1.1. Assaig granulomètric.....	27
3.3.2.1.2. Assaig de sedimentació.....	29
3.3.2.2. Límits d'Atterberg. Índex de plasticitat. ....	31
3.3.2.2.1. Límit líquid .....	31

3.3.2.2.2. Límit plàstic .....	33
3.3.2.3. Índex de plasticitat .....	34
3.3.3. Assaig de tall anular .....	35
3.3.4. Assaig de tall directe .....	40
<b>3.4. ANÀLISI D' ESTABILITAT .....</b>	<b>43</b>
3.4.1. Mètodes d'anàlisi. Mètode de l'equilibri límit .....	44
3.4.1.1. Mètode de les llesques .....	46
3.4.2. Hipòtesis i casos d'estudi. ....	47
3.4.3. Programa de Càlcul. Slope W .....	49
<b>4. RESULTATS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. CARTOGRAFIA GEOMORFOLÒGICA .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. DENDROGEOMORFOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
4.2.1. Arbres mostrejats en el moviment. ....	53
4.2.2. Interpretació de l'edat i l'extensió de les reactivacions del moviment. ....	54
<b>4.3. ASSAJOS DE LABORATORI .....</b>	<b>55</b>
4.3.1. Granulometria i sedimentació .....	55
4.3.2. Límits d'Atterberg. Índex de plasticitat.....	57
4.3.3. Assaig de tall anular .....	58
4.3.3.1. Consolidació .....	60
4.3.3.2. Angle de fricció residual .....	62
4.3.4. Assaig de tall directe .....	64
4.3.4.1. Consolidació .....	66
4.3.4.2. Angle de fricció residual .....	67
<b>4.4. CÀLCUL D'ESTABILITAT .....</b>	<b>69</b>
<b>4.5. COMPARACIÓ DE LA FREQUÈNCIA DE REACTIVACIÓ I DEL GRAU D'ESTABILITAT AMB ALTRES MOVIMENTS.....</b>	<b>73</b>
<b>5. CONCLUSIONS .....</b>	<b>76</b>
<b>6. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES .....</b>	<b>79</b>
<b>7. ANNEX: ANÀLISI DENDROGEOMORFOLÒGICA .....</b>	<b>81</b>

## ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Situació del municipi de Fígols en el mapa de Catalunya. Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. ....	4
Figura 2. Situació de l'àrea de treball (Font del Bullidor) en la comarca del Berguedà. Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. ....	5
Figura 3. Fotografia aèria amb delimitació de la zona del moviment. Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. ....	5
Figura 4. Esquema geològic regional. Font: Moya 2002. ....	6
Figura 5. Mecanismes de despreniment i col·lapse. Font: Corominas i Yagüe, 1997. Despreniment de roques a Colorado, EE.UU. al 2005. Font: Servei Meteorològic de Colorado. ....	9
Figura 6. Mecanismes de bolcament. Font: Corominas y Yagüe, 1997 Bolcament a Fort St. John, Canadà. Font: G. Bianchi Fasani. ....	9
Figura 7. Esquema d'un lliscament rotacional. Font: US Geological Survey, 2008. Lliscament rotacional a Nova Zelanda. Font: Michael Crozier. ....	10
Figura 8. Esquema d'un lliscament translacional. Font: US Geological Survey, 2008. Lliscament translacional a la Vall del riu Beaton, Canadà. Font: Servei Geològic del Canadà. ....	11
Figura 9. Tipologies de lliscaments translacionals. Font: Corominas y Yagüe, 1997. ....	11
Figura 10. Expansions laterals: per fluència i extrusió del material subjacent (a dalt), per liqüefacció (a baix). Font: Corominas y Yagüe, 1997. ....	12
Figura 11. Moviments de flux. Font: Corominas y Yagüe, 1997. ....	14
Figura 12. Morfologia d'una esllavissada. Font: Dikau R. et al. ....	15
Figura 13. Morfometria (dimensions principals) d'una esllavissada. Font: Dikau R. et al. ....	16
Figura 14. Seccions transversals de troncs on es poden distingir clarament els anells de creixement. Font pròpia. ....	20
Figura 15. Extracció de la mostra amb barrina Pressler. Font pròpia. ....	23
Figura 16. Mostra amb el comptatge d'anells i detall dels anells de creixement. Font: Oliveras G., 2011. ....	24
Figura 17. Fotografies d'una mostra-bloc, de la zona on es va extreure i de les eines utilitzades. Font pròpia. ....	26
Figura 18. Sèrie de garbells utilitzats / Mostra de grossos i fins per separat, un cop assecades al forn. Font pròpia. ....	28
Figura 19. Extracció d'una mostra de la proveta submergida / Mostres extretes un cop assecades al forn. Font pròpia. ....	30
Figura 20. Procediment d'estendre el material dins la cullera i mostra preparada per ser assajada. Font pròpia. ....	32
Figura 21. Cilindres de material formats seguint el procediment esmentat i abans de ser assecats. Font pròpia. ....	34
Figura 22. Gràfic de plasticitat de Casagrande. Font: Casagrande, 1932. ....	35
Figura 23. Equip de tall anular utilitzat en l'assaig. Font pròpia. ....	36
Figura 24. Introducció de la mostra al motlle i col·locació de l'anell a l'aparell de tall anular. Font pròpia. ....	38
Figura 25. Equip de tall directe utilitzat durant l'assaig. Font pròpia. ....	41
Figura 26. Procediment de preparació de la mostra per introduir-la a l'anell de l'equip de tall directe. Font pròpia. ....	42
Figura 27. Anell amb el material, llest per col·locar-lo a l'equip de tall directe. Font pròpia. ....	43
Figura 28. Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 4m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran. Font pròpia. ....	48
Figura 29. Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 7.5m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran. Font pròpia. ....	48



<i>Figura 30. Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 10m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran. Font pròpia.</i>	49
<i>Figura 31. Cartografia geomorfològica del lliscament translacional de la Font del Bullidor a escala 1:1250. Font pròpia.</i>	52
<i>Figura 32. Cronologia dels arbres mostrejats. Font pròpia.</i>	53
<i>Figura 33. Respostes dels arbres mostrejats a la Font del Bullidor. Font pròpia.</i>	54
<i>Figura 34. Períodes de reactivació del moviment de la Font del Bullidor. Font pròpia.</i>	54
<i>Figura 35. Corba granulomètrica del material de la Font del Bullidor.</i>	56
<i>Figura 36. Representació del nostre material al gràfic de la plasticitat de Casagrande. Font pròpia.</i>	58
<i>Figura 37. Evolució de la deformació vertical en l'assaig de tall anular a la mostra FBA1.</i>	61
<i>Figura 38. Evolució de la deformació vertical en l'assaig de tall anular a la mostra FBA4.</i>	61
<i>Figura 39. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 100kPa.</i>	62
<i>Figura 40. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 50kPa.</i>	62
<i>Figura 41. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 200kPa.</i>	63
<i>Figura 42. Rectes de Mohr-Coulomb segons els criteris.</i>	64
<i>Figura 43. Evolució de la deformació vertical en el temps durant l'assaig de tall directe.</i>	66
<i>Figura 44. Evolució de les tensions tangencials dels tres assajos de tall directe a diferents tensions normals.</i>	67
<i>Figura 45. Recta de Mohr-Coulomb obtinguda en l'assaig de tall directe per al material de la Font del Bullidor.</i>	68
<i>Figura 46. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 4m de profunditat mitjana.</i>	71
<i>Figura 47. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 7.5m de profunditat mitjana.</i>	71
<i>Figura 48. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 10m de profunditat mitjana.</i>	71
<i>Figura 49. Comparació del Factor de Seguretat i la Freqüència de Reactivació dels moviments estudiats al Berguedà.</i>	74

## ÍNDIX DE TAULES

<i>Taula 1. Classificació dels sòls segons la seva granulometria. ....</i>	<i>26</i>
<i>Taula 2. Llista de garbells A.S.T.M.....</i>	<i>28</i>
<i>Taula 3. Correspondència entre els temps de registre de cada mostra amb la mida de partícules que equivalen. ....</i>	<i>31</i>
<i>Taula 4. Esquematzació dels límits d'Atterberg. ....</i>	<i>31</i>
<i>Taula 5. Equivalències entre tensions normals i pesos aplicats a la mostra.....</i>	<i>39</i>
<i>Taula 6. Característiques geomètriques del moviment. ....</i>	<i>51</i>
<i>Taula 7. Resultats de l'anàlisi dendrogeomorfològic.....</i>	<i>55</i>
<i>Taula 8. Resultats de l'assaig granulomètric i de sedimentació.....</i>	<i>56</i>
<i>Taula 9. Resultats obtinguts de l'assaig del límit líquid.....</i>	<i>57</i>
<i>Taula 10. Resultats de l'assaig del límit plàstic. ....</i>	<i>57</i>
<i>Taula 11. Límits d'Atterberg i Índex de Plasticitat del material.....</i>	<i>58</i>
<i>Taula 12. Dades i resultats obtinguts del motlle. ....</i>	<i>59</i>
<i>Taula 13. Dades per a l'obtenció de les humitats durant l'assaig de tall anular. ....</i>	<i>60</i>
<i>Taula 14. Deformació vertical produïda durant l'assaig de tall anular. ....</i>	<i>60</i>
<i>Taula 15. Tensions normals i de tall obtingudes amb cada criteri. ....</i>	<i>63</i>
<i>Taula 16. Resultats obtinguts mitjançant el criteri de Mohr-Coulomb. ....</i>	<i>64</i>
<i>Taula 17. Dades obtingudes a partir de l'anell de la mostra. ....</i>	<i>65</i>
<i>Taula 18. Resultats del pes específic natural de cada mostra assajada. ....</i>	<i>65</i>
<i>Taula 19. Dades per al control d'humitat en les mostres durant l'assaig de tall directe.....</i>	<i>65</i>
<i>Taula 20. Deformació vertical produïda durant l'assaig de tall directe. ....</i>	<i>66</i>
<i>Taula 21. Valors de les tensions obtinguts en l'assaig de tall directe.....</i>	<i>68</i>
<i>Taula 22. Resultats de l'assaig de tall directe.....</i>	<i>68</i>
<i>Taula 23. Factors de seguretat obtinguts amb el programa Slope W en l'anàlisi d'estabilitat del moviment.....</i>	<i>70</i>
<i>Taula 24. Resum de les característiques principals de les inestabilitats del Berguedà. ....</i>	<i>73</i>



# 1. INTRODUCCIÓ

---

## 1.1. PLANTEJAMENT

El present estudi es planteja amb l'objectiu d'analitzar la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat del lliscament de la Font del Bullidor. El treball es troba dins del marc d'un estudi regional per estudiar la relació entre la freqüència de reactivació i el factor de seguretat (grau d'estabilitat) en esllavissades formades per materials del Garumnià. Una esllavissada ja existent i amb menor factor de seguretat és més susceptible a la inestabilitat i, per tant, és raonable suposar que es reactivarà més freqüentment. Aquest treball aporta un nou cas d'estudi als ja existents, per tal d'avaluar els riscos de moviments de vessant en aquests materials.

## 1.2. CONTEXT I PROBLEMÀTICA

Els moviments de massa entesos com a fenòmens naturals d'evolució del relleu, constitueixen un dels processos geològics més freqüents que afecten la superfície terrestre, formant part del cicle de l'evolució natural de les vessants en la recerca de l'equilibri.

A Catalunya, existeixen dues zones on els materials de la fàcies Garumnià afloren extensament: la Conca de Tremp i el Berguedà. Ambdues àrees han estat objecte de diferents estudis, ja que en presència dels materials del Garumnià els moviments de massa són molt abundants. En el nostre cas, la tesina se centrarà en el lliscament de la Font del Bullidor a la comarca del Berguedà (Barcelona), del qual es coneix almenys una reactivació recent.

Tot i tractar-se d'un fenomen força freqüent, són escasses les referències històriques que permeten determinar la seva freqüència temporal, necessària per avaluar la seva perillositat, i establir relacions amb els mecanismes desencadenants del moviment.

La pluja, i com a conseqüència l'augment del nivell freàtic als vessants, és un dels principals motors de reactivació de les esllavissades en vessants que ja estan en un equilibri precari i que sovint han sofert altres reactivacions. Però no és el nivell freàtic l'únic factor que intervé en l'equilibri del vessant, sinó que també hi juguen un paper les propietats del material o la profunditat de la superfície de trencament.

## 1.3. OBJECTIUS I TREBALLS REALITZATS

L'objectiu principal de la tesina, com ja s'ha plantejat anteriorment, serà determinar i analitzar la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat del lliscament de la Font del

Bullidor. Volem caracteritzar el moviment, conèixer quina ha estat la seva evolució al llarg dels anys, fer-ne un estudi mecànic i esbrinar quins paràmetres són claus per a la seva inestabilitat.

Per a complir aquests objectius, s'han dut a terme les tasques següents:

- Realització de la cartografia geomorfològica detallada del moviment.
- Mostreig i anàlisi dendrogeomorfològica d'arbres afectats per l'esllavissada, de cara a la determinació de la freqüència de reactivació.
- Presa de mostres del material del moviment i determinació de la seva resistència al tall residual.
- Obtenció del grau d'estabilitat del moviment mitjançant càlculs amb el mètode de l'equilibri límit.
- Anàlisi de sensibilitat dels factors que intervenen en la inestabilitat de vessants: profunditat de la superfície de trencament, posició del nivell freàtic i angle de fricció residual.
- Comparació de la freqüència de reactivació amb el factor de seguretat del lliscament.
- Comparació de la relació entre la freqüència de reactivació i el factor de seguretat del lliscament amb l'obtinguda a altres moviments analitzats en treballs anteriors.

## 1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMÒRIA

El cos central de la memòria està dividit en dos grans blocs: *Metodologia* i *Resultats*. Precedint aquests capítols, a *Antecedents* s'introduirà la zona d'estudi, la seva localització i les característiques geològiques. Es farà una breu descripció dels tipus de moviments de massa i les característiques que els defineixen, a més d'aprofundir en el tipus de moviment que ens ocupa, els lliscaments translacionals.

Al capítol de *Metodologia* s'explica, per una banda, els treballs de camp que s'han dut a terme i la seva finalitat. També s'introdueix la datació d'esllavissades amb la tècnica de la dendrogeomorfologia. Posteriorment, s'exposen els assaigs de laboratori que es realitzen i com a partir d'aquests es defineixen certs paràmetres geotècnics del material assajat. Seguidament, s'explica la base teòrica del mètode de l'equilibri límit que s'utilitza per calcular l'estabilitat dels vessants i el funcionament del programa de simulació utilitzat (*Slope W*), juntament amb la metodologia emprada a l'hora de realitzar l'anàlisi d'estabilitat.

En el capítol de *Resultats* presentem primerament els resultats de camp, on s'exposa la cartografia del moviment i la datació dendrogeomorfològica. Posteriorment es desenvolupen els resultats de laboratori, on presenten els resultats dels assaigs

realitzats i les propietats que se'n deriven. Seguidament, es fa una anàlisi de l'estabilitat, en funció dels factors que afecten el moviment.

Finalment, es presenten les *Conclusions* tant dels resultats del laboratori com dels resultats obtinguts en els càlculs d'estabilitat realitzats amb cada una de les seves particularitats. S'afegirà també una valoració global i una proposta de millores.

## 2. ANTECEDENTS

### 2.1. LOCALITZACIÓ GEOGRÀFICA DE LA ZONA

El moviment de la Font del Bullidor es localitza al terme municipal de Fígols, a la comarca del Berguedà, la més septentrional de la província de Barcelona i que es troba a una distància d'uns 100 kilòmetres de la capital catalana (figura 1). La comarca es caracteritza per un relleu de muntanya a la zona nord, amb altituds de fins a 2.500 metres. En canvi, el sector meridional és més planer.



Figura 1. Situació del municipi de Fígols en el mapa de Catalunya.  
Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

La comarca del Berguedà limita administrativament amb les comarques del Ripollès i Osona per l'est, al nord amb la Cerdanya i l'Alt Urgell i per l'oest ho fa amb el Solsonès. La capital de la comarca és Berga.

La comarca del Berguedà (Figura 2) està definida per dues unitats fisiogràfiques diferents: al nord hi trobem els Pirineus i al sud, la depressió de L'Ebre. Aquests relleus diferenciats divideixen la comarca en dues subcomarques: l'Alt Berguedà i el Baix Berguedà respectivament.

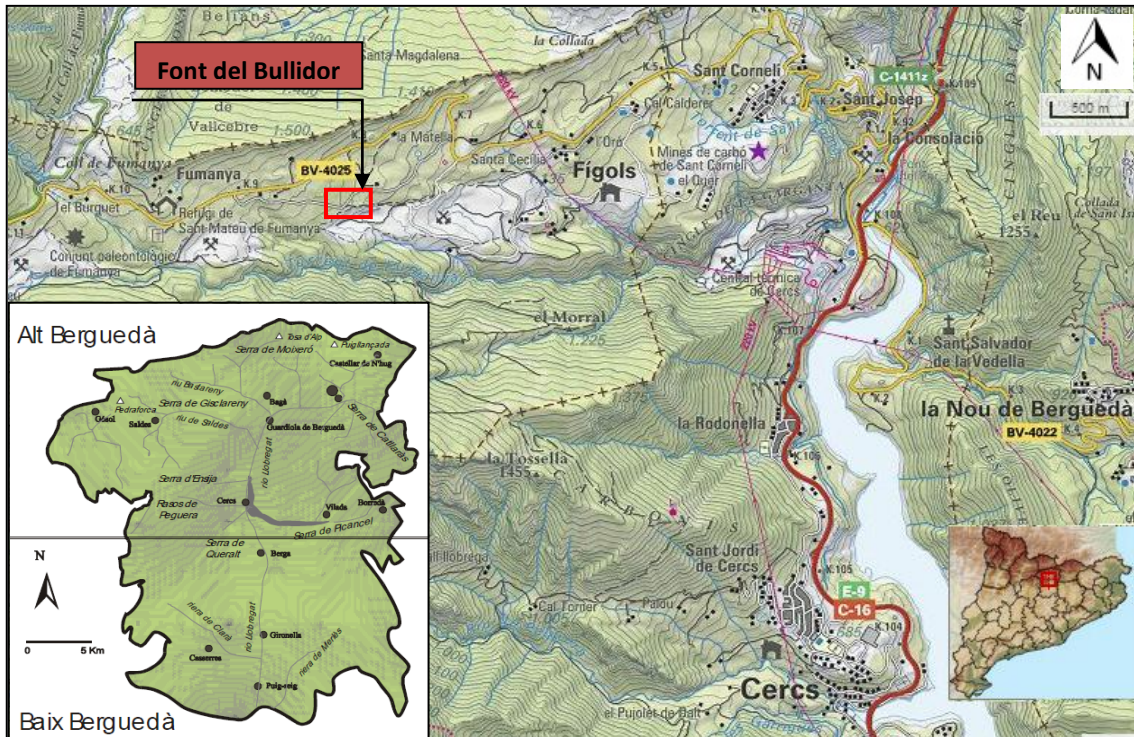


Figura 2. Situació de l'àrea de treball (Font del Bullidor) en la comarca del Berguedà.  
 Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

L'àrea d'estudi té una extensió d'unes 4 hectàrees i l'esllavissada es pot identificar fàcilment en les fotografies aèries (figura 3):

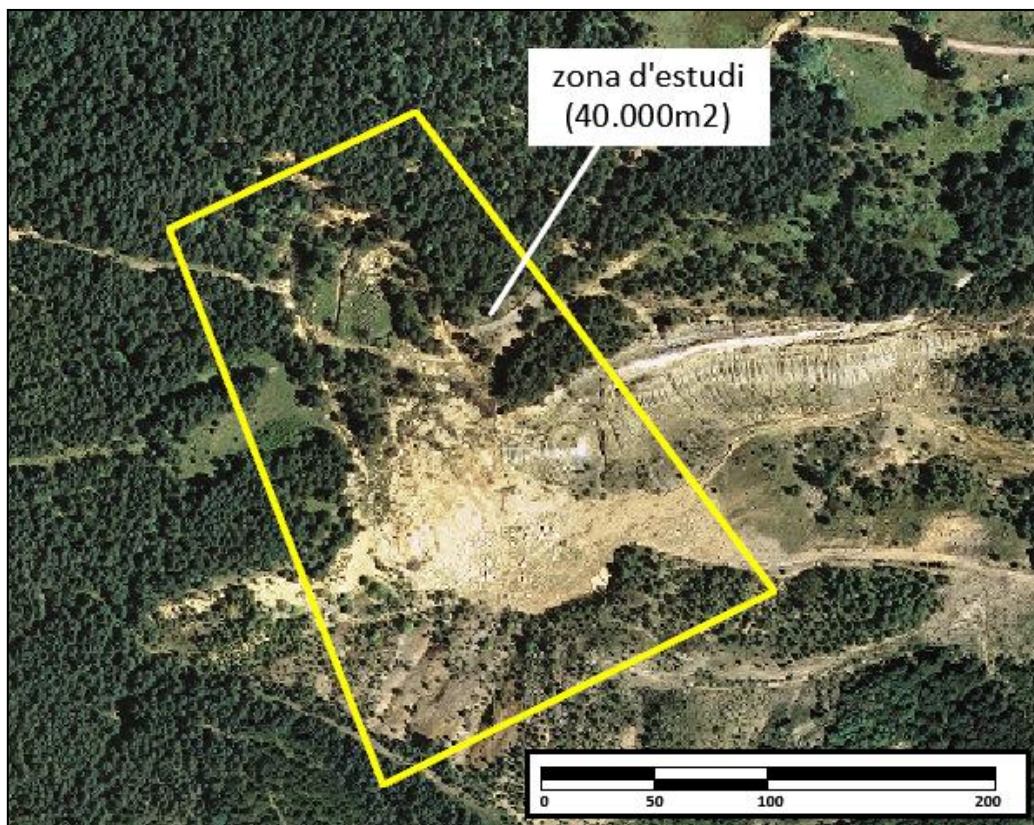


Figura 3. Fotografia aèria amb delimitació de la zona del moviment.  
 Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.



## 2.2. CONTEXT GEOLÒGIC

Des del punt de vista geològic, gran part de l'alt Berguedà es caracteritza per l'aflorament del mantell inferior del Pedraforca. Està constituït majoritàriament per sediments mesozoics i limita al sud amb l'encavalcament de Vallfogona. La capa del mantell inferior del Pedraforca va ser empesa quan es van formar els Pirineus per compressió, a causa de la col·lisió entre la península Ibèrica i França.

Els materials que constitueixen la zona de la Font del Bullidor pertanyen a la sèrie Garumnianes (Cretaci Superior-Paleocè Inferior). Es tracta d'una formació d'especial importància en l'àmbit de l'estabilitat de vessants, per la seva elevada susceptibilitat al lliscament d'aquests materials.

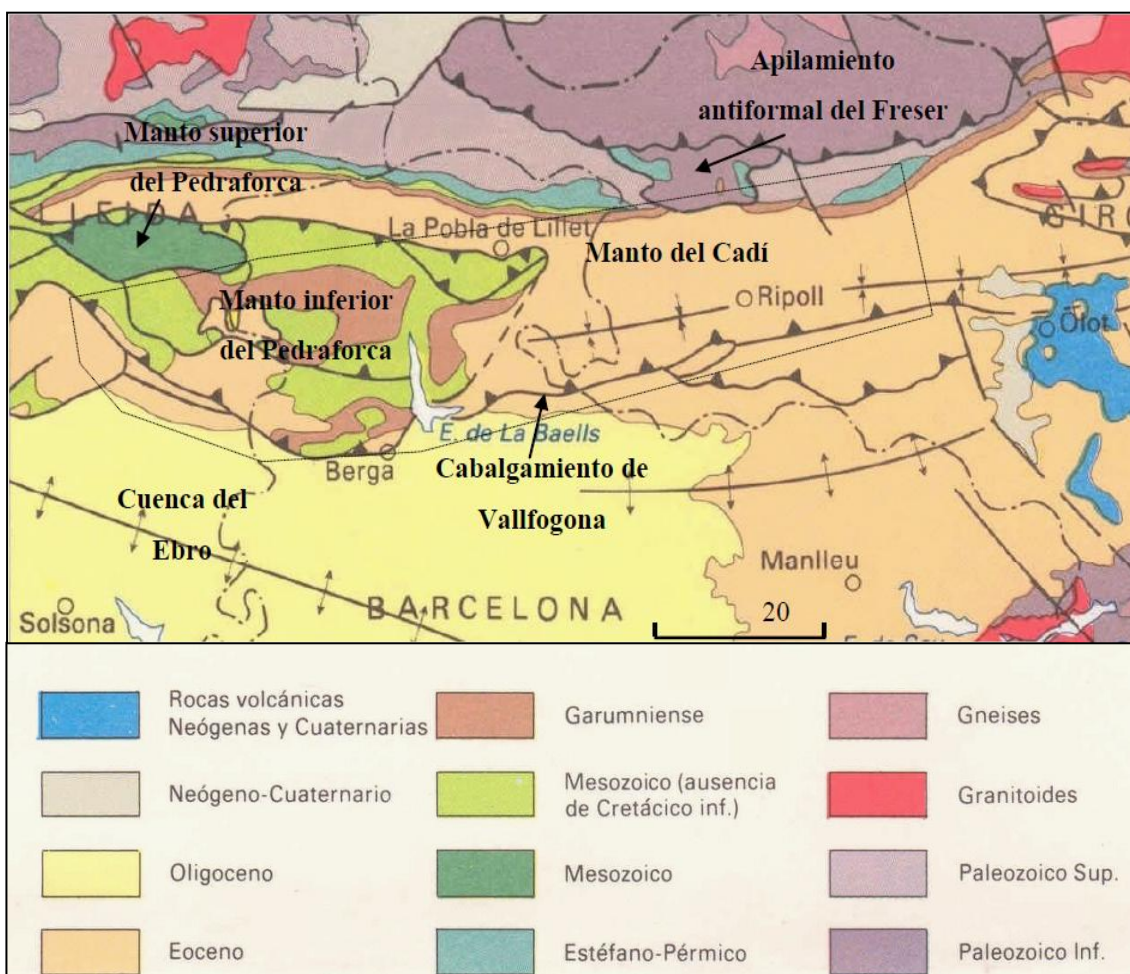


Figura 4. Esquema geològic regional.  
Font: Moya 2002.

## 2.3. MOVIMENTS DE VESSANT

El terme *moviments de vessant* descriu una àmplia varietat de processos que resulten en el desplaçament dels materials que formen el terreny. Aquests moviments es produeixen normalment cap a l'exterior i en sentit descendent, com a conseqüència de la força de la gravetat.

Els moviments de vessant presenten una complexitat molt elevada, ja que són molts els factors de diversa naturalesa que hi intervenen i els condicionen. Existeix doncs la necessitat de realitzar la identificació i la posterior classificació dels diferents tipus de moviments i anomenar-los de forma adequada. És important realitzar una correcta identificació de factors com el mecanisme de ruptura, les dimensions, la seva velocitat de desplaçament, la història del moviment en concret i dels moviments existents a la zona, els materials involucrats, etc., per a la posterior adopció de mesures correctores i estabilització dels talussos.

### 2.3.1. Classificació

La classificació dels moviments de vessant depèn dels criteris utilitzats per a la seva diferenciació. En la literatura científica i tècnica existeixen nombroses classificacions, normalment tenint en compte la naturalesa del moviment i la tipologia del material.

La primera classificació que va gaudir d'una àmplia acceptació va de la de Sharpe (1938). Posteriorment van aparèixer les de Varnes (1958, 1978), Nemcok et al. (1972), Hutchinson (1988), Sassa (1989) i més recentment, les de Diaku et al. (1987), i Cruden i Varnes (1996).

A Espanya, la primera classificació completa fou la proposada per Garcia Yagüe (1966). Anys més tard, Corominas i Alonso (1984) van presentar una versió simplificada de la de Varnes (1978), seguida al cap de poc temps per les de Ayala et al. (1987), Ferrer (1988), García Yagüe i García Álvarez (1988) i Corominas (1989).

Com ja s'ha comentat a l'inici de l'apartat, en moltes classificacions existents el tipus de material és un dels criteris de separació. Varnes (1978), Hutchinson (1988) posteriorment, i Cruden i Varnes (1996), distingeixen entre substrat rocós o roca (*bedrock*), arrossegalls (*debris*) i terra (*earth*). El concepte de roca o substrat rocós, en principi, no ofereix massa confusió; però la diferència entre arrossegalls i terra no és tan evident, sobretot quan s'estan considerant els moviments de flux.

En una primera aproximació, s'entén com a terra aquell material que conté una elevada fracció de fins, és a dir, de sorres fines, llims i argiles; mentre que quan es parla d'arrossegalls, es fa referència a aquells materials de composició granulomètrica grollera, constituïts principalment per graves i blocs. Cruden i Varnes (1996) van considerar que arrossegalls (*debris*) eren sòls amb una proporció entre 20 i 80% de

partícules amb diàmetre superior a 2 mm, mentre que les terres tindrien un 80% o més de partícules menors a 2 mm (que és el límit superior de la mida sorra). Per simplificar, es pot de diferenciar entre materials cohesius (terra) i no cohesius (arrossegalls).

Tanmateix, la forma més acceptada per a classificar els moviments de vessant apareix arran de les característiques cinemàtiques del moviment, és a dir en els mecanismes de propagació. Per tant, la tipologia del moviment es sol establir un cop el mecanisme de ruptura s'ha desenvolupat, basant-se en les característiques del desplaçament i no en les de ruptura. Això és degut al fet que els mecanismes i condicionants que donen lloc a la ruptura d'un vessant no es corresponen, en general, als mecanismes que governen el desplaçament de la massa. Per a determinar els mecanismes en qüestió, s'ha de conèixer la geomorfologia, la geometria i el moviment en superfície i profunditat.

La classificació i terminologia utilitzada en el present estudi, és la de Coromines i Yagüe (1997) que està basada en les dues més acceptades per la comunitat internacional: Cruden i Varnes (1996) i la de Hutchinson (1988). L'única novetat respecte a les anteriors és la incorporació de dos grups més, un de moviments complexos i un altre denominat *deformacions sense trencament o prèvies al trencament*. Tot i aquestes dues novetats afegides, tot seguit s'enumeren les cinc modalitats clàssiques i més comuns, que s'explicaran amb detall. Els noms utilitzats per a cadascun dels moviments s'acompanyen de la seva equivalència en llengua anglesa i espanyola:

- Despreniments o caigudes / *Falls / Desprendimientos o caídas*
- Bolcaments / *Topples / Vuelcos*
- Lliscaments / *Slides / Deslizamientos*
- Expansions laterals / *Lateral spreads / Expansiones laterales*
- Fluxos / *Flows / Flujos*

#### **2.3.1.1. Despreniments o caigudes (*falls*)**

S'originen per la separació d'una massa de sòl o roca d'una paret empinada o penya-segat. El moviment succeeix en caiguda lliure i posterior rebot o rodament. Són típics en massissos rocosos i generalment estan controlats per les discontinuïtats. Acostumen a ser moviments molts ràpids.

Normalment el trencament es produeix per un lliscament o petit bolcament. Si el pendent de la vessant és superior a uns  $76^\circ$  es propaga en caiguda lliure. Per sota d'aquest angle la propagació és per rodament i a vegades per lliscament.

Les caigudes amb una trajectòria bàsicament vertical produïdes per la soscavació d'un riu, onatge o meteorització i disgregació de la roca al seu peu, es consideren col·lapses.

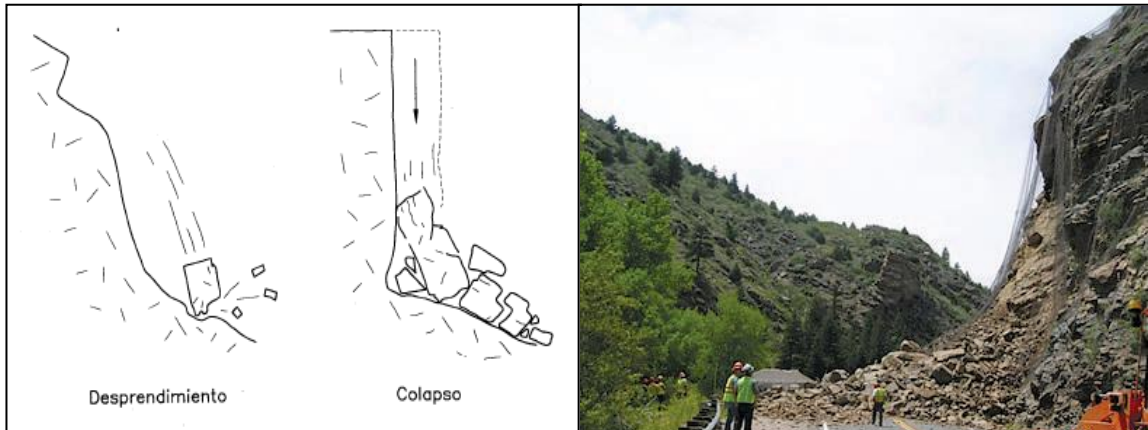


Figura 5. Mecanismes de despreniment i col·lapse. Font: Corominas i Yagüe, 1997.  
Despreniment de roques a Colorado, EE.UU. al 2005. Font: Servei Meteorològic de Colorado.

### 2.3.1.2. Bolcament (*topples*)

Es tracta de la rotació cap endavant i a l'exterior de la vessant, d'una massa de sòl o roca al voltant d'un eix situat per sota el seu centre de gravetat. La força desestabilitzadora és la gravetat, sovint complementada amb l'empenta exercida pel terreny adjacent o l'aigua o gel de les esquerdes. Es poden distingir dos processos:

- Bolcament per flexió (*flexural toppling*): es produeix en roques que presenten sistemes de discontinuïtats força verticals. Aquestes discontinuïtats formen un conjunt de columnes que quan s'inclinen es dobleguen y trenquen per flexió. Aquest procés és molt típic d'esquistos, fil·lites i pissarres en seqüències finament estratificades.
- Desplomament: caiguda amb un moviment brusc de gir, almenys al principi, recolzat en la seva base externa. Són moviments que es produeixen en penya-segats rocosos o de materials sorra-argilosos compactats. Si el vessant és empinat, els trencaments per bolcament poden transformar-se en caigudes.

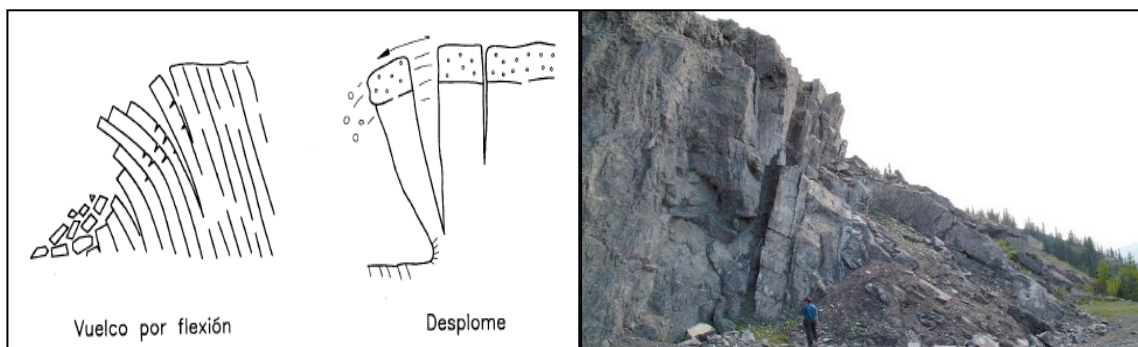


Figura 6. Mecanismes de bolcament. Font: Corominas y Yagüe, 1997  
Bolcament a Fort St. John, Canadà. Font: G. Bianchi Fasani.

### 2.3.1.3. Lliscaments (*slides*)

El desplaçament del terreny es produeix sobre una o varies superfícies de trencament ben definides. La massa generalment es desplaça en conjunt, comportant-se com una unitat, pràcticament sense deformació interna en el seu recorregut. La velocitat és variable i acostuma a implicar grans volums de material.

La diferenciació entre lliscaments rotacionals i translacionals és important degut a les anàlisis d'estabilitat i el disseny de mesures de control i estabilització. Aquest tipus de moviments és el que disposa de mètodes d'anàlisis i modelització més avançats.

- Lliscaments rotacionals (*rotational slides, slumps*): el trencament es produeix en una superfície curvilínia i còncava. Per tant, el terreny experimenta un gir segons un eix situat per sobre del centre de gravetat de la massa mobilitzada. El material que es mou com un cos rígid, presenta en la part superior un canvi de pendent que en alguns casos arriba a produir contrapendents on es pot acumular l'aigua que pot ajudar a futures reactivacions. Aquest mecanisme és característic de sòls cohesius homogenis i de massissos rocosos intensament fracturats. Si es produeix en materials argilosos, especialment en presència d'aigua, el peu pot evolucionar cap a un lliscament o una colada de terra.

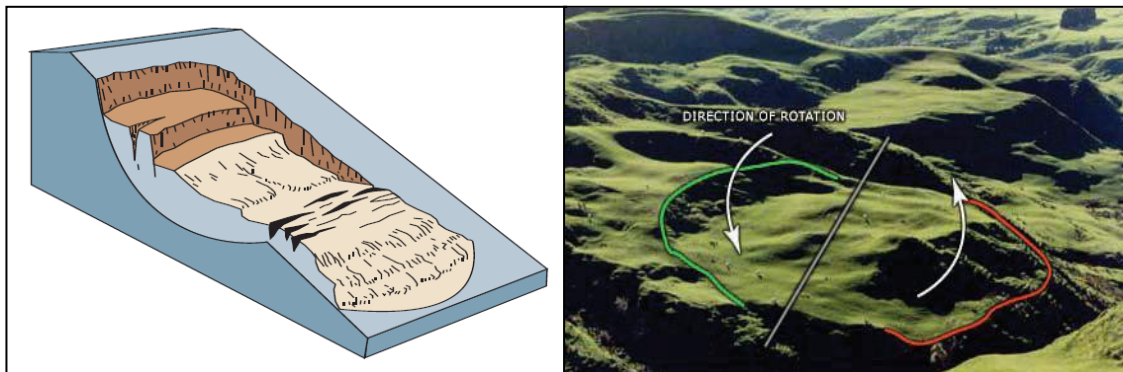


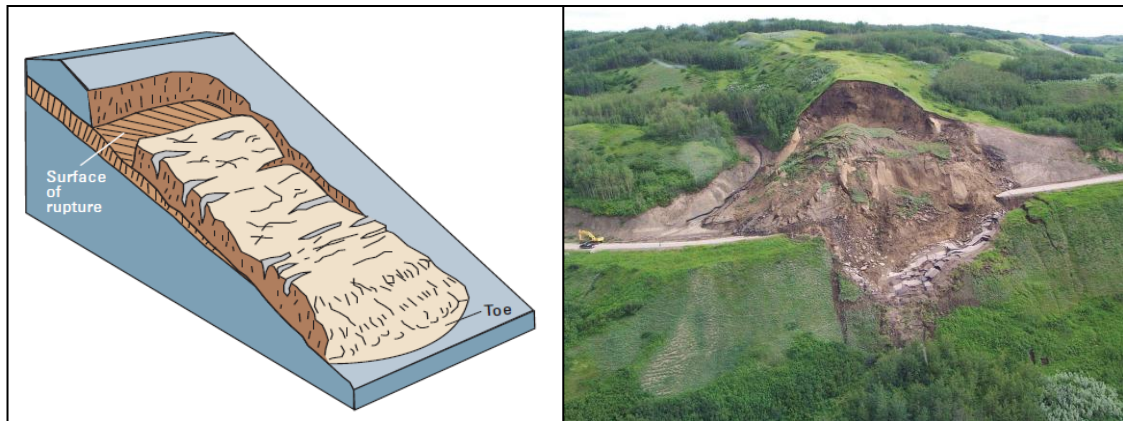
Figura 7. Esquema d'un lliscament rotacional. Font: US Geological Survey, 2008.  
Lliscament rotacional a Nova Zelanda. Font: Michael Crozier.

Els lliscaments rotacionals són mecanismes fàcilment reactivables. Tendeixen a estabilitzar-se quan disminueix el moment de gir i augmenta el moment estabilitzador. Tot i això, canvis en el nivell freàtic o en el peu poden produir una nova inestabilitat.

- Lliscaments translacionals (*translational slides*): és el mecanisme que caracteritza l'esllavissada de la Font del Bullidor. Es tracta d'un dels tipus de moviments de vessant més comuns a tot el món. Se n'han produït a escala mundial en qualsevol ambient i condicions.

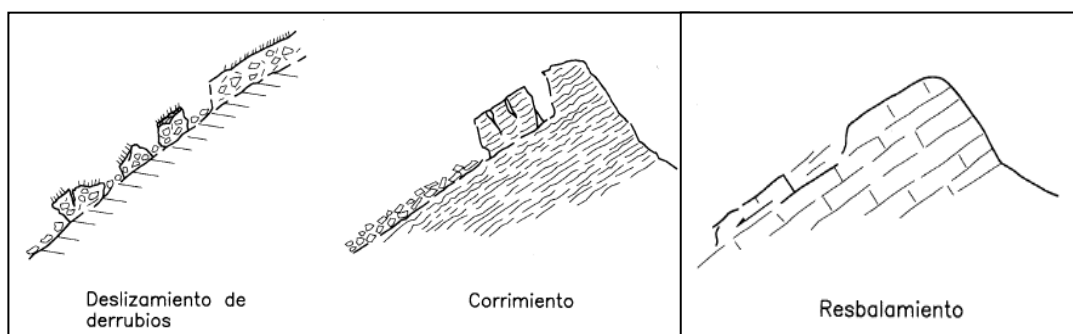
Els lliscaments translacionals són un moviment que es caracteritza per la seva propagació a través d'una superfície de trencament plana o ondulada. La massa, que actua com un únic cos, es disposa per sobre del pla de cisalla està sotmesa a

un moviment totalment paral·lel a aquest. Tota la massa es mou a la mateixa velocitat i trajectòria. Quan augmenta la velocitat pot disgregar-se en parts més petites o fins i tot convertir-se en un flux. Podem separar quatre formes diferents de produir-se aquesta propagació en una superfície plana.



**Figura 8.** Esquema d'un lliscament translacional. Font: US Geological Survey, 2008.  
Lliscament translacional a la Vall del riu Beaton, Canadà. Font: Servei Geològic del Canadà.

Quan els lliscaments de blocs de sòl o roca es produeixen gairebé sense trossejar-se, sobre superfícies úniques en massissos rocosos reben el nom de *relliscades o lliscaments plans*. Quan la superfície de trencament està formada per dos plànols que obliguen a la massa rocosa continguda a desplaçar-se segons la línia d'intersecció, es forma un *lliscament en falca*. Els lliscaments en els quals la massa desplaçada es trosseja en el seu moviment descendent i resulta una acumulació caòtica de blocs al peu del vessant, es denominen *corriments* (García Yagüe, 1966). Quan el trencament per cisalla té lloc en sòls no cohesius constituïts per partícules gruixudes, es denominen *lliscaments d'arrosseballs*.



**Figura 9.** Tipologies de lliscaments translacionals.  
Font: Corominas y Yagüe, 1997.

A continuació, s'amplia la informació dels lliscaments translacionals detallant els següents aspectes:

- Mida relativa. En general són menys profunds que els lliscaments de rotació. La superfície de trencament té una relació de distància/longitud inferior a 0.1 i pot

anar des de petites falles a lliscaments de terres regionals molt grans que tenen quilòmetres d'amplada.

- Velocitat dels desplaçaments. El moviment pot ser lent inicialment (entre 1 i 2 metres per mes), però molts tenen una velocitat moderada (entre 1 i 2 metres per dia). Si augmentar la velocitat, la massa pot disgregar-se i convertir-se en un flux.
- Mecanismes desencadenants. Són principalment les pluges intenses, l'augment d'aigua subterrània dins del lliscament, el desgel, les inundacions degudes al reg o altres activitats humanes. Aquest tipus de lliscaments de terres també poden ser induïts per terratrèmols.
- Mesures estabilitzadores. Un drenatge adequat és necessari per evitar que llisqui el terreny, o en cas d'una falla ja existent, per evitar una reactivació. Entre altres mesures correctores es troben l'anivellació, la creació de terrasses i els murs de contenció. En pendents moderats o forts aquests lliscaments són molt difícils d'estabilitzar permanentment.
- Previsió. Existeix una alta probabilitat de què ocorrin repetidament en les zones on s'han produït en el passat. L'ampliació d'esquerdes a la capçalera o la protuberància de la punta poden ser indicadors d'activació imminent.

#### 2.3.1.4. Expansions laterals (*lateral spreads*)

Varnes (1978) va diferenciar dos tipus d'expansions laterals. En primer lloc, la fracturació i extensió lateral del material compacte a causa de la líquüefacció del material subjacent (figura 10). La líquüefacció és característica dels sediments argilosos dipositats en mars o llacs poc profunds dels antics casquets de gel en països nòrdics. Aquest fenomen s'inicia a partir d'un lliscament o un moviment sísmic que converteix l'argila en un líquid dens que desplaça els bloc de roca o sòl que té per damunt. És un moviment bastant ràpid.

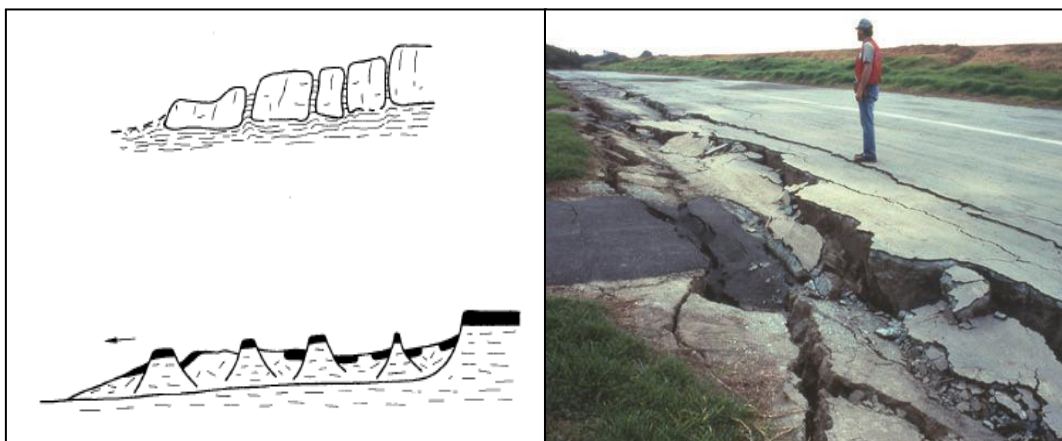


Figura 10. Expansions laterals: per fluència i extrusió del material subjacent (a dalt), per líquüefacció (a baix).  
Font: Corominas y Yagüe, 1997.

L'altre tipus que va definir Varnes (1978), es produeix típicament en contextos on la massa rígida de roca reposa sobre un nivell argilós plàstic. El moviment afecta la formació d'argiles subjacent i no es pot determinar de forma clara cap superfície de cisalla. El mecanisme que es produeix és la fluència del material tou. Aquesta expansió produeix una fracturació del material que hi ha per damunt, generant grans blocs. Entre aquests blocs s'introdueix part del material que flueix per sota. Aquest moviment és molt lent (figura 10).

### 2.1.3.5. Fluxos (*flows*)

La propagació d'aquest moviment es caracteritza per ser un moviment continu en el qual no es conserven les superfícies de cisalla. Això és degut al fet que estan molt properes entre elles, a més, les partícules no sempre es desplacen amb la mateixa velocitat i per això no es conserva la forma de la massa mobilitzada quan baixa pel vessant. Aquesta massa acostuma a adoptar formes lobulars amb materials granulars. Aquest mecanisme de propagació està molt lligat amb els lliscaments.

Existeixen diferents tipologies de fluxos, tal com s'explica a continuació i s'il·lustra a la figura 11:

- Reptació (*creep*): la característica principal de la reptació és que es tracta d'un moviment amb una propagació extremadament lenta que és imperceptible excepte per a grans períodes de temps. En aquest tipus de moviment no es defineix la superfície de trencament.
- Solifluxió (*solifluction*): formes lobulades de petites dimensions amb poc gruix que es creen en sòls cohesius. En els petits lòbuls que es formen es pot apreciar algunes superfícies de cisalla de poca extensió. La propagació per solifluxió és característica dels ambients periglacials a causa del gel-desglaç.
- Colada de terra (*earthflow*): aquest moviment és la deformació plàstica, lenta i no necessàriament molt humida de terra o roques toves (pissarres i fil·lites) en vessants de pendent moderat. En el cas que predominin una gran quantitat de materials cohesius amb un tant per cent elevat de llims o argiles es denomina *colada de fang*. La forma que caracteritza aquest moviment és la lobular que queda al peu amb un volum positiu, respecte al relleu original. En algunes colades de terra i fang s'ha observat que el seu inici correspon al peu d'un lliscament.
- Corrent d'arrossegalls (*debris flow*): és un flux de material granular amb una gran quantitat d'aigua. La fracció detrítica més abundant en aquests casos és la sorra, grava i blocs. El contingut de material granular arriba a constituir el 80% del pes de la massa. Es tracta d'un moviment ràpid i que pot desenvolupar-se per qualsevol tipus de vessant, sigui canalitzat o no. Per tant, té una gran varietat de formar



diferents tipus de dipòsits. Però quan baixa per una canalització, acostuma a formar cons de dejecció.

- Cops de sorra i llims (*sand and silt flows*): flux de sorra i llim que es mobilitza de manera brusca i en alguns casos sense presència d'aigua, totalment sec. S'inicia per un col·lapse estructural, per un episodi sísmic o a l'inici d'un trencament per lliscament.
- Allaus (*avalanches, sturzstroms*): mobilització a gran velocitat de grans masses de terra, fragments o arrossegalls. Pot ser compatible amb altres tipus de fluxos descrits anteriorment, però es caracteritza per la gran velocitat del procés i la gran distància que pot recórrer. La velocitat pot arribar a ser superior als 50 m/s.

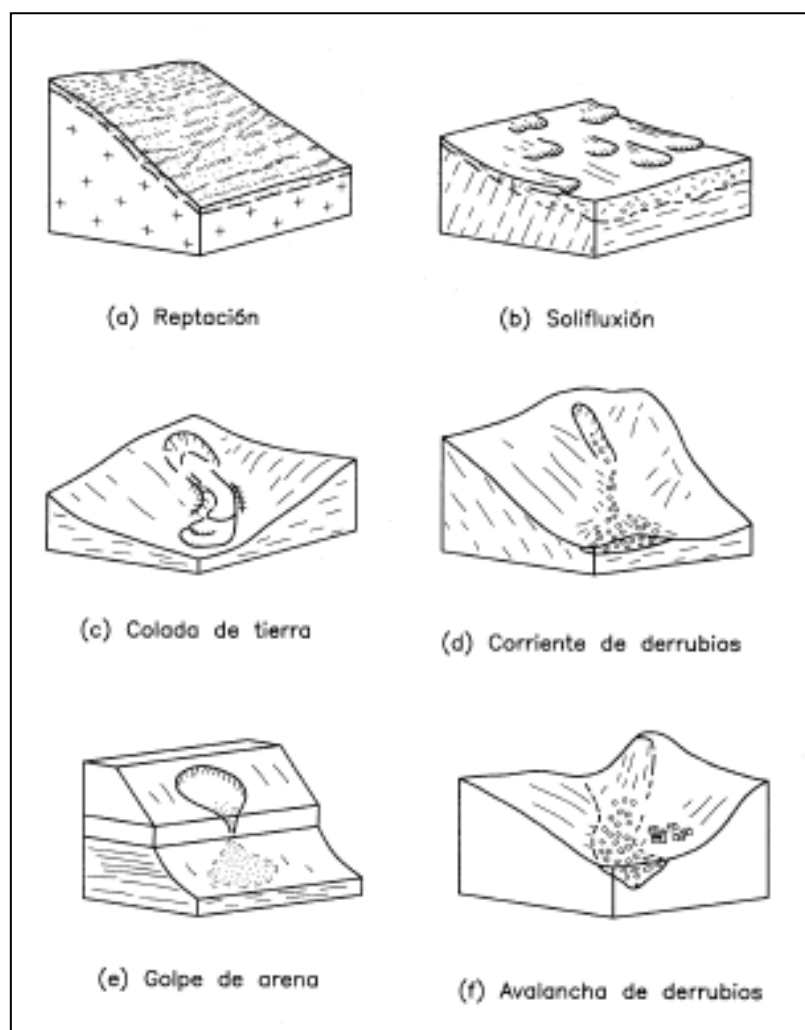
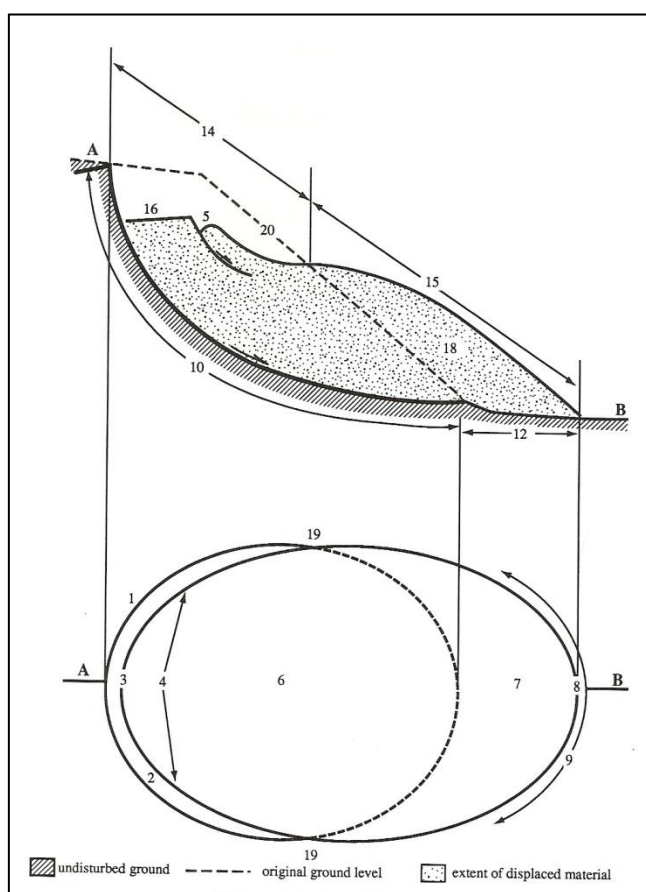


Figura 11. Moviments de flux.  
Font: Corominas y Yagüe, 1997.

### 2.3.2. Forma i dimensions

En l'estudi d'un moviment de vessant, la forma i dimensions que presenta són uns paràmetres tan importants per a la seva caracterització com ho pot ser el mecanisme de trencament. Per tant, la nomenclatura dels elements morfològics i morfomètrics és el llenguatge utilitzat per a nomenar cadascun dels components que apareixen en una inestabilitat del terreny.

La nomenclatura i figures utilitzades formen part del *Multilingual landslide glossary* del *International Geotechnical Societies UNESCO Working Party for World Landslide* (figures 12 i 13).

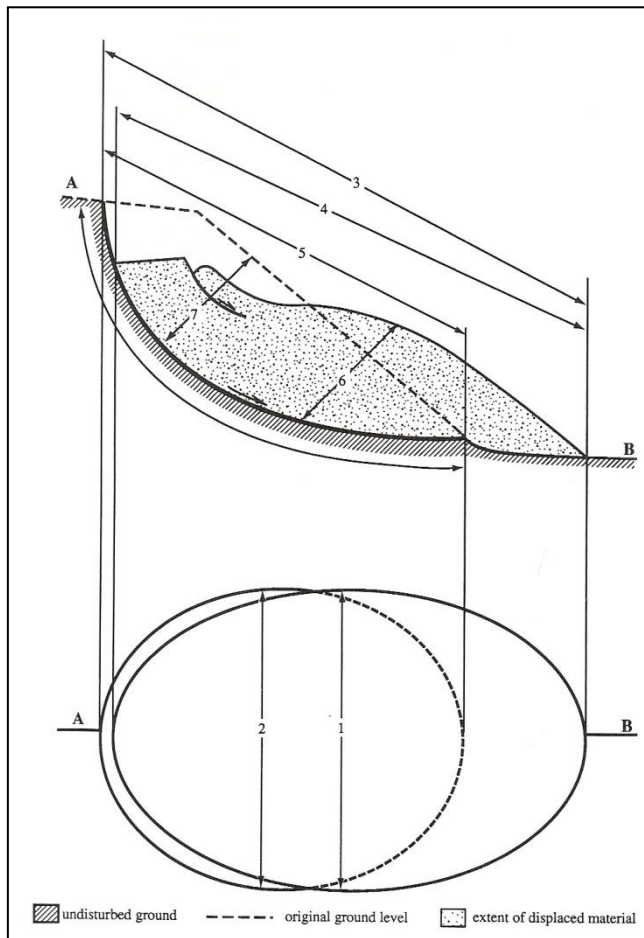


Morfologia:

- (1) Capçalera
- (2) Escarpament principal
- (3) Cima
- (4) Part superior de l'esllavissada
- (5) Escarpament secundari
- (6) Cos principal de l'esllavissada
- (7) Peu de l'esllavissada
- (8) Punta de l'esllavissada
- (9) Marge del peu
- (10) Superfície de trencament
- (11) Peu superfície de trencament
- (12) Superfície de separació
- (13) Material desplaçat
- (14) Zona de reducció
- (15) Zona d'acumulació
- (16) Reducció
- (18) Acumulació
- (19) Flancs
- (20) Superfície original del vessant

Figura 12. Morfologia d'una esllavissada.

Font: Dikau R. et al.



Morfometria:

- (1) Amplada de massa desplaçada
- (2) Amplada de la sup. de trencament
- (3) Longitud total
- (4) Longitud de massa desplaçada
- (5) Longitud de la sup. de trencament
- (6) Profunditat de massa desplaçada
- (7) Profunditat de sup. de trencament

Figura 13. Morfometria (dimensions principals) d'una esllavissada.  
Font: Dikau R. et al.

### 2.1.3. Factors que intervenen en l'estabilitat

La inestabilitat en un terreny i el consegüent inici del moviment de la massa afectada es produeix a causa de la intervenció de forma conjunta d'uns quants factors. La gran varietat de moviments de vessant presentats anteriorment són el reflex de la diversitat de situacions que els poden originar. D'aquesta manera, els factors que intervenen en la inestabilitat d'un vessant es poden classificar en factors condicionants i en factors desencadenants.

Per un costat, els factors condicionants són aquells intrínsecs al terreny que conformen les propietats físico-mecàniques de resistència. També s'anomenen factors constants, ja que el context temporal al qual es remeten és molt més ampli que els factors desencadenants. Els elements condicionants més comuns i importants es detallen a continuació:

- La litologia o naturalesa del sòl: referida a la composició, grau d'alteració, cimentació, textura, mida i forma de grans i compactació.
- L'estructura i presència de discontinuïtats: la relació i disposició geomètrica de les discontinuïtats i el talús. Segons l'orientació i el cabussament del material respecte el vessant, es pot afavorir la inestabilitat.
- Esquerdes inundades: la possible filtració d'aigua a través de les esquerdes de dessecació o plans de discontinuïtat fa perdre la cohesió i succió al material. Amb la consegüent disminució de les forces estabilitzadores per l'augment de pressió de porus a la superfície de trencament.
- La vegetació: com a factor positiu en la majoria dels casos. La vegetació arbòria tendeix a protegir els vessants perquè absorbeix part de l'aigua de pluja, endarrereix l'escorrentia, afavoreix la infiltració lenta (impedint la saturació del sòl) i a més subjecta el sòl amb les seves arrels. En canvi, la vegetació no arbòria a vegades pot exercir un paper negatiu en prats i pastures produint processos solifluidals.

D'altra banda, els factors desencadenants, també anomenats variables, apareixen de forma intermitent en el temps. És el cas, per exemple, d'un episodi de pluges que té una duració acotada. A continuació s'expliquen els més importants:

- L'aigua: centrant-nos en els episodis de pluges que provoquen la seva presència. L'aigua és l'agent que contribueix en major pes a modificar l'estabilitat. Les infiltracions en el terreny degudes a l'aigua de pluja provoquen canvis en les propietats del material, com són el grau de saturació, la humitat o la succió. L'aigua provoca un l'augment del nivell freàtic que incrementa la pressió d'aigua i disminueix les tensions efectives. Fet que fa perdre resistència al terreny, fent-lo més vulnerable. També les aigües subterrànies provoquen dissolucions i canvis fisicoquímics perjudicials per a l'estabilitat.
- Sismicitat: les vibracions generades per un terratrèmol originen una fluctuació de l'estat dels esforços interns del terreny que afecta l'equilibri dels talussos. L'afectació al vessant depèn molt de la intensitat i la duració del sisme.
- Sobrecàrregues: modifiquen l'entorn natural del moviment. Les construccions, caigudes de blocs o aigua infiltrada al terreny provoquen un increment de pes i d'esforç tallant. En sòls amb alt contingut en argiles això origina un augment de la pressió intersticial, modificant així les condicions d'equilibri existents.
- Activitat humana: incideix en la natura de moltes maneres. L'home provoca desforestació (incendis, cultius i pastures), construccions, modificacions de cursos fluvials, etc. Totes aquestes accions no fan més que empitjorar la situació davant d'una possible activació del moviment.

## 3. METODOLOGIA

---

En aquest tercer bloc s'expliquen els procediments i els mètodes utilitzats durant la tesina per a l'obtenció dels resultats. En cada cas, es definiran els equips, materials, software, bases teòriques, normes, ... que han estat suport del nostre treball.

La metodologia està dividida en quatre apartats: la cartografia geomorfològica, la dendrogeomorfologia, la caracterització geotècnica del material i l'anàlisi d'estabilitat.

Per a la correcta realització de la metodologia esmentada, s'ha requerit un important treball de camp i de laboratori. Per una banda, s'han dut a terme dues sortides de camp a la zona de l'esllavissada (el 18 de març de 2016 i el 22 d'abril de 2016). D'altra banda, s'ha dedicat un mes i mig d'assajos al Laboratori de Geotècnica de l'Escola de Camins.

### 3.1. CARTOGRAFIA GEOMORFOLÒGICA

Pel compliment dels objectius fixats al principi de la tesina, és bàsic començar per la identificació dels indicis de moviment de massa de la zona d'estudi. És molt important conèixer bé l'estructura del moviment i detallar-la adequadament, cosa que ens permetrà elaborar una cartografia geomorfològica de la zona d'estudi.

La cartografia s'ha realitzat a partir d'ortofotos d'escala 1:5000 amb vols del 2015 i editats el 2015, juntament amb el suport de mapes topogràfics i geològics. Tots aquests recursos utilitzats són procedents de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

La idea de la cartografia geomorfològica és que el mapa ens proporcioni la màxima informació possible per caracteritzar l'esllavissada: límits del lliscament, escarpaments, esquerdes, lòbuls, dics laterals,... S'haurà d'utilitzar una simbologia estandarditzada (com s'ha descrit a l'apartat 2.3.2) i que estigui ben definida en la llegenda, per tal que la informació sigui clara.

El procediment seguit per a l'obtenció de la cartografia geomorfològica es pot dividir en dues fases: la interpretació de fotografies aèries i la cartografia de camp.

#### 3.1.1. Foto-interpretació

La interpretació de fotografies aèries és la manera més ràpida i recomanable per fer-nos una idea general de l'estructura del terreny a la zona del lliscament. Ens permet identificar l'abast del moviment i fins i tot alguns límits i escarpaments clars. Tota la informació obtinguda en aquestes interpretacions és la base de la cartografia que es detallarà durant les sortides de camp.

### 3.1.2. Cartografia de camp

Aquest mètode de camp consisteix en la identificació dels elements geomorfològics al mateix lloc del moviment. Es procedeix a acotar la zona afectada fent el recorregut a peu pel perímetre i pel cos de l'esllavissada. D'aquesta manera, cadascuna de les estructures que ens trobem són delimitades fidelment al mapa.

La informació extreta durant la foto-interpretació serà completada amb major exactitud, ja que existeixen fenòmens que no són perceptibles des de la fotografia aèria. És el cas de les zones d'acumulació d'aigua, petites esquerdes, o l'existència d'escarpaments més petits.

## 3.2. DENDROGEOMORFOLOGIA

### 3.2.1. Introducció a la datació dendrogeomorfològica.

La dendrogeomorfologia és una disciplina científica derivada de la dendrocronologia, ciència que estudia l'edat dels arbres mitjançant el registre estacional dels anells de creixement. L'anàlisi dendrogeomorfològica s'utilitza per a identificar els arbres afectats pel desplaçament de l'esllavissada i per a la datació de les reactivacions.

La dendrogeomorfologia aprofita la dendrocronologia per a estudiar la resposta del creixement dels arbres als processos geodinàmics externs que s'esdevenen. Basant-se en les diferències anatòmiques de la seqüència d'anells de creixement dels arbres vius, es pot inferir l'any i fins i tot l'època estacional en què es va produir el fenomen que va provocar la reactivació. Per tant, es tracta d'una eina que millora el coneixement de la història del medi que volem estudiar.

L'avantatge més gran de la dendrocronologia sobre altres mètodes de datació són la precisió i exactitud, ambdues generalment d'un any i, en circumstàncies favorables, també quant a estació. Les principals limitacions del mètode, són la disponibilitat dels arbres, estiguin vius o enterrats, amb un nombre suficient d'anells ben conservats. També cal tenir cura en la tria dels exemplars a mostrejar, que pot ser clau a l'hora d'obtenir uns resultats ajustats a la realitat.

Si busquem antecedents, l'anàlisi dels anells de creixement dels arbres com a mètode de datació o dendrocronologia, data de principis del segle XX. Les primeres aplicacions geomorfològiques s'iniciaren amb la datació de l'avançament glacial (Lawrence, 1950; Sigafos & Hendricks, 1961), d'inundacions (Sigafos, Botanical evidence of floods and flood-plain deposition, 1964), i de l'erosió en vessants (La Marche, 1968). L'any 1971 Alestalo, va introduir el terme dendrogeomorfologia com a disciplina de la dendrocronologia que usa l'ecologia dels arbres per a investigar l'ocurrència, intensitat i cronologia de processos geomòrfics.

Existeixen dos procediments per a datar un lliscament mitjançant la dendrocronologia:

- *Datació dendrològica convencional o datació creuada*, on l'objectiu primordial és determinar l'edat de cada anell de creixement d'un arbre. L'edat d'un lliscament es pot conèixer mitjançant la datació d'arbres enterrats sota la massa lliscada o dins d'ella. L'edat de la mort dels arbres, provocada pel lliscament, ens ve donada per l'edat de l'últim anell format, i això es fa mitjançant la correlació amb la sèrie dendrocronològica mestre.
- *Datació dels canvis en el creixement* dels arbres que viuen sobre la massa lliscada, al seu voltant, o a la seva trajectòria (Moya Sánchez, 2002). Aquest mètode, que és una derivació del mètode convencional, és ric en criteris de datació i permet extreure més informació sobre la dinàmica dels moviments de vessant.

El segon procediment ha estat l'utilitzat durant la present tesina i es desenvolupa en profunditat a continuació.

### 3.2.1.1. Creixement de les plantes llenyoses

El creixement de la tija a les plantes llenyoses es produeix durant el període actiu, que es correspon amb la primavera i l'estiu en els climes temperats. Aquest creixement és tant longitudinal (primari) com radial (secundari).

En el nostre cas, el creixement secundari és el que interessa per a la datació dendrocronològica. En secció transversal, les capes de fusta acumulada en el tronc al llarg de la vida d'un arbre tenen la forma d'anells concèntrics, que són el que s'anomenen anells de creixement. L'anell més extern és el darrer en formar-se.



Figura 14. Seccions transversals de troncs on es poden distingir clarament els anells de creixement.  
Font pròpia.

La taxa de creixement no és constant en el període actiu, ja que és major al principi d'aquest. La capa interna, anomenada de *fusta primerenca*, es forma en el període de

creixement ràpid que coincideix amb la primavera. I la capa més externa, *fusta tardana*, es forma durant l'estiu. La transició entre la fusta primerenca i la tardana és gradual, en canvi durant el període inactiu es marca una discontinuïtat visible entre la fusta primerenca d'un anell i la fusta tardana del següent.

### 3.2.1.2. Anàlisi dendrogeomorfològica dels lliscaments

Molts processos geomòrfics provoquen perturbacions als arbres com per exemple inclinacions, ferides o l'enterrament parcial, que no arriben a provocar-los la mort. Els arbres responen a aquestes perturbacions amb una estratègia d'autoprotecció, per recuperar tot el possible les condicions de creixement prèvies o bé per adaptar-se a les noves condicions ambientals. Si la magnitud de la perturbació és tan significativa que afecta el creixement, la resposta de l'arbre es veu reflectida amb un canvi en la morfologia del tronc, presència de cicatrius, canvis bruscos en la taxa de creixement o fins i tot variacions de l'anatomia del tronc. Tots aquests canvis queden registrats en els anells i tant la perturbació com el succés geomorfològic poden ser datats.

Els arbres analitzats han d'estar vius, per tant l'edat de l'últim anell format és coneguda. A l'anàlisi dendrogeomorfològica, els objectius principals són determinar la relació entre el procés i la resposta, a través dels anells.

### 3.2.1.3. Basculament i altres criteris utilitzats per a la datació de lliscaments.

El basculament o inclinació del tronc és probablement una de les perturbacions més freqüents causades pels moviments de vessant. Els anells que es formen després del basculament tenen a un costat del tronc, l'anomenada *fusta de reacció*. Aquesta fusta té característiques diferents de la que es crea quan l'arbre creix verticalment. Als pins i a la resta de gimnospermes aquesta fusta és forma al costat inferior del tronc i es més fosca i densa que la fusta primerenca normal.

El creixement amb tronc de reacció té la funció de reorientar el tronc per a recuperar la seva posició vertical, almenys la de la part alta. El resultat final és el desenvolupament d'una corba en el tronc. Depenent del cas, les cèl·lules de reacció poden exercir forces de tracció o de compressió per recol·locar el tronc. Per això el tronc de reacció també rep els noms de *tronc de compressió* i *tronc de tracció*.

Una altra conseqüència de la inclinació dels arbres és el canvi en el patró de creixement dels anells. Quan el tronc d'un arbre roman vertical, els anells mostren un patró geomètric aproximadament concèntric al voltant de la medul·la. El basculament causa que els anells formats posteriorment creixin desigualment en la direcció d'inclinació, seguint el patró de creixement excèntric, en el que la medul·la deixa de constituir el centre geomètric del tronc. El creixement excèntric va acompanyat per la



formació de tronc de reacció i segueix pautes diferents depenent de l'espècie. Aquesta anàlisi del creixement excèntric és una tècnica de datació molt complexa i que encara ara requereix una verificació completa de la seva validesa (Moya Sánchez, 2002).

Una altra manera més simple de tenir en compte el canvi en la taxa de creixement induït per la inclinació de l'arbre és l'anàlisi de les reduccions brusques del gruix dels anells, que són observables normalment en un dels costats d'un tronc inclinat. Aquest criteri, juntament amb l'anàlisi del tronc de reacció és la que s'ha seguit per l'estudi d'aquesta tesina.

## 3.2.2 Treball realitzats

### 3.2.2.1. Reconeixement dendrogeomorfològica

#### 3.2.2.1.1. Tria d'arbres per mostrejar

Entre les evidències dendrogeomorfològiques d'arbres afectats per processos ecològics (inclosos els geomorfològics) hi trobem els arbres canelobre, decapitats, amb colzes, de tronc sinuós, etc. La majoria d'aquestes morfologies anòmales del tronc no estan relacionades amb la basculació de l'arbre, encara que en algunes d'elles el tronc mostri una clara inclinació. Només la basculació del tronc pot ser causada per una deformació del terreny o per una empenta d'aquest sobre l'arbre. Per tant, només els arbres que mostrin alguna de la morfologia causada per basculació són d'interès per a la datació del lliscament. Per exemple, per garantir la fiabilitat dels resultats del mostreig, no s'han d'obtenir testimonis d'arbres amb tronc doble (bífid). És necessari, per tant, identificar aquells arbres que estiguin només afectats pel lliscament de l'estudi i obtenir les mostres necessàries per al seu tractament i anàlisi.

Els arbres a mostrejar han de tenir una inclinació moderada, entre 10 i 30 graus respecte a la vertical. Per inclinacions majors, la resposta de l'arbre és difícil de datar, els anells amb molta fusta de compressió són difícils de diferenciar entre ells (Moya Sánchez, 2002). A més, un lliscament pot ser complex, estar format per diverses unitats que poden correspondre o no a diferents tipologies de moviments de vessant i mostrar un moviment relativament independent. És a dir, una reactivació pot ser global (afectar a tot el conjunt del lliscament) o local (només a una part o unitat). En aquests casos es necessari mostrejar arbres en cada una de les unitats diferenciades en la cartografia geomorfològica i situar cada exemplar en la cartografia.

#### 3.2.2.1.2.. Extracció i preparació de les mostres

Les millors mostres són les seccions transversals al tronc. En elles hi podrem identificar fàcilment el patró de creixement radial i les possibles anomalies en el creixement. Les

mostres s'extreuen en forma de testimoni cilíndric de 5 mil·límetres de diàmetre mitjançant l'anomenada barrina de Pressler (figura 15).



Figura 15. Extracció de la mostra amb barrina Pressler.  
Font pròpia.

Aquest testimoni ha de passar el més a prop possible de l'eix de creixement de l'arbre i perpendicular al tronc. És important inspeccionar la mostra quan s'ha extreta per comprovar la seva qualitat (presència de la medul·la, absència de ruptures) i la possible presència d'elements no desitjats (com el nus d'una possible branca). Els testimonis són convenientment referenciats (lloc, número d'arbre, data) i s'introdueixen en un porta-mostres per al seu transport.

No és recomanable deixar les mostres molt de temps dins del porta-mostres, ja que aquestes es podrien alterar. Per tant, tan aviat com sigui possible les hem de col·locar i fixar sobre un suport de fusta rígid degudament referenciat i deixar assecar a temperatura ambient.

Una vegada tenim les mostres assecades, les fixarem al suport de fusta amb cola blanca no ràpida. És important fixar-les de manera que els anells quedin a la vista a la part superior del suport. Un cop seca la cola, les polirem. Per poder distingir bé els anells i les diferents tonalitats de la mostra es realitza un polit amb quatre tipus de paper de vidre diferents:

- Polit amb paper de vidre núm. 240, per deixar la superfície de la mostra pràcticament plana.
- Polit amb paper de vidre núm. 400, fins que ens quedi una superfície de la mostra uniforme.
- Polit amb paper de vidre núm. 600, fins que es diferenciïn perfectament els anells de la mostra.

- Polit amb paper de vidre núm. 1000, que ens servirà per donar un aspecte lluent a la mostra.

Quan tenim la mostra preparada, es podrà començar l'anàlisi, interpretant els anys dels arbres i les característiques de la fusta.

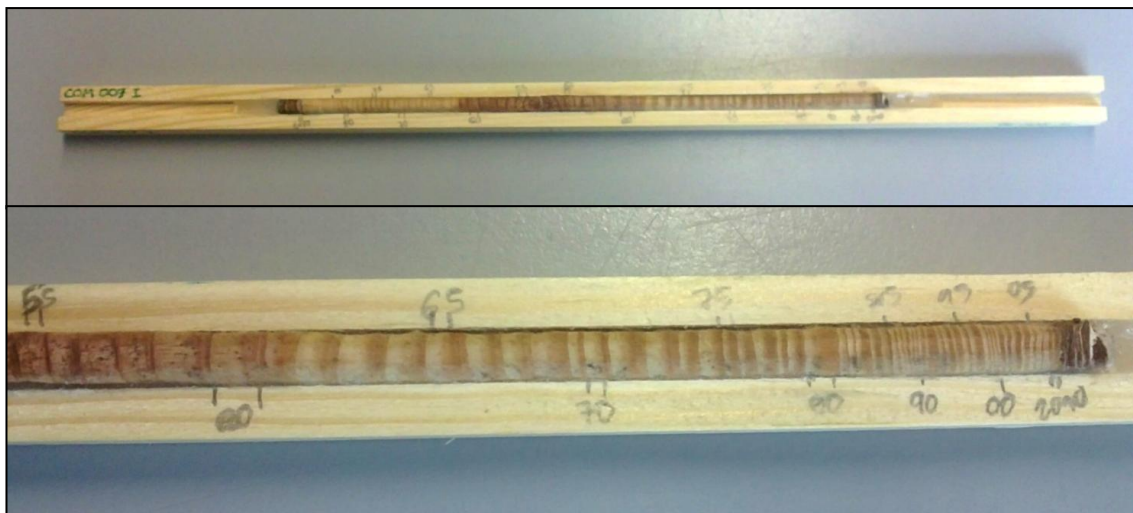


Figura 16. Mostra amb el comptatge d'anells i detall dels anells de creixement.  
Font: Oliveras G., 2011.

### 3.2.2.2 Procediment d'anàlisi

Una de les parts més importants per obtenir uns bons resultats finals és dur a terme un adient anàlisi de les mostres condicionades. Cada testimoni s'analiza de forma individual per tal d'interpretar els anys de cada exemplar i les característiques dels anells. Tota la informació extreta en aquest procés es representarà cronològicament de manera manual en un paper mil·limetrat.

El comptatge d'anells es realitza a banda i banda de la medul·la amb una lupa binocular. Si la mostra es troba en bones condicions, el nombre d'anells registrats a cada costat de la medul·la hauria de ser el mateix. Ens serà útil anar marcant a la mostra punts cada 5 o 10 anys de creixement (figura 16), tant per al comptatge com per a la posterior anàlisi dendrocronològica.

Per cadascun dels testimonis es realitza un gràfic en paper mil·limetrat. La simbologia utilitzada és la mateixa que en anteriors estudis dendrocronològics i està detallada en la llegenda. Els símbols ens permeten plasmar sobre el paper les variacions que apareixen en els anells i també la seva magnitud relativa. El grau de variació es valorarà des d'un mínim d'un fins a un màxim de cinc.

Un cop ja hem confeccionat cadascuna de les gràfiques que representen les variacions de cada individu, comencem a sintetitzar els resultats amb la finalitat d'obtenir una idea global de les reactivacions.

Generarem primerament un gràfic que il·lustrarà per cada any, el nombre d'individus mostrejats que han patit una reducció, augment dels anells o aparició de fusta de reacció, indicats amb diferents colors. A partir d'aquest, i seguint els criteris adequats podrem situar cronològicament en un altre gràfic quins han estat els anys on realment podem considerar que han existit reactivacions.

### **3.3. CARACTERITZACIÓ GEOTÈCNICA DEL MATERIAL DE L'ESLLAVISSADA**

#### **3.3.1. Extracció de la mostra**

L'extracció de les mostres del terreny que posteriorment serien analitzades al laboratori és una tasca clau per al desenvolupament de la tesina. La caracterització geotècnica del sòl, utilitzant el programa *Slope W* i d'acord amb els resultats dels assajos, ens donarà la informació necessària per determinar l'estabilitat de l'esllavissada.

La mostra ideal seria aquella inalterada, corresponent a la superfície de ruptura, tot i que en camp és difícil d'identificar-la i els sondejos no són possibles pels recursos econòmics que requereixen. No obstant això, es va buscar una zona del terreny on la mateixa erosió natural ens proporcionés una certa profunditat. Així vam obtenir una mostra el més proper i similar a la superfície de trencament.

Cal dir que es va poder intuir la superfície de trencament en l'excavació, ja que es va arribar fins a una zona on apareixia un pla de contacte més o menys llis i marcat amb petites esquerdes que semblava estendre's cap a l'interior. Tot i això, és molt complicat assegurar l'existència de la superfície de trencament visualment i amb excavacions d'aquesta magnitud, ja que podem estar errats o simplement considerar un trencament més petit i superficial que forma part de la gran esllavissada.

Es van extreure tres mostres-bloc de la mateixa excavació, situada al peu del moviment. La pressa de la mostra es va realitzar mitjançant una excavació amb pala americana (de fulla plana). A l'hora d'escollir el material representatiu, evitarem la zona més propera a la superfície, perquè es pot veure alterada per processos com els de meteorització. Per tant, es va retirar una capa d'uns 30 cm o més fins a observar que el sòl canvia de color i consistència i s'intuïa una petita superfície de trencament. En aquest moment drem a terme unes excavacions laterals per acabar de perfilar un bloc més o menys prismàtic. L'extraïem amb l'ajuda de la pala americana, l'envoltem en paper film i el dipositem en una bossa hermètica amb l'objectiu de mantenir la seva humitat natural fins al moment dels assajos.

Cal dir que és necessari dur a terme l'excavació i extracció dels prismes amb cura per tal de no modificar l'estructura interna del material, pel fet que l'assaig de tall directe

testa el material en estat natural. En canvi, per l'assaig de tall anular la mostra es remoldeja i condiciona abans de començar.



Figura 17. Fotografies d'una mostra-bloc, de la zona on es va extreure i de les eines utilitzades.  
Font pròpia.

### 3.3.2. Assajos de laboratori

#### 3.3.2.1. Granulometria

Per la caracterització d'un sòl és molt interessant i recomanable realitzar un assaig granulomètric i de sedimentació, que ens facilitaran la identificació del tipus de sòl mitjançant la distribució de mides dels grans, podent així classificar-los en graves, sorres i fins (llims i argiles).

Amb aquest objectiu la caracterització de la granulometria del sol es duu a terme en dues etapes. Una primera etapa per tamisat, per partícules de mida superior a 0,075 mm; i una segona per sedimentació, per partícules inferiors a 0,075 mm. Les partícules del sòl es classifiquen segons la mida:

Classificació		Mida	Assaig
<b>Graves</b>		$\varnothing > 2 \text{ mm}$	Garbells A.S.T.M.
<b>Sorres</b>	Gruixudes	$0,6 < \varnothing < 2 \text{ mm}$	
	Mitjanes	$0,2 < \varnothing < 0,6 \text{ mm}$	
	Fines	$0,06 < \varnothing < 0,2 \text{ mm}$	
<b>Llims</b>	Gruixuts	$0,02 < \varnothing < 0,06 \text{ mm}$	sedimentació
	Mitjans	$0,002 < \varnothing < 0,02 \text{ mm}$	
<b>Argiles</b>		$\varnothing < 2 \text{ }\mu\text{m}$	

Taula 1. Classificació dels sòls segons la seva granulometria.

### 3.3.2.1.1. Assaig granulomètric

La norma europea UNE-EN-933-1-1998 té com a objectiu definir un mètode utilitzant tamisos, per la determinació de la granulometria del sòl. Es caracteritzaran partícules amb una dimensió nominal de fins a 63 mm, excloent els fílers. El mètode consisteix en el rentat de l'àrid i el seu posterior tamisat en via seca.

#### ▪ Material

- Tamisos d'assaig.
- Balança de 0,01g d'apreciació.
- Tapa i fons hermètics per als tamisos.
- Dispositiu de rentat.
- Màquina de tamisar (opcional).
- Forn de dessecació.
- Maça de goma.

#### ▪ Procediment operatiu / Metodologia

Per a realitzar l'assaig granulomètric s'ha seguit el procediment enunciat per la norma UNE-EN 933-1-1998 utilitzant la sèrie A.S.T.M. de garbells que marca la norma UNE-EN 933-2-1996:

1. S'agafa la mostra i s'asseca a l'aire durant unes 24 hores. Una vegada seca, es matxa amb una maça amb cura de no trencar els grans. Tot seguit es pesa i s'obté la *Mostra total seca a l'aire*.
2. Es passa la mostra pel garbell nº10, de 2 mm d'obertura. Es pesa el material retingut pel garbell i s'obtenen els *Grossos sense rentar*, que seran uns 700g.
3. Del material que ha passat pel garbell nº10 es barreja amb una cullera per homogeneïtzar la mostra i se n'agafen entre 250 i 300 grams, aquests seran la *Fracció fina assajada seca a l'aire*.
4. Tant els *Grossos sense rentar* com la *Fracció fina assajada seca a l'aire* se submergeixen cadascun per separat en un recipient ple d'aigua durant 24h.
5. El següent pas és rentar les dues mostres de la fracció llim i argila. Per aconseguir-ho es passen les dues mostres, per separat, pel garbell nº200, de 0,075 mm d'obertura. D'aquesta manera pel garbell passarà i es perdrà tota aquella fracció de diàmetre inferior a 0,075 mm, és a dir, llims i argiles.
6. Quan ja les tenim netes, s'assequen al forn durant 24h. Una vegada seques es procedeix al garbellat de les dues per separat.
7. Per a la mostra de grossos es col·loquen els garbells un sobre l'altre des del garbell amb retenció diferent de zero, d'1/2" (12,5 mm) en el nostre cas, fins al garbell nº200. El material retingut a cada garbell es pesa. Si passa material pel

garbell nº200 aquest es menysprea, ja que la fracció llim i argila s'obté mitjançant assaig de sedimentació.



Figura 18. Sèrie de garbells utilitzats / Mostra de grossos i fins per separat, un cop assecades al forn.  
Font pròpia.

8. Per a la mostra de fins, com aquests ja havien passat pel garbell nº10, es garbella des del garbell nº16 (1,18 mm) fins al nº200, pesant el material retingut a cada garbell, tal com s'ha fet amb la primera mostra.

Garbells A.S.T.M.	
Designació	Mida del garbell (mm)
2 1/2"	63
2"	50
1 1/2"	38,1
1"	25
3/4"	19
1/2"	12,5
3/8"	9,5
Nº 4	4,75
Nº 10	2
Nº 16	1,18
Nº 40	0,425
Nº 100	0,15
Nº 200	0,075

Taula 2. Llista de garbells A.S.T.M

Relacionant els pesos retinguts en cada garbell amb el pes total de la mostra, s'obtenen els percentatges que determinaran la forma de la corba granulomètrica. Així doncs, podrem representar a la corba els punts referents a graves i sorres.

### 3.3.1.1.2. Assaig de sedimentació

Tota aquella fracció que no és retinguda pel garbell número 200 de la sèrie A.S.T.M., és a dir, aquell material que correspon a la fracció llim i argila, es sotmet a l'assaig de sedimentació. Es podrà obtenir un valor estimat de la distribució granulomètrica de partícules que es troben entre els 0,075 mm i els 0,001 mm aproximadament.

La base teòrica de l'assaig és la llei de Stokes adaptada al problema. Aquesta llei estableix que la velocitat de sedimentació d'una partícula depèn del diàmetre d'aquesta, del pes específic del material del qual està formada, del pes específic del fluid on se submergeix i de la viscositat dinàmica.

Suposant que a tota la proveta tenim una suspensió inicialment homogènia, a una profunditat  $z$ , i passat un temps  $t$  de sedimentació, ja no existiran partícules que tinguin un diàmetre superior al corresponent a les partícules que tinguin una velocitat de caiguda  $z/t$ . D'aquesta manera, es poden establir uns temps de mostreig que seran representatius d'unes mides de partícula en concret.

A la pràctica, s'agafen quatre mostres de  $10 \text{ cm}^3$  en quatre temps preestablerts i s'assequen unes 24 hores. Passat aquest temps, es pesen obtenint així el pes de les partícules sòlides existents en cada una de les quatre mostres, podent determinar la corba granulomètrica de cada material per sota dels 0.075 mm de mida.

#### ▪ Material

- |  |  |
|--|--|
| - Balança de precisió 0,0001g.             | - Pots pesa-substàncies.                             |
| - Maça de goma.                            | - Forn de dessecació.                                |
| - Tamís nº200 A.S.T.M. (0,075 mm de llum). | - Pipeta de $10 \text{ cm}^3$ i propipeta de 3 vies. |
| - Aigua destil·lada.                       | - Hexametafosfat sòdic.                              |
| - Proveta de $1000 \text{ cm}^3$ .         | - Batedora.  |
| - Cronòmetre.                              | - Tanc d'aigua amb termòmetre.                       |

#### ▪ Procediment operatiu / Metodologia

La preparació del sòl per a l'execució de l'assaig de sedimentació consisteix a assecar el material obtingut a camp a l'aire i picar-lo amb una maça de goma per deixar-lo llest per començar el procés:



1. Necessitem 50 g de material que passa pel tamís nº200 que es pesaran en una balança de precisió. Un cop pesat, el material es deixarà submergit en aigua destil·lada unes 24 hores.
2. Un cop transcorregut aquest temps, es mesclen en una proveta els 50 g de material amb uns 250 g d'aigua destil·lada i 10 g d'agent dispersant (en el nostre cas Hexametfosfat sòdic que té com a funció eliminar el ciment calcític que forma agregats de partícules, molt comú en sòls carbonatats). La mescla es bat durant 60 segons a la batedora.
3. Amb la mescla ben dissolta, aquesta solució es transfereix a una proveta de 1000 cm<sup>3</sup> que s'acaba d'omplir amb aigua destil·lada. En aquest moment s'agita la proveta amb les pròpies mans evitant que es perdi material fins al moment que la proveta es col·loca en un recipient amb aigua a 25°C. A partir d'aquest punt s'inicia el control del temps.
4. Es considera un punt situat a 10 centímetres de profunditat sota la superfície i mitjançant una pipeta es prenen mostres de 10 cm<sup>3</sup> (figura 19) en cada un dels temps preestablerts pel mètode d'assaig: 1min, 4min 2seg, 1h 4min 27seg, 6h 42min 48seg. Cada mostra es col·loca en un pot tarat.
5. Les mostres s'assequen al forn a 110°C durant 24 hores i llavors podem obtenir-ne el pes. Es registren els quatre pesos.



Figura 19. Extracció d'una mostra de la proveta submergida / Mostres extretes un cop assecades al forn.  
Font pròpia.

Finalment, amb els pesos obtinguts i les tares ja registrades anteriorment podem utilitzar un full de càlcul del laboratori. Per cadascun dels quatre registres en el temps, obtenim un punt a la corba granulomètrica corresponent a obertures de:

<b>Temps de registre</b>	1min	4min 2seg	1h 4min 27seg	6h 42min 48seg
<b>Obertura (mm)</b>	0,04159	0,02071	0,00518	0,00207

Taula 3. Correspondència entre els temps de registre de cada mostra i la mida de partícules que equivalen.

Evidentment, hi ha tota una sèrie de problemes a l'assaig que limiten la validesa d'aplicació de la llei de Stokes en el cas de la sedimentació (forma no esfèrica de les partícules, la llei és vàlida per una sola partícula però no per altes concentracions, les partícules de menys de 2  $\mu\text{m}$  estan afectades pel moviment brownià, etc.), però es consideren els resultats prou vàlids per acabar de completar la forma de la corba granulomètrica.

### 3.3.2.2. Límits d'Atterberg. Índex de plasticitat.

Els límits d'Atterberg són els valors de la humitat que limiten les consistències líquida, plàstica, semi-sòlida i sòlida. Atterberg va definir tres límits:

- Límit de retracció ( $\omega_R$ ): humitat que separa l'estat sòlid i el semi-sòlid.
- Límit plàstic ( $\omega_P$ ): humitat que separa l'estat semi-sòlid del plàstic.
- Límit líquid ( $\omega_L$ ): humitat separa l'estat plàstic del líquid.

Els sòls que tenen cohesió, en funció de la seva naturalesa i quantitat d'aigua, poden presentar propietats que l'incloguin en l'estat sòlid, semi-sòlid, plàstic o líquid. El contingut d'aigua o humitat límit a la qual es produeix el canvi d'estat varia d'un sòl a un altre.

Sòlid	Semi-sòlid	Plàstic	Líquid
$\omega_R$		$\omega_P$	$\omega_L$

Taula 4. Esquematització dels límits d'Atterberg.

A més a més, es defineix l'índex de plasticitat (IP) com la diferència entre el límit líquid i el límit plàstic ( $IP = \omega_L - \omega_P$ ).

#### 3.3.2.2.1. Límit líquid

Es defineix com límit líquid la humitat que té un sòl amassat amb aigua i col·locat en una cullera normalitzada (cullera de Casagrande), quan un solc fet amb un acanalador normalitzat es tanca en una longitud donada quan es donen 25 cops sobre la base de la cullera.

- Material

- Aparell de Casagrande.
- Balança.
- Acanalador normalitzat.
- Pots pesa-substàncies amb tapa.
- Espàtules de fulles flexibles de diferents mides.
- Tamís nº40 A.S.T.M. (0,425 mm de llum).
- Una superfície llisa, com un vidre de 300x300x10 mm.
- Forn de dessecació.
- Aigua destil·lada.
- Maça de goma.

- Procediment operatiu / Metodologia

En primer lloc es separa una part del material extret de la zona d'estudi, es matxaca lleugerament i es deixa assecar en un forn a 110°C durant unes 24 hores. Un cop el material està completament sec, es disgrega la mostra a partir del matxaqueig amb una maça de goma i es recull el material que passa pel tamís número 40 A.S.T.M. (0,425 mm de llum).

El material obtingut (uns 70g per cada assaig) es posa sobre la superfície llisa de vidre, se li va agregant suficient quantitat d'aigua destil·lada i es mescla amb l'espàtula fins a obtenir una pasta homogènia. És important que la humitat estigui ben distribuïda a tota la mostra.

Seguidament s'agafa la cullera de Casagrande amb una mà i amb l'altra estenem dins la cullera el material amb una espàtula. Cal procurar omplir la cullera amb un màxim gruix de 10mm, formar una superfície llisa i que no quedin bombolles d'aire a l'interior del sòl.



Figura 20. Procediment d'estendre el material dins la cullera i mostra preparada per ser assajada.  
Font pròpia.

Un cop la cullera està enrasada, es col·loca a l'aparell. Utilitzant l'acanalador s'obre un solc de dalt a baix formant un canal d'uns 2mm d'ample en la seva part baixa. Seguidament es fa girar la maneta de l'aparell de Casagrande a velocitat constant de manera que se li apliquen els cops amb una altura de caiguda de 10mm. Es conten els cops necessaris per a què el solc es tanqui uns 13mm de longitud al fons.

Finalment, es pren una mostra del material a la zona on s'ha tancat el solc per tal de determinar-hi la humitat. Es realitza un assecatge al forn a 110°C durant 24h i amb el pes abans i després, podem obtenir la humitat.

- Resultats

El sòl té la humitat corresponent al límit líquid si es tanca aquests 13mm quan se li apliquen exactament 25 cops. Com que és complicat aconseguir aquesta condició, es determina la humitat per la interpolació a partir dels resultats de diverses mostres assajades. D'aquesta manera es consideren resultats vàlids per la interpolació aquells que produeixen el tancament de 13mm en un interval entre 12 i 40 cops.

### 3.3.2.2.2. Límit plàstic

Es defineix com límit plàstic la humitat més baixa amb la que es poden formar amb una mostra de sòl, cilindres de 3mm de diàmetre, fent rodar aquest sòl entre els dits o el palmell de la mà i una superfície llisa, fins que comencen a aparèixer fissures longitudinals.

- Material

- |  |   |
|--|---|
| - Pots pesa-substàncies amb tapa.                      | - Balança de 0,01g d'apreciació.                              |
| - Espàtules de fulles flexibles de diferents mides.    | - Tamís nº40 A.S.T.M. (0,425 mm de llum).                     |
| - Una superfície llisa, com un vidre de 300x300x10 mm. | - Patró de comparació: filferro o plàstic de 3mm de diàmetre. |
| - Aigua destil·lada.                                   | - Forn de dessecació.   |
| - Maça de goma   |   |

- Procediment operatiu / Metodologia

Els passos previs seguits per a l'obtenció dels límits líquids i plàstic són comuns.

En primer lloc es separa una part del material extret de la zona d'estudi, es pica lleugerament i es deixa assecar en un forn a 110°C durant unes 24 hores. Un cop el material està completament sec, es disgrega la mostra a partir del matxaqueig amb una maça de goma i es recull el material que passa pel tamís número 40 A.S.T.M. (0,425 mm de llum).

Al material se li ha d'afegir aigua de manera que es pugui mesclar adequadament. Un cop la mostra esta llesta es pren una petita porció per formar els cilindres. Es fa rodar el material entre una superfície de vidre i les dues primeres falanges o el palmell de la mà, aplicant una pressió adequada depenent del tipus de sòl.

D'aquesta manera el contingut d'humitat va decreixent durant la manipulació i en conseqüència arriba un moment en què el cilindre té 3mm de diàmetre. Si arribem a aquest punt i la mostra no s'ha fissurat, es torna a fer l'el·lipsoide amb el mateix sòl. Es repeteix el procés les vegades que sigui necessari fins que s'originen les fissures que marquen la humitat del límit plàstic en tenir el cilindre de 3mm de diàmetre.



Figura 21. Cilindres de material formats seguint el procediment esmentat i abans de ser assecats.  
Font pròpia.

Es procedeix d'aquesta manera fins que s'obté un nombre de cilindres significatiu que compleixen la condició. D'aquesta manera, la humitat incògnita serà el més ajustada possible. Els cilindres obtinguts es reuneixen al pot pesa-substàncies i se'ls realitza un assecatge al forn a 110°C durant 24h. Amb el pes abans i després de passa pel forn, podem obtenir la humitat que correspondrà al límit plàstic.

### 3.3.2.3. Índex de plasticitat

L'índex de plasticitat es pot determinar un cop obtinguts els límits líquid i plàstic. Tal com hem citat anteriorment, s'expressa com  $IP = \omega_L - \omega_p$ . Aquest índex representa l'interval d'humitats en què el sòl té un comportament plàstic.

En funció dels valors que s'obtenen del límit líquid i de l'índex de plasticitat, Casagrande (1932) establí el gràfic de plasticitat (Figura 22). A partir de diversos estudis pràctics, Casagrande va establir que els sòls amb  $\omega_L > 50$  són d'*alta plasticitat* (admeten molta aigua, poden experimentar deformacions plàstiques grans, etc.); per sota d'aquest valor els sòls es consideren de *baixa plasticitat*. També va definir una

*línia A*. Els sòls que contenen gran quantitat de partícules de la fracció argilosa ( $\varnothing < 2\mu$ ) estan situats per damunt de la *línia A*, mentre que els llims i els sòls orgànics (que presenten fenòmens de plasticitat molt menys acusats) estan per sota d'aquesta línia.

Utilitzant la *línia A* i el criteri de baixa i alta plasticitat, en la taula de Casagrande es defineixen diverses zones, caracteritzant diferents tipus de sòls: argiles de baixa plasticitat (CL), argiles d'alta plasticitat (CH), llims i sòls orgànics de baixa plasticitat (ML-OL) i llims i sòls orgànics d'alta plasticitat (MH-OH). A la pràctica, doncs, es representa el punt corresponent als valors determinats de  $\omega_L$  i  $IP$  i s'obté una classificació que serveix per completar la identificació del sòl.

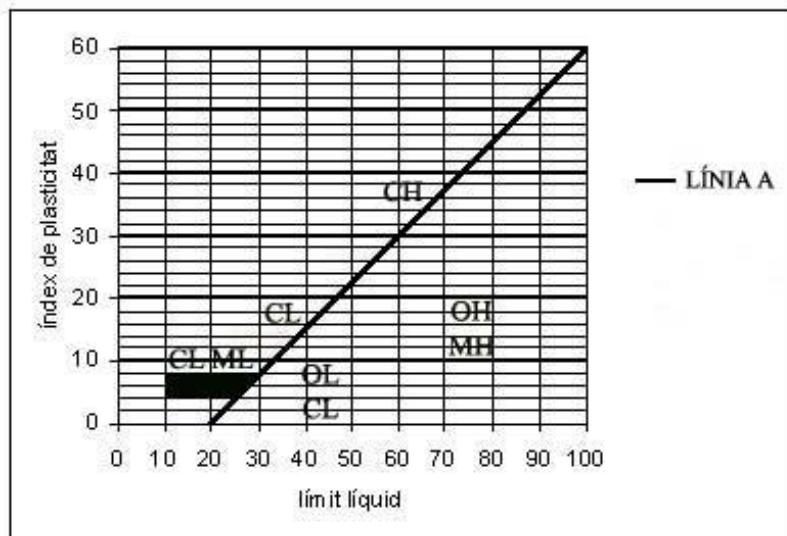


Figura 22. Gràfic de plasticitat de Casagrande.  
Font: Casagrande, 1932.

### 3.3.3. Assaig de tall anular

L'assaig de tall anular determina la tensió de tall i l'angle de fricció residual d'una mostra saturada per un material que pateix grans desplaçaments. Aquest assaig permet realitzar una deformació il·limitada en una sola direcció sense haver de fer marxa enrere, de manera que les partícules no es reorienten a cada cicle i l'àrea de contacte es manté constant.

L'assaig es duu a terme amb el material remoldejat, per tant no es trobaran els valors pic de la resistència, sinó que es desenvolupa solament el valor residual. Teòricament es pot imposar un desplaçament infinit, ja que la rotació no té cap límit físic. A la pràctica, però, es va perdent material pel diàmetre exterior de manera que s'arriba a un punt on cal aturar l'assaig perquè les condicions són molt diferents de les inicials amb el perill que només restin en contacte les partícules majors i que assagem el tall d'aquestes partícules en comptes del de l'estructura global del sòl.

- Material

Per determinar l'angle de fricció intern i resistència a la tracció residuals s'utilitza un equip de tall anular on la mostra de sòl es troba inserida en un motlle en forma d'anell. La mostra està restringida lateralment per una paret rígida i es sotmet a un tall de moviment circular sobre un pla horitzontal i il·limitat mentre se li aplica una tensió normal a aquest pla. L'assaig es realitza amb un equip Wykeham Farrance (figura 23). Les característiques més importants d'aquest equip són les següents:

- Motlle anular: caixa de forma anular d'acer inoxidable de 100 i 70 mm de diàmetre exterior i interior respectivament, i 5 mm d'alçada.
- Blocs permeables (pedres poroses): els blocs permeables permeten el drenatge de la mostra de sòl pels extrems superior i inferior de la mostra. Les pedres poroses tenen també la funció de transferir els esforços de cisalla horitzontal del bloc a les vores superior i inferior de la proveta. La permeabilitat de les pedres ha de ser substancialment major que la del sòl, però ha de tenir una textura prou fina per prevenir una intrusió excessiva als porus de la pedra. A més, aquestes pedres han de ser prou rugoses per aconseguir una adherència per fricció.



Figura 23. Equip de tall anular utilitzat en l'assaig.  
Font pròpia.

- Braços torçors: estructura que forma part de l'anell superior i que rep la força que es transmet a l'anell en forma de moviment circular.
- Anells de càrrega: amb un captador de pressió cadascun d'ells, són uns anells que enregistren la deformació deguda al parell de força rebut. Hi ha un anell per cada braç torçor.

- Sistema de palanques: mitjançant un sistema de palanques som capaços d'exercir una força vertical perpendicular al pla de trencament del sòl. Aquesta força es transmet com a tensió normal a l'anell superior i, per tant, a tot el pla anular.
- Sensor de pressió: dispositiu encarregat d'enregistrar les tensions exercides.
- Sensor LVDT: dispositiu encarregat d'enregistrar els desplaçaments horitzontals i verticals.
- Sistema d'adquisició de dades: sistema informàtic que rep les dades de forces i desplaçaments i les tracta automàticament mostrant a un visor, en temps real, les variacions de força i desplaçament.

A banda de l'equip de tall anular, també s'han requerit una sèrie d'estris pel desenvolupament de l'assaig:

- |  |   |
|--|---|
| - Pots pesa-substàncies.                                 | - Balança de 0,01g d'apreciació.                            |
| - Espàtules de fulles flexibles de diferents dimensions. | - Tamís n°40 A.S.T.M. (0,425 mm de llum).                   |
| - Una superfície llisa, com un vidre de 300x300x10 mm.   | - Safates de plàstic i metall per emmagatzemar el material. |
| - Aigua destil·lada.                                     | - Forn de dessecació.                                       |
| - Maça de goma.  |   |

#### ▪ Procediment operatiu / Metodologia

Per a realitzar l'assaig primer s'ha de preparar la mostra. Aquesta ha de tenir una mida de gra màxima de 0.5 mm, és a dir, que passi pel tamís n°40, per tal d'evitar problemes de fricció amb les cares dels anells. Per tant, el material extret de la zona d'estudi, es matxaca lleugerament i es deixa assecar en un forn a 110°C durant unes 24 hores. Un cop el material està completament sec, es disgrega la mostra a partir del matxaqueig amb una maça de goma i es fa passar pel tamís esmentat.

La mostra ja tamisada s'humiteja sobre la superfície llisa de vidre, idealment entre el seu límit líquid i límit plàstic per assegurar que la mostra es troba saturada i per millorar la seva treballabilitat a l'hora d'introduir-la al motlle (figura 24). És important mesclar bé el material i l'aigua amb l'espàtula perquè la humitat es distribueixi a tota la mostra.

La mostra introduïda al motlle es troba, doncs, confinada per dos anells, inferior i superior, d'argent porós i rugós per evitar el lliscament entre les superfícies i el sòl. L'anell inferior es manté fix mentre que el superior es connecta a un braç torçor que transmet un parell de forces a dos anells de càrrega.





Figura 24. Introducció de la mostra al motlle i col·locació de l'anell a l'aparell de tall anular.  
Font pròpia.

Les característiques de l'aparell obliguen a què el tipus d'assaig efectuat sigui consolidat drenat (CD). En un assaig d'aquest tipus, s'aplica una tensió normal, permetent el drenatge del sòl fins a finalitzar la consolidació primària. A continuació es procedeix al trencament de la mostra a una velocitat suficientment lenta com per assegurar que no s'originen pressions intersticials, permetent el lliure drenatge de l'aigua dels porus. D'aquesta manera s'obtenen els paràmetres resistents efectius.

Les fases típiques dels assaigs de tall anular són les següents:

- Fase de saturació. Tot i que la mostra, probablement, es troba saturada perquè se li ha afegit força aigua per modelar-la, un cop s'ha col·locat a la caixa de cisalla, s'omple l'espai que hi ha al voltant amb aigua. Aquesta travessa les pedres poroses i s'assegura la saturació de la mostra.
- Fase de consolidació. Una vegada inundada la cavitat exterior per assegurar que la mostra es troba completament saturada, aquesta es carrega fins a la tensió normal escollida. La fase de consolidació s'allarga unes 24 hores.
- Fase de tall. El motor farà girar la meitat inferior a una velocitat que permeti la dissipació de la pressió d'aigua que al nostre cas va ser de 5,1 mm/min (0,12°/min). El període de tall és d'un dia aproximadament i al mateix temps la tensió normal segueix actuant.

Durant l'assaig, els sensors prenen lectures de paràmetres de manera automàtica cada cert temps. Aquestes són recollides pel programa *Geolab* instal·lat al laboratori de sòls del Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de l'Escola de Camins. El programa ha anat registrant la tensió de tall mitjançant els dos anells de càrrega que mesuren la força produïda en els braços, que s'oposa al moment del torn produït pel fregament de la mostra en rotar la base inferior. Al mateix temps es mesura també la consolidació que es produeix a la mostra.

#### ▪ Tractament dels resultats

Les dades obtingudes en l'assaig són: desplaçament angular, desplaçament vertical, tensió de tall mesurada per les dues cèl·lules de càrrega i tensió normal.

El desplaçament vertical a cada interval marcat, queda registrat directament a l'arxiu que es genera durant l'assaig pel programa *Geolab*.

La tensió normal aplicada a la mostra es tria a l'inici de cada assaig col·locant pesos sobre la palanca. Es vol assajar la mostra a tensions normals de 50, 100 i 200kPa. Les equivalències en pes aplicades a la mostra es detallen a continuació:

kPa sobre la mostra	kg/cm <sup>2</sup> sobre la mostra	kg normal	kg palanca
<b>50</b>	0.5	20	2
<b>100</b>	1	40	4
<b>200</b>	2	80	8

Taula 5. Equivalències entre tensions normals i pesos aplicats a la mostra.

La tensió de tall mitja a cada instant ( $\tau_m$ ) s'obté mitjançant una fórmula calibrada on intervé un moment. En tractar-se d'un moviment de gir, es crea un moment que depèn directament de les forces que exerceixen els braços. El moment M s'obté mitjançant l'expressió següent:

$$M = L \cdot (F_A + F_B) \cdot g$$

On:

M[kNm] és el moment.

L[m] és la distància entre els punts d'aplicació de les forces i el centre de la mostra (en el nostre cas L=75.5mm).

F<sub>A</sub>[kg] i F<sub>B</sub>[kg] són les forces aplicades per l'anell A i l'anell B, respectivament.

g[m/s<sup>2</sup>] és l'acceleració de la gravetat (considerarem l'aproximació g≈10m/s<sup>2</sup>).

Així doncs, la tensió de tall es calcularà:

$$\tau_m = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot (r_2^3 - r_1^3)}$$

On:

M[kNm] és el moment.

r<sub>1</sub>[m] és el radi interior de la mostra (en aquest cas r<sub>1</sub>=35mm).

r<sub>2</sub>[m] és el radi exterior de la mostra (en aquest cas r<sub>2</sub>=50mm).

Per a trobar el desplaçament angular, farem servir la velocitat angular de gir que hem programat a l'equip de tall anular. S'ha fet servir la velocitat més baixa possible,  $\omega=0.12^\circ/\text{min}$  que equivalen a  $\omega=128.21\text{mm}/\text{dia}$ , fent la conversió amb uns factors del manual de l'aparell.

Amb aquestes dades que obtindrem, per tant, es pot traçar la corba *Tensió de tall  $\tau$  (kPa) - Desplaçament angular ( $^\circ$ )* per observar quina ha estat l'evolució de les tensions

de tall en cada un dels assajos. A partir d'aquesta gràfica, es construeix la corba *Tensió de tall*  $\tau$  (kPa) – *Tensió Normal*  $\sigma_n$  (kPa) amb els resultats de les tensions de tall residual obtingudes.

Realitzant l'assaig per a tres valors diferents de la tensió normal obtenim tres punts al gràfic *Tensió de Tall Residual* ( $\tau_{res}$ ) – *Tensió Normal* ( $\sigma_n$ ), que ens proporcionen la recta de trencament segons la llei de Mohr-Coloumb. La recta s'ajusta mitjançant una regressió lineal per tal d'obtenir-ne el pendent per posteriorment poder calcular l'angle de fricció residual, que és l'angle que forma la recta amb el pla horitzontal.

La recta ajustada no acostumada a passar per l'origen de coordenades. Això no vol dir que el sòl tingui cohesió, ja que està remoldejat i s'accepta que la cohesió és nul·la. Cal dir que aquest valor de cohesió que apareix, seguint el criteri de Mohr-Coulomb, pot ser degut a materials cimentats o a la succió que es genera en les mostres al ser extrems del terreny.

### 3.3.4. Assaig de tall directe

A continuació s'explica el mètode per a la determinació de la resistència al tall d'una mostra de sòl, sotmesa prèviament a un procés de consolidació, quan se li aplica un esforç de cisalla mentre es permet el drenatge. L'assaig es duu a terme deformant una mostra a velocitat controlada, prop d'un pla de cisalla determinat per la configuració de l'aparell. Generalment s'assagen tres o més mostres del mateix material, cadascuna sota una càrrega vertical diferent per a determinar el seu efecte sobre la resistència al tall i al desplaçament i les propietats de resistència a partir de les envoltants de resistència de Mohr. Així doncs, l'objecte d'aquest assaig és la determinació dels paràmetres resistents, cohesió  $c'$  i angle de fricció intern  $\phi'$  d'un sòl sotmès a esforç de tall.

#### ▪ Material

Per determinar aquests paràmetres s'utilitza un equip de tall directe. Una proveta de sòl de forma cilíndrica que es troba restringida lateralment per una paret rígida, es talla al llarg d'un pla horitzontal mentre es troba sotmesa a una tensió normal a aquest pla. L'assaig es realitza amb un equip Wykeham Farrance WF 25300 (figura 25) amb les següents característiques:

- Caixa de tall: caixa circular d'acer inoxidable de 60 mm de diàmetre per 25 mm d'altura, amb dispositius pel drenatge tant superior com inferior. Aquesta caixa ha d'estar dividida verticalment per un pla horitzontal en dues meitats d'igual gruix que s'ajusten amb caragols d'alineació. La caixa té també uns caragols de separació que controlen l'espai entre les meitats superior i inferior.
- Blocs permeables (pedres poroses): els blocs permeables permeten el drenatge de la mostra de sòl pels extrems superior i inferior de la mostra. Les pedres

poroses tenen també la funció de transferir els esforços de cisalla horitzontal del bloc a les vores superior i inferior de la proveta. La permeabilitat de les pedres ha de ser substancialment major que la del sòl, però ha de tenir una textura prou fina per prevenir una intrusió excessiva als porus de la pedra. A més aquestes pedres han de ser prou rugoses per aconseguir una adherència per fricció.

- Sistema de palanques: mitjançant un sistema de palanques som s'exerceix una força vertical perpendicular al pla de trencament del sòl que es transmet com a tensió normal a tot el pla. No és recomanable superar els 500 kPa.
- Sensor de pressió: és el dispositiu encarregat d'enregistrar les tensions exercides.
- Sensor LVDT: dispositiu encarregat d'enregistrar els desplaçaments horitzontals i verticals.
- El desplaçament horitzontal aplicat a la part inferior de la mostra està controlat per un motor, que permet velocitats entre 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  i 1.2 mm/min.
- Sistema d'adquisició de dades: és el sistema informàtic que rep les dades de forces i desplaçaments i les tracta automàticament mostrant per un visor, a temps real, les variacions de força i desplaçament.



Figura 25. Equip de tall directe utilitzat durant l'assaig.  
Font pròpia.

A banda de l'equip de tall directe, també s'han requerit una sèrie d'elements pel desenvolupament de l'assaig:

- Pots pesa-substàncies.
- Balança de 0,01g d'apreciació.
- Espàtules de fulles flexibles de
- Tamís n°40 A.S.T.M. (0,425 mm de

diferents dimensions.

- Una superfície llisa, com un vidre de 300x300x10 mm.

- Aigua destil·lada.

- Maça de goma.

llum.

- Safates de plàstic i metall per emmagatzemar el material.

- Forn de dessecació.

#### ▪ Procediment operatiu / Metodologia

L'assaig de tall directe consisteix a fer lliscar una pastilla de sòl respecte a una altra al llarg d'un pla de falla predeterminat, mitjançant l'acció d'una força de tall horitzontal incrementada, mentre s'aplica una càrrega normal al pla del moviment. El material assajat serà el mateix que vam extreure a camp, sense remodeldejar-lo ni modificar-lo.

Primerament, s'ha de col·locar el material dins l'anell que anirà a la caixa de tall. Amb la balança es pesa l'anell buit on s'introduirà la mostra, per més tard poder calcular la seva densitat inicial. El procés de col·locació del material en l'orifici cilíndric és lent i ha de ser molt curós. La mostra s'ha d'anar tallant a poc a poc per obtenir unes dimensions adequades per anar introduint el sòl a l'anell (figura 26).



Figura 26. Procediment de preparació de la mostra per introduir-la a l'anell de l'equip de tall directe.  
Font pròpia.

La idea és preparar la mostra de manera que quedi el menys afectada possible per la nostra manipulació. Un cop hem aconseguit omplir el cilindre del nostre material, el tornem a pesar. Amb el pes de l'anell amb material, l'anell buit i les dimensions de la mostra es calcularà la seva densitat i pes específic natural.



Figura 27. Anell amb el material, llest per col·locar-lo a l'equip de tall directe.  
Font pròpia.

L'anell amb el material (figura 27) se situa dins la caixa de tall de l'equip i es col·loquen les pedres poroses. La mostra ja està llesta per ser assajada seguint les següents fases:

- Fase de saturació i de compressió vertical. Un cop la mostra s'ha col·locat a la caixa de cisalla s'omple l'espai que hi ha al voltant amb aigua. Aquesta travessa les pedres poroses i satura la mostra. Al mateix temps, la mostra es carrega fins a la tensió efectiva vertical (que anirem modificant per cada assaig) prèvia a la fase de tall. El període de consolidació i saturació serà d'unes 24 hores.
- Fase de tall. La mostra es sotmet a un augment progressiu de la tensió tangencial a una velocitat de desplaçament horitzontal de  $5 \mu\text{m}/\text{min}$ , prou lenta com per assegurar que no s'originen pressions d'aigua entre les partícules. El període de tall és també de 24 hores. Durant aquesta fase la mostra també es troba en saturació i compressió vertical, a més a més d'estar sotmesa al tall.

Durant l'assaig es mesura a intervals de temps determinats la reacció horitzontal necessària per impedir el desplaçament de l'altra part de la cèl·lula, obtenint així la tensió tangencial en cada instant, que serà el valor de la força horitzontal mesurada dividida pel valor de l'àrea de la pastilla de mostra del material. Per als mateixos intervals de temps es mesura el desplaçament vertical de la mostra, fet que permet obtenir els canvis de volum del sòl en cada moment.

### 3.4. ANÀLISI D' ESTABILITAT

L'estabilitat dels vessants és un dels objectius primordials en els estudis duts a terme en l'àmbit de l'enginyeria geotècnica. Molts projectes d'enginyeria que es realitzen afronten l'anàlisi de l'estabilitat de vessants, tant siguin naturals com construïdes per l'home. Per tant, entendre el comportament d'aquests fenòmens i saber-lo analitzar és

de gran importància per a identificar moviments existents o estimar les zones que en poden patir.

Per a què un moviment de massa o lliscament es produeixi depèn principalment de la intensitat i duració de les precipitacions per un costat, i de la litologia i característiques geològiques i geotècniques del terreny implicat. Hi ha formacions que són especialment perceptibles als canvis de les condicions de contorn com són les fàcies del Garumnià de la zona prepirinenca. Per exemple, molts vessants ubicats al Pirineu i pre-Pirineu tenen un marge de seguretat respecte a possibles mobilitzacions molt baix i que es pot reduir si té lloc una elevació del nivell piezomètric.

### 3.4.1. Mètodes d'anàlisi. Mètode de l'equilibri límit

La determinació quantitativa de l'estabilitat d'un vessant es realitza a partir de la definició dels Factors de Seguretat, que exigeixen l'ús de tècniques i models propis de la Mecànica de Sòls. El desenvolupament de models de càlcul però, és tan sols una part del problema, doncs caldrà integrar també els estudis geomorfològics i geològics amb tècniques d'anàlisi, predicció i correcció, si fos necessari.

El Mètode d'Equilibri Límit estableix una línia o superfície de lliscament coneguda. A partir d'aquesta s'imposen les equacions d'equilibri i l'equació constitutiva, establint-se la relació de plasticitat perfecta de Mohr-Coulomb i les condicions de contorn adients.

En aquest mètode s'interpreta l'existència d'una massa de sòl que llisca sobre una superfície de ruptura (Anderson & Richards, 1987). En el moment de ruptura, la resistència al tall és totalment mobilitzada al llarg de tota la superfície de trencament, i el vessant es troba, en la seva totalitat, en equilibri estàtic. La resistència al tall del sòl ve donada pel criteri de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi$$

A l'anàlisi d'estabilitat de vessants, la resistència al tall utilitzada en condicions d'equilibri haurà de ser per força inferior a la resistència màxima disponible. En el cas que no sigui així, el vessant no seria estable i es formaria una superfície de ruptura o es reactivaria el moviment per una superfície ja existent. Per tant, es pot introduir el concepte de factor de seguretat (FS) com a la relació entre la resistència mobilitzada i la total disponible:

$$FS = \frac{\text{Resistència de tall disponible}}{\text{Resistència de tall necessària per a l'estabilitat}}$$

En els casos en què el valor del Factor de Seguretat sigui menor a la unitat ens trobarem en una situació en la qual la resistència disponible no és suficient per a

mantenir l'estabilitat del conjunt i, per tant, el vessant serà inestable sota aquestes condicions.

Es considera, doncs, que els mètodes d'Equilibri Límit existents són relativament simples i proporcionen resultats bons de cara a poder avaluar l'estabilitat d'un talús. A més, són mètodes aplicables a qualsevol tipus de terreny i acostumen a proporcionar valors de les càrregues de ruptura superiors a les exactes però acceptables.

L'aplicació d'aquest mètode requereix les següents fases de càlcul (Alonso, 1989):

1. Determinar un mecanisme de ruptura cinemàticament admissible. Generalment es consideren masses de sòl rígides que llisquen sobre una superfície de ruptura que adquireix formes geomètricament senzilles, com poden ser rectes, circumferències o espirals logarítmiques. Si el terreny a estudiar és heterogeni, aquestes superfícies poden ser més complexes.
2. A partir de les condicions d'equilibri, s'estableixen relacions entre les forces que intervenen en el problema. En general es diferencien les forces que indueixen desequilibri (pes, càrregues exteriors, pressions d'aigua...) i forces internes resistents.

Les equacions d'equilibri que cal complir en un problema en dues dimensions genèric són:

- Dues equacions d'equilibri de forces (horitzontals i verticals).
- Una equació d'equilibri de moments, en relació a un punt escollit arbitràriament.

En molts casos, una sola equació de les anteriors serà suficient per a definir estàticament el problema (per exemple, l'equilibri del moment en una anàlisi de ruptura circular).

3. S'analitza l'estabilitat del conjunt a partir del concepte de Factor o Coeficient de Seguretat. Aquest coeficient determina la relació existent entre la resistència al tall disponible, i la resistència al tall necessària per a garantir l'estabilitat del conjunt.
4. S'obté el valor del Factor de Seguretat, aïllant FS, de les equacions d'equilibri citades en el punt 3. Cal buscar el valor de FS mínim, realitzant processos de càlcul repetitius.

Una hipòtesi comuna a tots els mètodes de càlcul és considerar el talús indefinit en la direcció horitzontal paral·lela a la superfície del mateix talús. Tot i que la ruptura es desenvolupa en tres dimensions, si es considera el problema pla (dues dimensions) s'obtenen resultats del costat de la seguretat, doncs no es considera l'efecte dels marges laterals que limiten el lliscament.

Com a mètodes clàssics per a l'anàlisi de l'estabilitat en sòls es tenen:



- Anàlisi de ruptures planes en talussos infinits.
- Mètodes que analitzen l'equilibri total d'un bloc o massa total lliscant.
- Mètodes de les llesques.

Els dos primers mètodes citats (talussos infinits i massa total), proporcionen el valor del FS (factor de seguretat) a partir de la resolució immediata d'equacions simples. Són vàlids per a materials homogenis i tan sols consideren l'equilibri de forces en un punt de la superfície de ruptura.

El mètode de les llesques necessita, en canvi, sistemes d'equacions i processos de càlcul iteratius per a la seva resolució. A més a més, permet treballar amb materials heterogenis i comporta un seguit d'hipòtesis pròpies respecte a la localització, posició i distribució de les forces que actuen sobre les llesques. El càlcul de les forces actuant es fa per a cadascuna de les llesques, integrant-se finalment els resultats obtinguts.

El mètode de les llesques, basat en l'equilibri límit, és el procediment d'anàlisi que utilitzarem. La seva complexitat en els càlculs ens proporciona uns resultats més acurats.

#### 3.4.1.1. Mètode de les llesques

Per tal de poder millorar els resultats obtinguts amb els mètodes d'equilibri global es desenvoluparen els mètodes de les llesques. En aquest cas, la massa del lliscament es divideix en un nombre de llesques verticals, que passen a considerar-se com un conjunt de sòlids rígids i que per tant han de complir, cadascun d'ells, totes les condicions d'equilibri.

Els avantatges del mètode de les llesques són:

- S'aconsegueix una millor aproximació de la distribució de les tensions normals sobre la superfície de lliscament. Aquesta distribució es veurà molt condicionada per l'alçada de terres existents per sobre de cada un dels elements de longitud de la superfície de lliscament.
- Facilita l'anàlisi dels casos en què el sòl és heterogeni, ja que tan sols és necessari escollir adequadament el nombre i situació de les diferents llesques. En la majoria de casos, els punts d'intersecció entre la suposada superfície de lliscament i els contorns dels estrats homogenis coincidiran amb els límits de les llesques.

En general, no s'acostuma a treballar amb un nombre inferior a 10-15 llesques.

Malauradament, el problema esdevé estàticament indeterminat. Per a solucionar-ho, caldran establir-se determinades hipòtesis. Una primera hipòtesi, utilitzada per la majoria dels mètodes de càlcul emprats en el mètode de les llesques, és considerar que el punt d'aplicació de la força normal està situat en el centre de la llesca. Aquesta

hipòtesi serà més exacta com més gran sigui el nombre de llesques. Caldrà, però, establir hipòtesis addicionals que faran referència a les forces que actuen en els marges laterals de les llesques i que seran diferents segons quin sigui el mètode que s'estigui utilitzant.

Existeixen doncs diversos mètodes de càlcul. Els més coneguts són el Mètode de Janbu (1957), el de Spencer (1967) i el de Morgenstern i Price (1965). Cadascuna d'aquestes tipologies considera unes condicions i hipòtesis per al càlcul. Tanmateix, el mètode Morgenstern i Price és l'únic que estableix tant l'equilibri de moments com l'equilibri de forces. D'aquesta manera s'obté un factor de seguretat sobre les forces i un altre sobre els moments, tot i que a la pràctica són gairebé iguals i es consideren conjuntament. Per tractar-se del mètode més exacte, és el que s'ha emprat en el present estudi per a l'obtenció del factor de seguretat.

### 3.4.2. Hipòtesis i casos d'estudi.

L'anàlisi de sensibilitat pretén valorar quina és la influència de la variació de certs paràmetres o condicions de contorn sobre l'estabilitat d'un vessant. Concretament, s'estudia la influència de la variació de l'angle de fricció residual, de la variació del nivell freàtic i de la profunditat de la superfície de trencament. Les hipòtesis i casos considerats es detallen a continuació:

Diferents profunditats de la superfície de trencament:

- Profunditat mitjana de 10 metres.
- Profunditat mitjana de 7.5 metres.
- Profunditat mitjana de 4 metres.

Casos que s'estudiaran pel que fa al nivell freàtic:

- Nivell freàtic en la superfície del terreny: condició saturada.
- Nivell freàtic entre la superfície del terreny i la de trencament: condició semi-saturada.
- Nivell freàtic per sota de la superfície de trencament: condició seca.

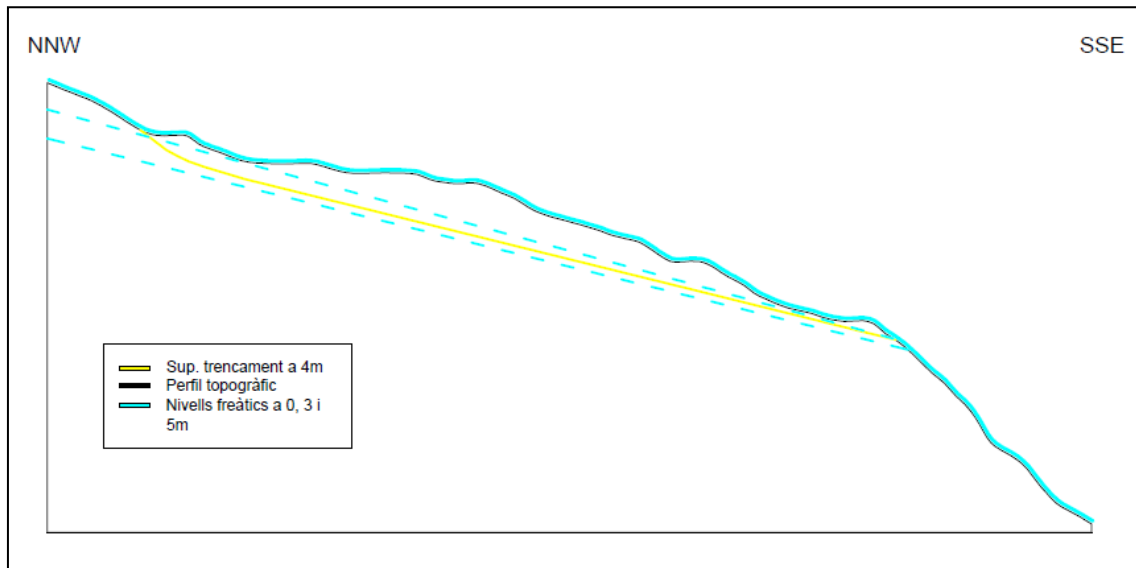
El rang de variabilitat en l'angle de fricció residual es fixarà tenint en compte els resultats de l'assaig de tall anular. D'aquesta manera, l'angle de fricció es farà variar dins d'un interval que ens proporcioni un bon ventall de resultats.

S'ha considerat que la superfície de trencament és aproximadament paral·lela a la superfície topogràfica, gràcies a la informació que es coneix d'altres moviments de la mateixa morfologia i naturalesa.

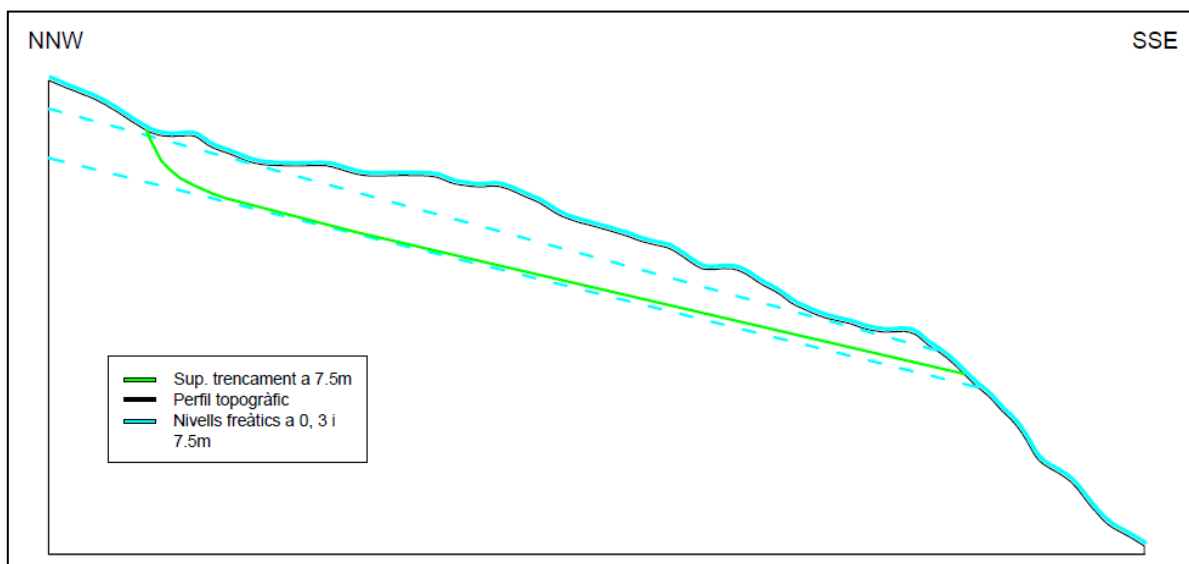
Les profunditats de les superfícies de trencament i dels nivells freàtics s'han estimat tenint en compte la longitud i l'amplada de l'esllavissada, de manera que ens dibuixin

un moviment coherent amb el fenomen. Es considera també com a hipòtesi vàlida que la línia piezomètrica sigui més o menys paral·lela a la superfície del terreny.

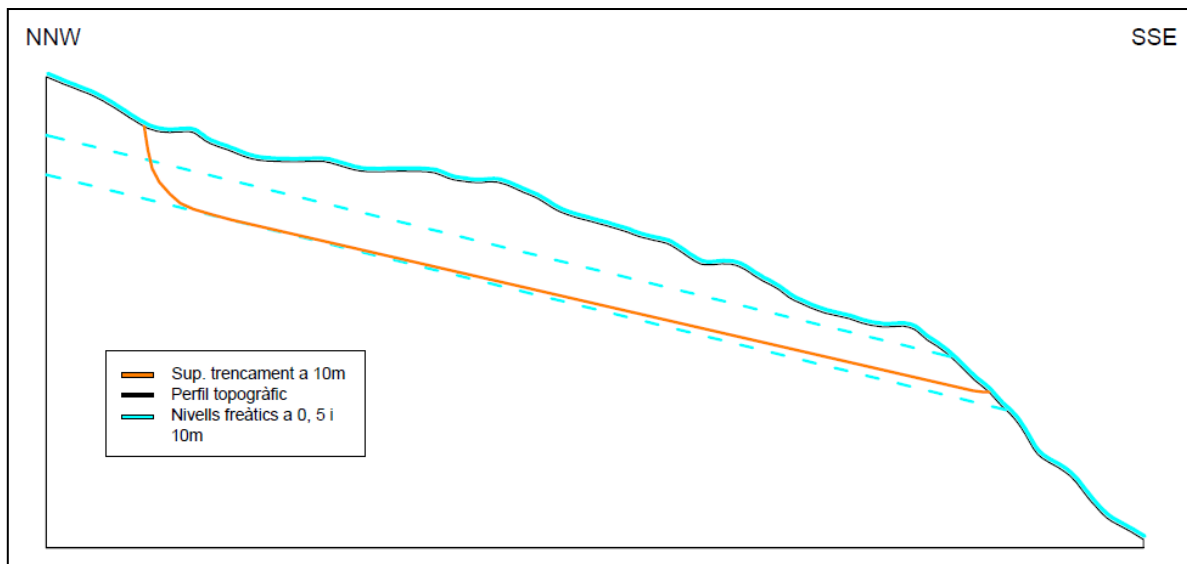
A continuació es mostren de manera gràfica les suposicions esmentades pel que fa a les diferents posicions del nivell freàtic (condició saturada, semi-saturada i seca) en cada una de les tres profunditats de la superfície de lliscament considerades.



**Figura 28.** Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 4m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran.  
Font pròpia.



**Figura 29.** Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 7.5m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran.  
Font pròpia.



**Figura 30.** Perfil topogràfic de l'esllavissada amb la superfície de trencament a 10m de profunditat i les tres posicions del nivell freàtic que s'estudiaran.

Font pròpia.

### 3.4.3. Programa de Càlcul. Slope W.

Com a motor dels càlculs d'estabilitat s'ha utilitzat el programa Slope W del paquet GeoStudio 2007. Es tracta d'un software desenvolupat per GeoSlope Ltd., de modelització per a càlculs geotècnics.

Slope W és una eina programada per al càlcul i resolució de problemes d'estabilitat, mitjançant l'equilibri límit explicat anteriorment. A més a més, ens permet escollir entre els mètodes d'anàlisi d'aquest tipus més comuns: Bishop, Janbu, Ordinari i Morgenstern-Price. I fa servir els criteris de Mohr-Coulomb per a sòls, i de Hoek&Brown per roques.

Així doncs, un cop establertes anteriorment les hipòtesis que ens ajudaran a definir els paràmetres de la nostra anàlisi de sensibilitat, hem de veure com treballar amb el programa. El nostre objectiu és estudiar el factor de seguretat de la vessant mitjançant l'equilibri límit. Com ja s'ha detallat anteriorment, el mètode d'anàlisi triat per obtenir els resultats és Morgenstern-Price.

El software Slope W ens demana que definim una sèrie d'especificacions per utilitzar el mètode esmentat. La programació de l'anàlisi segons Morgenstern-Price requereix que s'estableixin paràmetres com el nombre de llesques, la tolerància, el nombre màxim d'iteracions o les condicions de la pressió d'aigua, entre d'altres.

Un cop definit l'anàlisi, és necessari introduir una sèrie de característiques del vessant: el perfil topogràfic, les propietats geotècniques del material, la superfície de trencament i el nivell freàtic.

Per a realitzar el perfil topogràfic s'ha emprat informació proporcionada per l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. D'una banda, amb els mapes topogràfics on estan marcades les corbes de nivell. I d'altra banda amb l'aplicació Vissir (de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya) que ens permet obtenir el perfil topogràfic longitudinal de qualsevol secció que definim en el mapa. Les dues informacions s'han comparat i verificat entre elles i s'han utilitzat per definir els punts del nostre perfil. Les coordenades de cada punt en X i en Y s'han dibuixat en AutoCAD creant una polilínia amb tots els punts del perfil. A continuació s'ha acotat la profunditat i s'ha creat una regió per tal de poder-ho importar directament al programa Slope W.

Les superfícies de trencament i els nivells freàtics s'han dibuixat també en forma de polilínia a AutoCAD un cop ja teníem el perfil del terreny com a referència. Per introduir-ho al programa, en aquest cas necessitem les coordenades X,Y que defineixen cada superfície. El procediment llavors ha estat obtenir d'AutoCAD els punts que formen cada superfície de trencament i cada nivell freàtic i organitzar-los en un fitxer de Microsoft Excel. D'aquesta manera ja podem importar-ho a Slope W per a què ens ho dibuixi a partir de les coordenades.

Un cop generada la geometria s'han especificat les característiques geotècniques del material, segons les necessitats del mètode Morgenstern-Price i utilitzant el criteri de trencament de Mohr-Coulomb. En el nostre cas, no es va observar cap estructura o laminació i definim el sòl com a homogeni, és a dir, compost per un únic material llim-argilós. Les característiques principals introduïdes sobre el material són el pes específic, la cohesió i l'angle de fricció residual.

## 4. RESULTATS

---

En aquest apartat es mostren i s'analitzen els resultats obtinguts en els diferents treballs realitzats al llarg de la tesina, a més d'una breu interpretació. Hem obtingut resultats en els següents camps:

- Cartografia geomorfològica detallada.
- Dendrogeomorfologia.
- Identificació i classificació del sòl.
- Anàlisi d'estabilitat.

### 4.1. CARTOGRAFIA GEOMORFOLÒGICA

El moviment de vessant de la Font del Bullidor és un lliscament translacional que es compon d'una sola unitat. La direcció del moviment és NNW-SSE amb l'escarpament de capçalera a la part NNW de la zona i amb el peu al SSE.

A la part baixa del lliscament ja hi existia un escarpament que era el mateix fons de vall. Quan es va activar el moviment i el peu del lliscament va arribar a aquesta zona, es va trobar amb un augment sobtat del pendent. Aquest fet va provocar que el peu del moviment es quedés sense sosteniment, fent fluir el material. Per tant, es tracta d'un lliscament translacional en la seva formació però que es va convertir en un flux al seu peu per culpa del relleu que presentava la vall. Es tracta d'un flux tant de roques grosses com de materials més petits.

El nom de la zona, la Font del Bullidor, ja ens indica una mica les característiques que pot tenir el terreny. És un lloc on hi havia una font o brollador, per tant ja es podia esperar força presència d'aigua en el material. Quan es van extreure les mostres d'argiles ja es va veure que estaven molt humides i que hi havia una notable presència d'aigua. Actualment la font arriba canalitzada de manera artificial fins a una pista forestal, cosa que fa desconèixer la seva localització natural.

La cartografia geomorfològica (figura 31) obtinguda està a escala 1:1250 i s'han indicat totes les formacions característiques d'un moviment que presenta (escarpaments, límits, esquerdes,...). Com a elements afegits, s'ha indicat el punt on es va extreure la mostra de sòl i també una zona on es formava un petit flux d'aigua superficial.

Longitud	Àrea	Amplada	Pendent Mitjà
200 m	1.3 ha	62.5 m	14°

Taula 6. Característiques geomètriques del moviment.

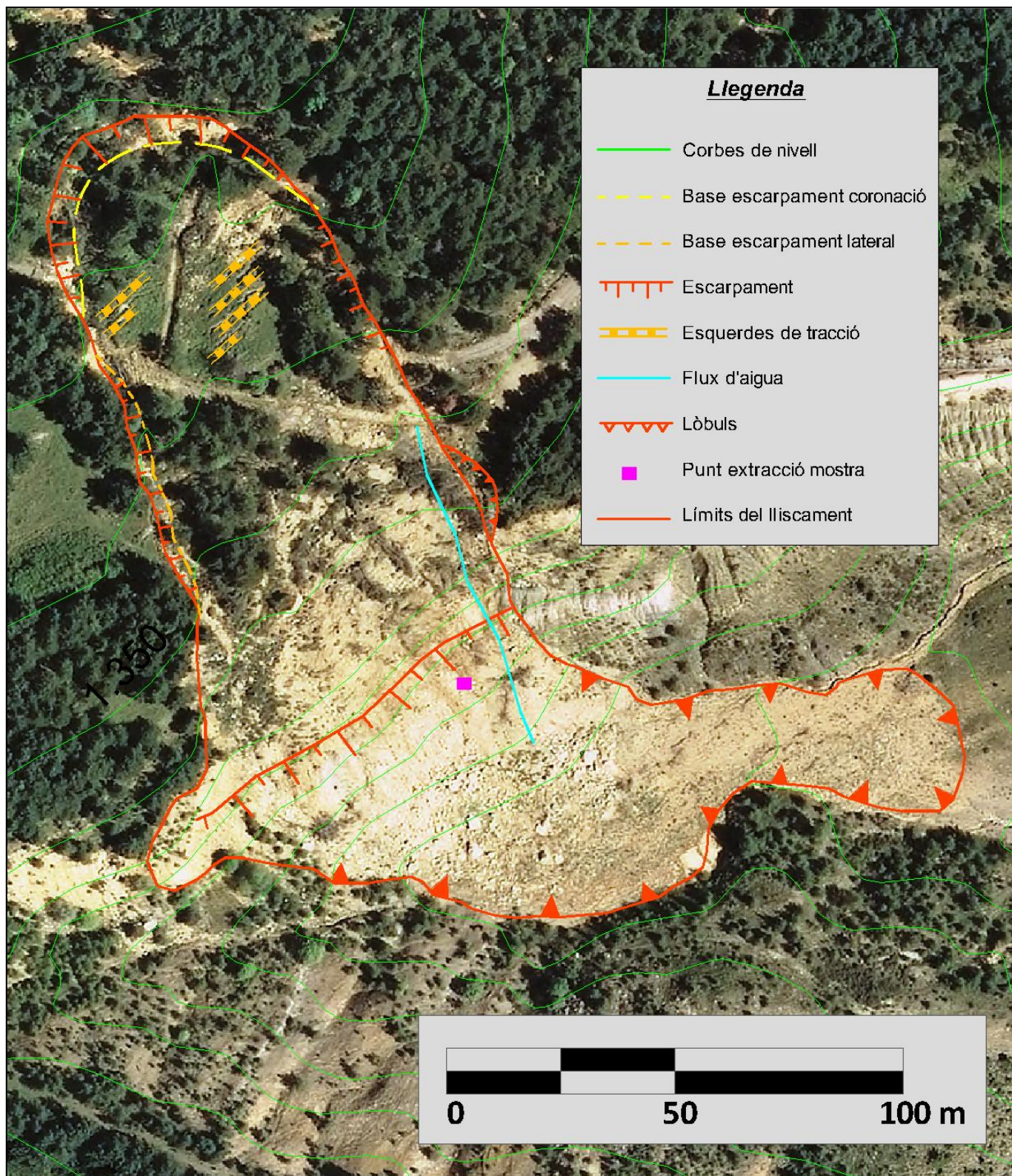


Figura 31. Cartografia geomorfològica del lliscament translacional de la Font del Bullidor a escala 1:1250.  
Font pròpia.

## 4.2. DENDROGEOMORFOLOGIA

En aquest apartat es donaran a conèixer els resultats obtinguts en la presa de mostres i la posterior anàlisi dendrogeomorfològica dels arbres del moviment de la Font del Bullidor. Després del tractament de dades s'obtindrà la freqüència de reactivació de l'esllavissada.

### 4.2.1. Arbres mostrejats en el moviment.

Dins del moviment d'estudi s'han mostregjat un total de 16 arbres. Nombre de mostres prou baix, però a la zona només alguns compleixen les condicions ideals per assegurar la fiabilitat del mètode. Tot seguit podem observar a la figura 32 la cronologia (edat) dels arbres mostrejats. L'arbre més antic data del 1939, a partir de l'any 1947 ja es disposa de cinc exemplars vius i del 1998 cap endavant ja estan tots vius.

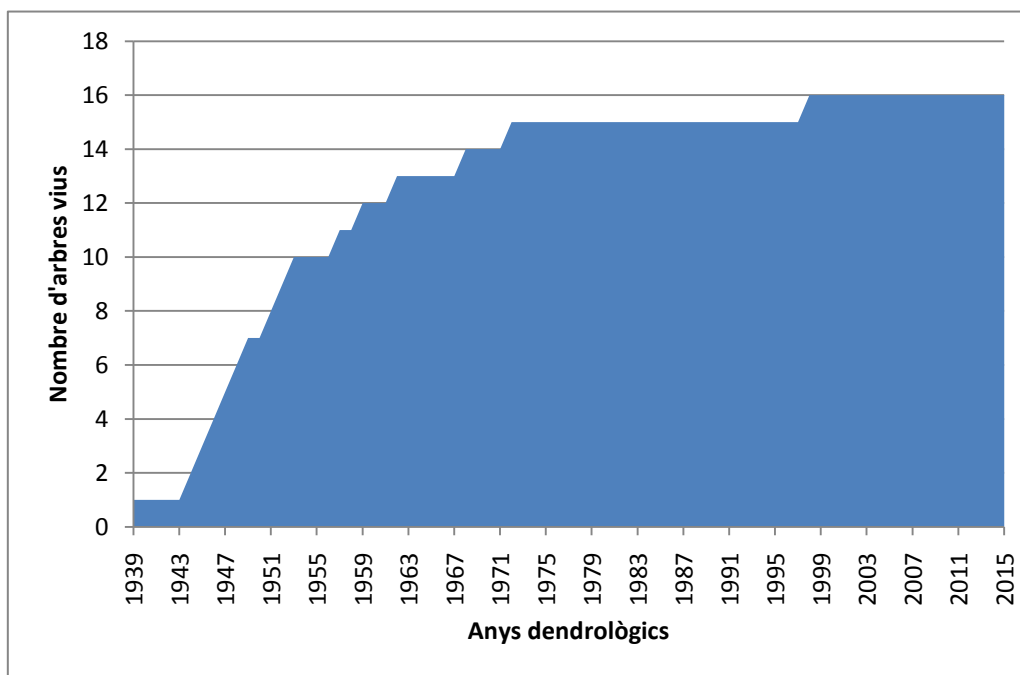


Figura 32. Cronologia dels arbres mostrejats.  
Font pròpia.

Moya Sánchez (2002) diu que si la resposta d'un arbre és clara, però no disposem de cap altre igual d'antic amb què es pugui correlacionar, aquesta dada no podrà ser concloent. Per tant, considerarem tres arbres el mínim nombre de membres anuals a partir dels quals els resultats seran considerats.

Tot seguit es mostrarà una síntesi de les respostes observades en els arbres inclinats del moviment. Considerem dues respostes diferents: les sèries d'anells reduïts i la fusta de reacció.



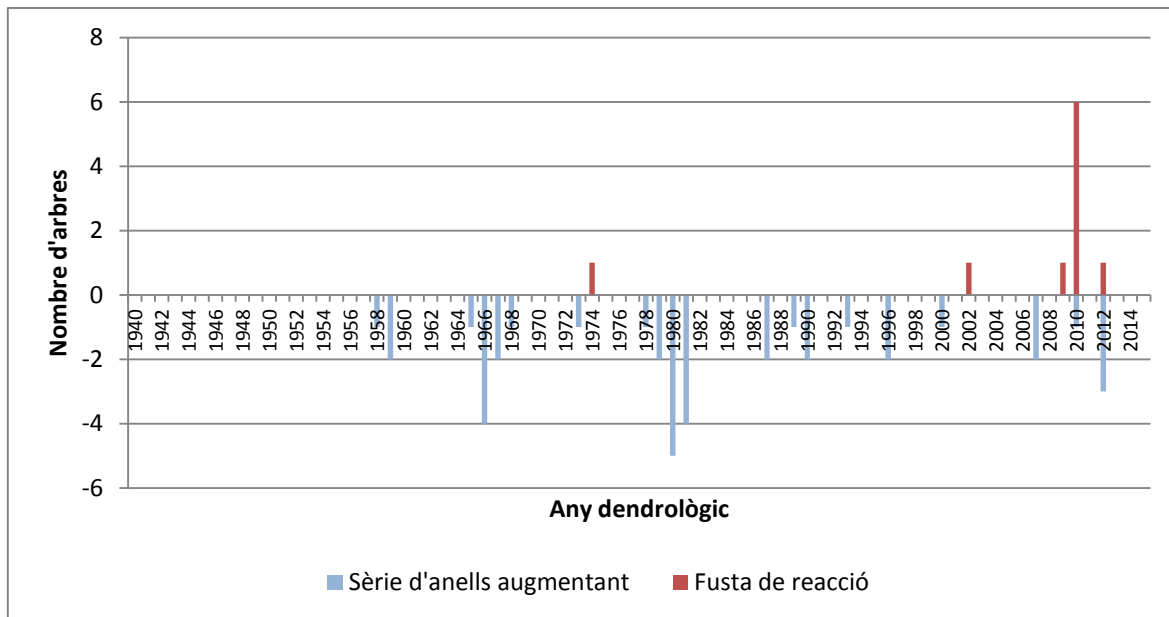


Figura 33. Respostes dels arbres mostrejats a la Font del Bullidor.  
Font pròpia.

#### 4.2.2. Interpretació de l'edat i l'extensió de les reactivacions del moviment.

Per tal d'analitzar les respostes dels arbres mostrejats s'han de tenir en compte alguns aspectes. Les sèries d'anells reduïts poden aparèixer per causes climàtiques o per l'existència de fongs o insectes. Per aquest motiu, en l'estudi de possibles reactivacions s'han tingut en compte només els anys on apareix fusta de reacció.

D'aquesta manera a partir de la figura 33 fem un filtratge i obtenim la gràfica dels períodes de reactivació de la Font del Bullidor:

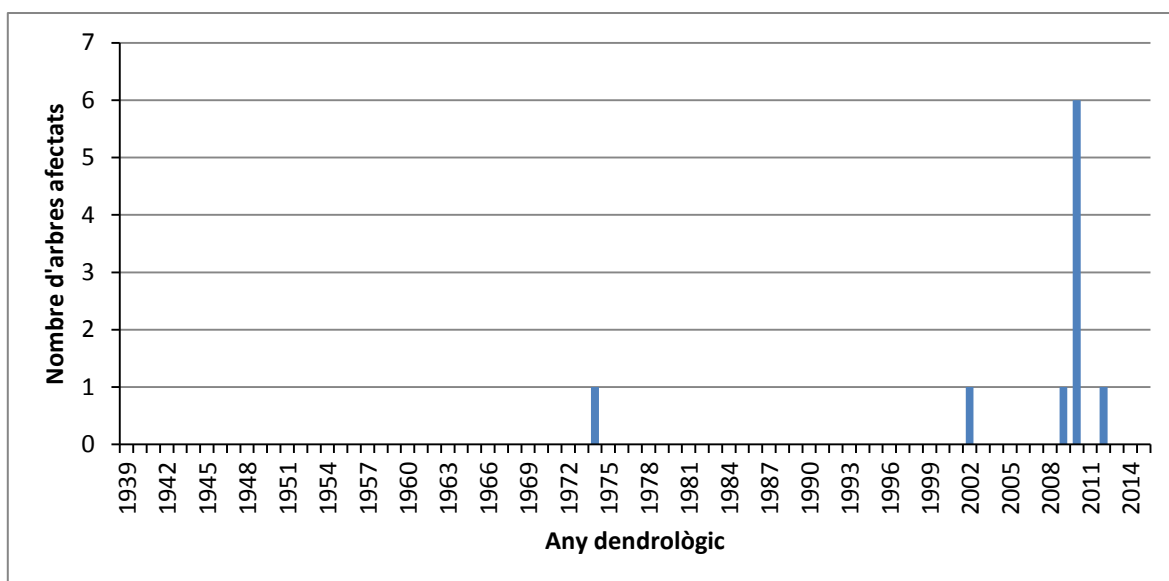


Figura 34. Períodes de reactivació del moviment de la Font del Bullidor.  
Font pròpia.

La interpretació de la figura 34 per obtenir el nombre de reactivacions real requereix unes consideracions. D'una banda, cal tenir en compte que un arbre es pot inclinar de forma individual, per una inestabilització local del terreny per exemple. Per tant, s'ha de definir un nombre mínim d'arbres que s'inclinen a la vegada per acceptar que sigui degut a l'activació de l'esllavissada. En aquest cas considerarem menyspreables respostes que es manifestin en menys de tres arbres. D'altra banda, les respostes que apareixen immediatament posteriors a períodes amb més de tres arbres inclinats poden considerar-se com respostes retardades del mateix episodi.

Per tant, podem deduir una única reactivació l'any 2010. A partir d'aquests resultats no és fàcil obtenir un període de retorn fiable, ja que no existeixen varies reactivacions en els anys d'estudi. Per tal de poder calcular una freqüència de reactivació, considerarem aquest únic moviment entre el 1947 (anys en el qual ja tenim 5 arbres vius que es mostregen) fins a l'actualitat. És evident que en aquesta situació obtindrem una freqüència de reactivació mínima i un període de retorn màxim, fet que no és l'ideal. Tot i això, els valors obtinguts són el resultat que tenim de la datació dendrogeomorfològica, que es mostra a continuació:

Anys de registres	69
Any última reactivació	2010
Nombre de reactivacions	1
<b>Freqüència de reactivació (casos/any)</b>	<b>0.0144927</b>
<b>Període de retorn (anys)</b>	<b>69</b>

Taula 7. Resultats de l'anàlisi dendrogeomorfològica.

## 4.3. ASSAJOS DE LABORATORI

### 4.3.1. Granulometria i sedimentació

Amb la finalitat d'obtenir les corbes granulomètriques de la mostra, s'han dut a terme els assajos granulomètrics adequats: granulometria per tamisat (partícules superiors a 0.075 mm) i sedimentació (partícules inferiors a 0.075 mm). D'aquesta manera obtenim la relació entre l'obertura del tamís i el percentatge de material que pesa per cada un dels tamisos.

Els resultats obtinguts en el material de la Font del Bullidor es mostren a la taula 8 i la seva corba granulomètrica està representada a la figura 35:

Granulometria i sedimentació			
Granulometria	Nº Tamís	Obertura del garbell (mm)	% Pasa
	2 1/2"	63	100
	2"	50	100
	1 1/2"	38,1	100
	1"	25	100
	3/4"	19	100
	1/2"	12,5	99.61
	3/8"	9,5	99.27
	Nº 4	4,75	98.65
	Nº 10	2	97.43
	Nº 16	1,18	96.25
	Nº 40	0,425	92.57
	Nº 100	0,15	88.67
	Nº 200	0,075	86.57
Sedimentació	Temps (h:mm:ss)	Mida (mm)	%Pasa
	0:01:00	0.041599	83.16
	0:04:02	0.020713	75.75
	1:04:27	0.005181	54.16
	6:42:48	0.002072	39.75

Taula 8. Resultats de l'assaig granulomètric i de sedimentació.

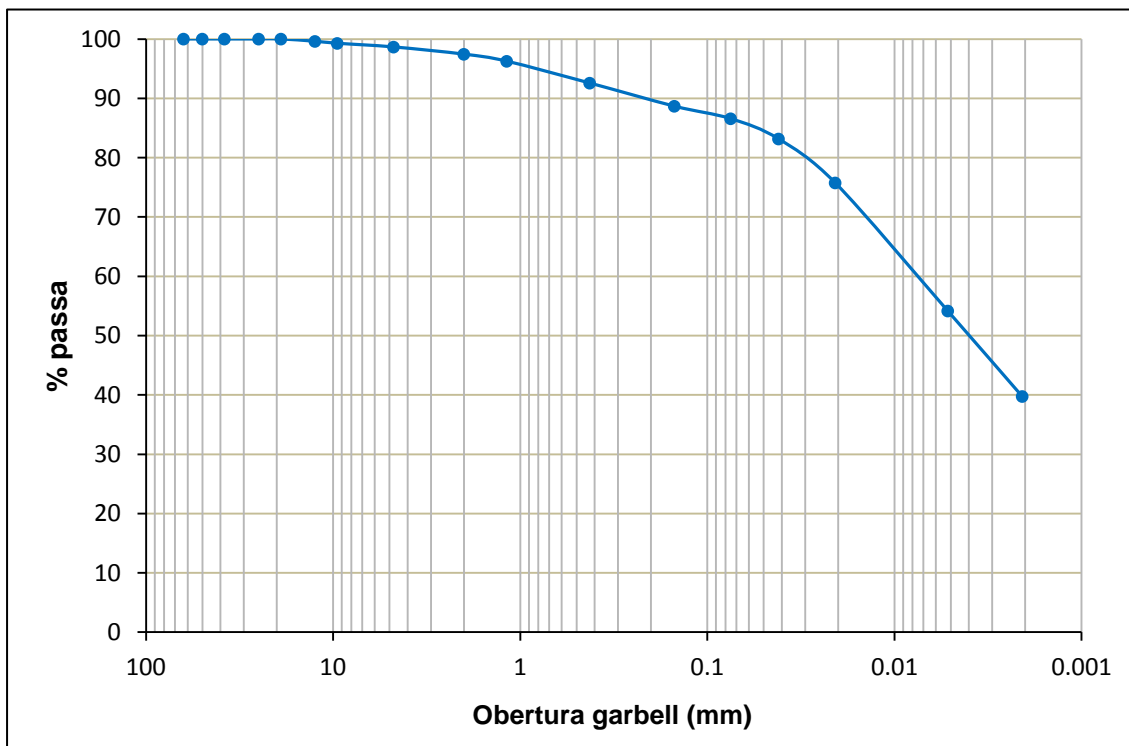


Figura 35. Corba granulomètrica del material de la Font del Bullidor.

La mostra extreta a l'esllavissada de terres té una composició en la que predominen llims i argiles. La composició aproximada és d'un 54% d'argiles, un 30% de llims i un 13% de sorres.

### 4.3.2. Límits d'Atterberg. Índex de plasticitat.

A continuació es mostren les dades obtingudes al laboratori, a partir de l'assaig amb la Cullera de Casagrande:

Dades	ASSAIG 1	ASSAIG 2	ASSAIG 3
<b>Nº de cops</b>	38	33	18
<b>Referència Tara</b>	39	45	L5
<b><math>a=(t+s+a)-(t-s)</math></b>	0.52	0.58	0.69
<b><math>t+s+a</math></b>	14.58	17.56	14.14
<b><math>t+s</math></b>	14.06	16.98	13.45
<b><math>t</math></b>	12.6	15.41	11.74
<b><math>s=(t+s)-t</math></b>	1.46	1.57	1.71
<b><math>w= a/s \cdot 100</math> (%)</b>	35.62	36.94	40.35

Taula 9. Resultats obtinguts de l'assaig del límit líquid.

On  $t$ =tara,  $s$ =sòl,  $a$ =agua i  $w$ =humitat.

Per a poder calcular el límit líquid s'ha d'utilitzar una gràfica amb una línia de tendència estandarditzada. Per determinar el límit líquid es fa passar una paral·lela a la recta ajustada als tres punts obtinguts als assajos. El punt d'aquesta recta ajustada corresponent a 25 cops ens donarà el valor de la humitat del límit líquid. Utilitzant aquest procediment, el límit líquid obtingut és  $\omega_L = 39.68\%$ .

Pel que respecta al càlcul del límit plàstic, a continuació es mostren les dades obtingudes a l'assaig de laboratori.

Dades	ASSAIG 1
<b><math>t+s+a</math></b>	16.78
<b><math>t+s</math></b>	16.17
<b><math>t</math></b>	12.94
<b><math>a</math></b>	0.61
<b><math>s</math></b>	3.23
<b><math>w</math> (%)</b>	18.89

Taula 10. Resultats de l'assaig del límit plàstic.

El límit plàstic obtingut és  $\omega_P = 18.89\%$ .

Un cop coneixem les humitats corresponents al límit líquid i al plàstic, podem calcular l'índex de plasticitat. L'índex es defineix com  $IP = \omega_L - \omega_P$ .

Finalment, a tall de síntesi es mostra una taula amb els resultats dels límits d'Atterberg:

$\omega_L$	$\omega_P$	IP
39.68	18.89	20.79

Taula 11. Límits d'Atterberg i Índex de Plasticitat del material.

A partir dels valors obtinguts del límit líquid i de l'índex de plasticitat es realitza una classificació de Casagrande per sòls, utilitzant el Sistema Unificat de Classificació de Sòls de Casagrande (USCS).

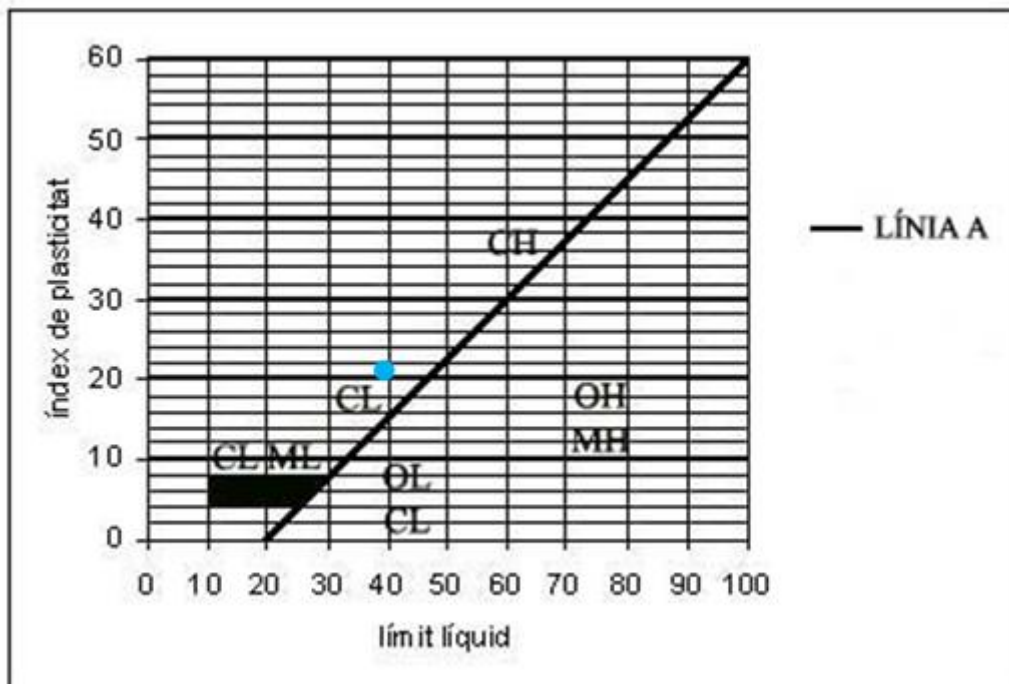


Figura 36. Representació del nostre material al gràfic de la plasticitat de Casagrande.  
Font pròpia.

En la figura 36 s'hi representa un punt que correspon al material assajat. Segons la classificació de Casagrande es tracta d'un material CL, material argilós llimós de baixa a mitja plasticitat.

### 4.3.3. Assaig de tall anular

Primer de tot, cal tenir en compte que s'han utilitzat dues mostres diferents per a la realització de l'assaig. La mostra FBA1, que s'ha assajat a 100 i 200 kPa; i la mostra FBA4, a la que se li han aplicat 50 kPa de tensió normal. La idea inicial era dur a terme amb la mateixa mostra els assajos de 100, 200 i 300 kPa, però quan es van aplicar els 300 kPa la mostra va cedir excessivament. Això és símptoma de què es tracta d'una tensió normal massa gran per al tipus de material remoldejat. De manera que es va retirar la mostra i se'n va preparar una de nova per tal de ser assajada a sota una tensió normal de 50 kPa i així obtenir els tres punts necessaris.

A partir de cada mostra introduïda a l'anell, coneixem una relació entre el volum i el pes amb la qual podem realitzar els càlculs pertinents per trobar el pes específic. Per tant, del motlle obtenim directament les dades següents:

$M_1$  = tara+pes total de la mostra  
 $M_2$  = tara  
 $D_{ext}$  = 10 cm (diàmetre exterior)  
 $D_{int}$  = 7 cm (diàmetre interior)  
 $h$  = 0.5 cm (gruix de la mostra)

Paràmetres	Mostra FBA1	Mostra FBA4
<b><math>M_1</math>: tara+pes total de la mostra</b>	1815.94 kg	1817.74 kg
<b><math>M_2</math>: tara</b>	1772.27 kg	1773.56 kg
<b><math>D_{ext}</math>: diàmetre exterior</b>	10 cm	10 cm
<b><math>D_{int}</math>: diàmetre interior</b>	7 cm	7 cm
<b>H: espessor de la mostra</b>	0.5 cm	0.5 cm
<b>Densitat natural</b>	2.180 g/cm <sup>3</sup>	2.210 g/cm <sup>3</sup>
<b>Pes específic natural</b>	21.39 kN/m <sup>3</sup>	21.64 kN/m <sup>3</sup>

Taula 12. Dades i resultats obtinguts del motlle.

Utilitzant les dades obtingudes del motlle i mitjançant les fórmules que es detallen tot seguit, es presenta el procediment per definir la densitat i el pes específic natural de la mostra:

Mostra FB1:

$$P = M_1 - M_2 = 1815.94 - 1772.27 = 43.67 \text{ kg}$$

$$V = \frac{\pi \cdot h}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = \frac{\pi \cdot h}{4} (10^2 - 7^2) = 20.03 \text{ cm}^3$$

$$\rho_n = \frac{P}{V} = \frac{43.67}{20.03} = 2.180 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (densitat natural)}$$

$$\gamma_n = 2.180 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 21.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \text{ (pes específic natural)}$$

Mostra FB4:

$$P = M_1 - M_2 = 1817.74 - 1773.56 = 44.18 \text{ kg}$$

$$V = \frac{\pi \cdot h}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = \frac{\pi \cdot h}{4} (10^2 - 7^2) = 20.03 \text{ cm}^3$$

$$\rho_n = \frac{P}{V} = \frac{44.18}{20.03} = 2.210 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (densitat natural)}$$

$$\gamma_n = 2.210 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 21.64 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \text{ (pes específic natural)}$$

El tall anular que s'ha dut a terme ha d'estar realitzat amb una humitat del sòl entre el límit líquid i el límit plàstic del material. Amb aquest motiu es fa un control de la

humitat tant de la mostra preparada com de la que es recupera després de l'assaig de tall anular. D'aquesta manera construïm la taula de control següent:

Paràmetres	FBA1		FBA4	
	Prèvia (g)	Final (g)	Prèvia (g)	Final (g)
<b>Dades</b>				
<b>t+s+a</b>	80.86	87.52	31.05	38.15
<b>t+s</b>	76.71	82.99	25.39	35.01
<b>t</b>	61.99	63.32	18.93	20.12
<b>W (%)</b>	28.19	23.03	28.12	21.09

Taula 13. Dades per a l'obtenció de les humitats durant l'assaig de tall anular.

Així, queda comprovat que les humitats estan dins dels rangs requerits pel bon funcionament de l'assaig.

#### 4.3.3.1. Consolidació

Durant els processos de càrrega, amb la intenció de simular les tensions verticals in situ, com durant el procés de tall del mateix assaig, la mostra experimenta una deformació vertical. Aquesta deformació vertical es produeix quan el sòl consolida, és a dir, el volum d'aigua als porus disminueix amb l'aplicació de la càrrega. La disminució d'espessor no es produeix d'igual manera per cada una de les càrregues, sinó que en un primer moment les deformacions són majors i a mesura que l'índex de porus del sòl disminueix, per a càrregues iguals, la deformació també serà menor. Es pot comprovar amb el comportament de la mostra FBA1 en la següent taula:

Mostres	Tensió normal (kPa)	Assentament en consolidació ( $\mu\text{m}$ )	Assentament en fase de tall ( $\mu\text{m}$ )
<b>FBA4</b>	50	440	482
<b>FBA1</b>	100	584	602
	200	96	386

Taula 14. Deformació vertical produïda durant l'assaig de tall anular.

Cal recordar que el temps de consolidació es va estimar suficient en 24 hores. I així ho podem comprovar en les figures 37 i 38, per l'estabilitat que prenen les corbes durant el procés. De la mateixa manera com també es demostra suficient la fase de tall durant 12 hores. No s'ha d'oblidar que un dels principals inconvenients de l'assaig de tall anular és que durant el tall, part del material es perd per les juntes de la cèl·lula i per això s'han d'evitar intervals excessius.

La mostra inicial té un gruix de 5 mm que acaba disminuint notablement. La mostra FBA1, experimenta una reducció del gruix de 1.668 mm. Això suposa una deformació vertical del 33% de la mostra després de ser assajada a 100 i 200kPa. Pel que fa a la mostra FBA4, la deformació vertical és de 0.922 mm el que significa un 18% respecte a l'inici. Veient els resultats de la taula 14, també podem concloure que la deformació vertical sempre és més gran durant la fase de tall.

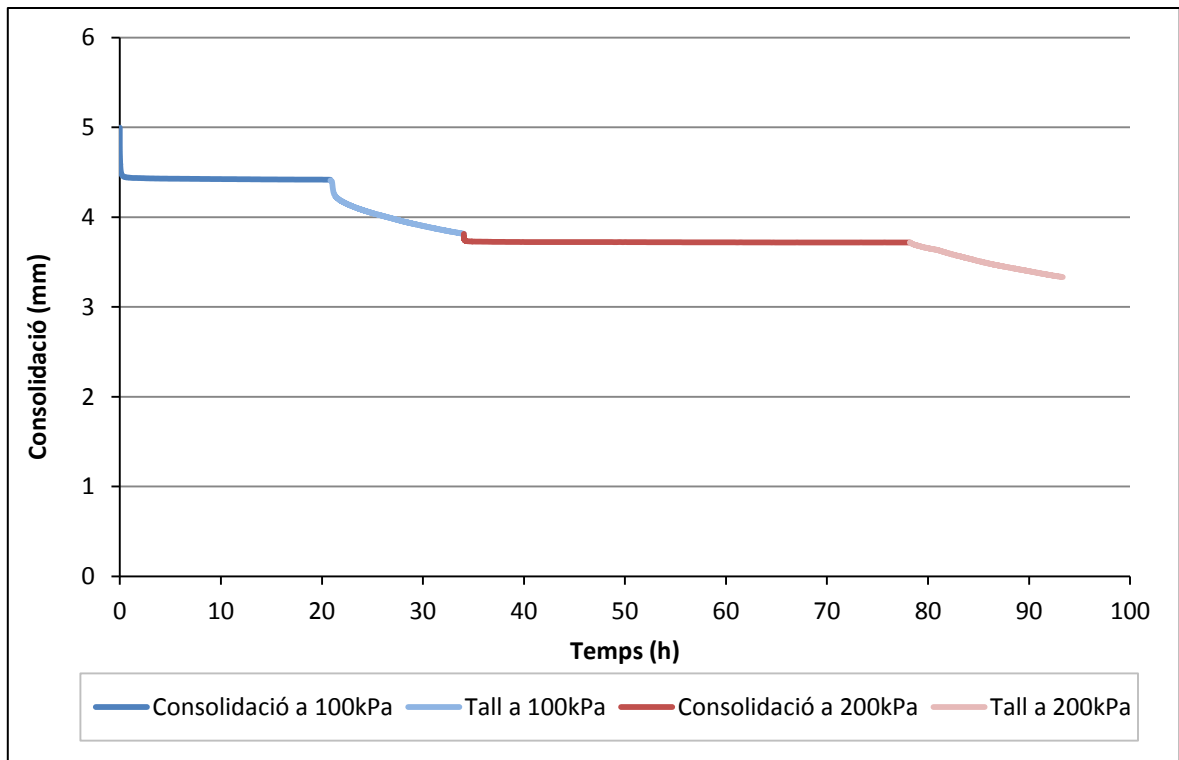


Figura 37. Evolució de la deformació vertical en l'assaig de tall anular a la mostra FBA1.

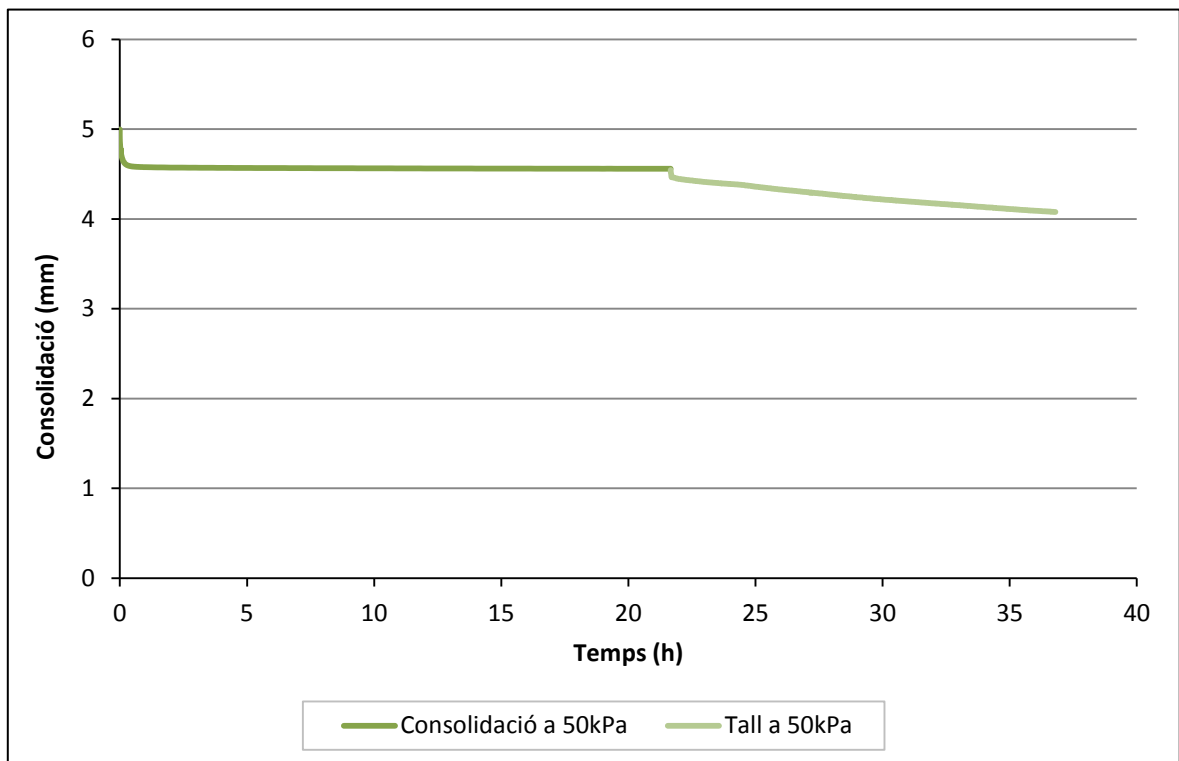


Figura 38. Evolució de la deformació vertical en l'assaig de tall anular a la mostra FBA4.



### 4.3.3.2. Angle de fricció residual

Per tal de calcular l'angle de fricció residual ( $\phi'$ ) es necessiten els valors de la tensió tangencial ( $\tau$ ) i la tensió normal ( $\sigma$ ) de cada assaig. La tensió normal és un valor conegut, ja que és el que nosaltres apliquem mitjançant l'aparell. La tensió tangencial, s'obté mitjançant el tractament de les dades que generen els LVDT connectats a l'aparell, conjuntament amb la velocitat angular que és constant i escollida a priori. A continuació es mostren les gràfiques resultants, de la tensió tangencial respecte al desplaçament angular, per a cadascuna de les càrregues normals aplicades.

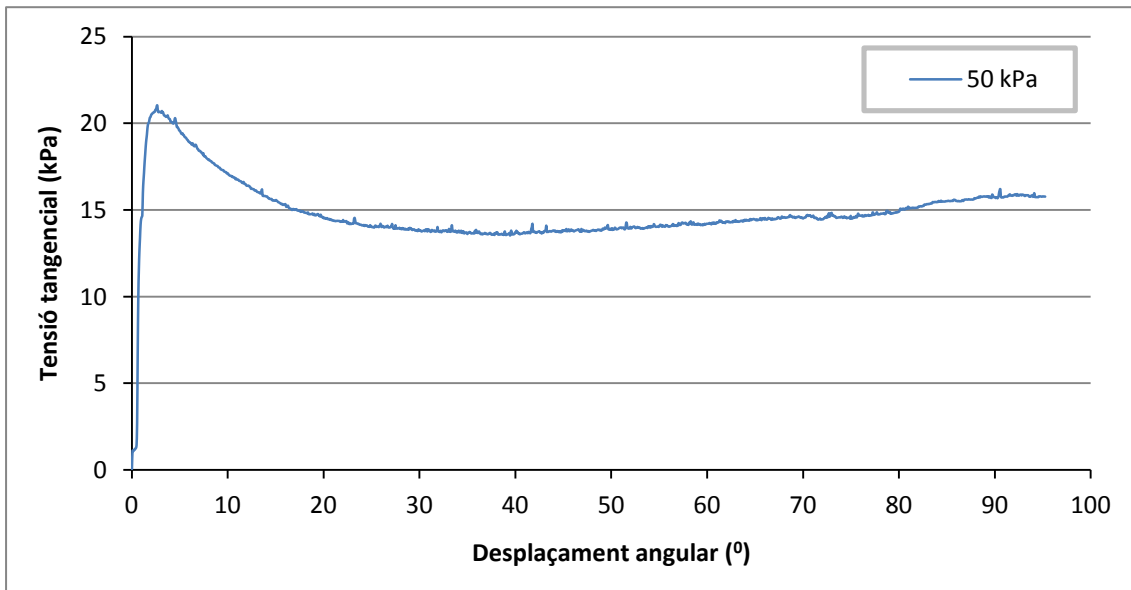


Figura 40. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 50kPa.

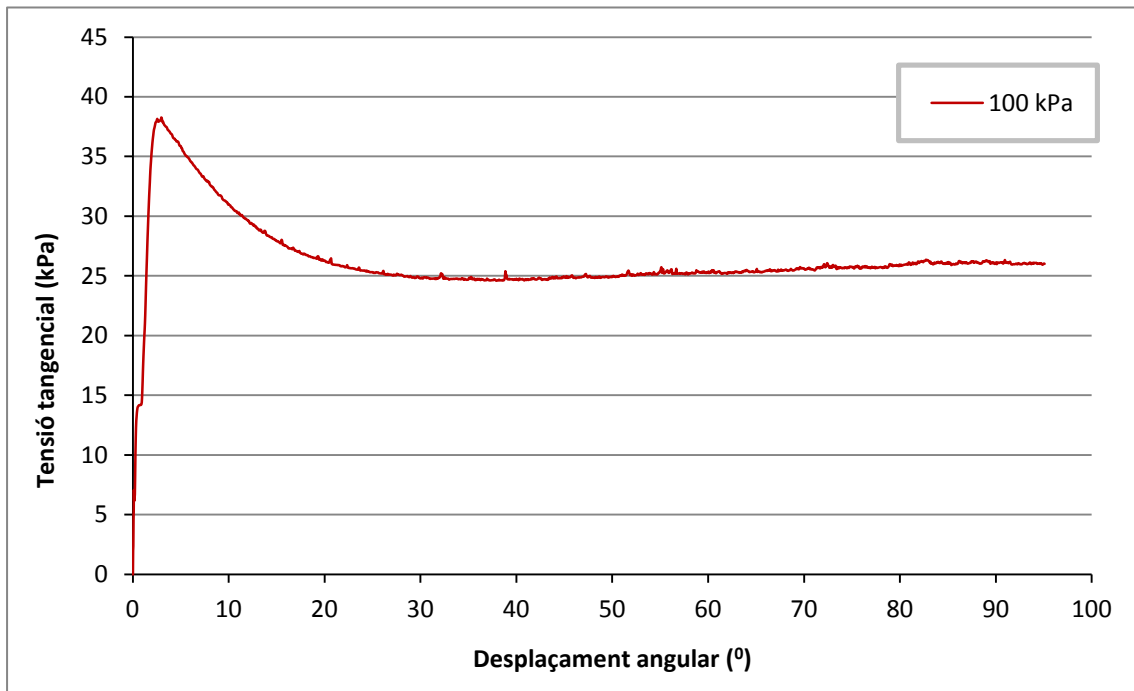


Figura 39. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 100kPa.

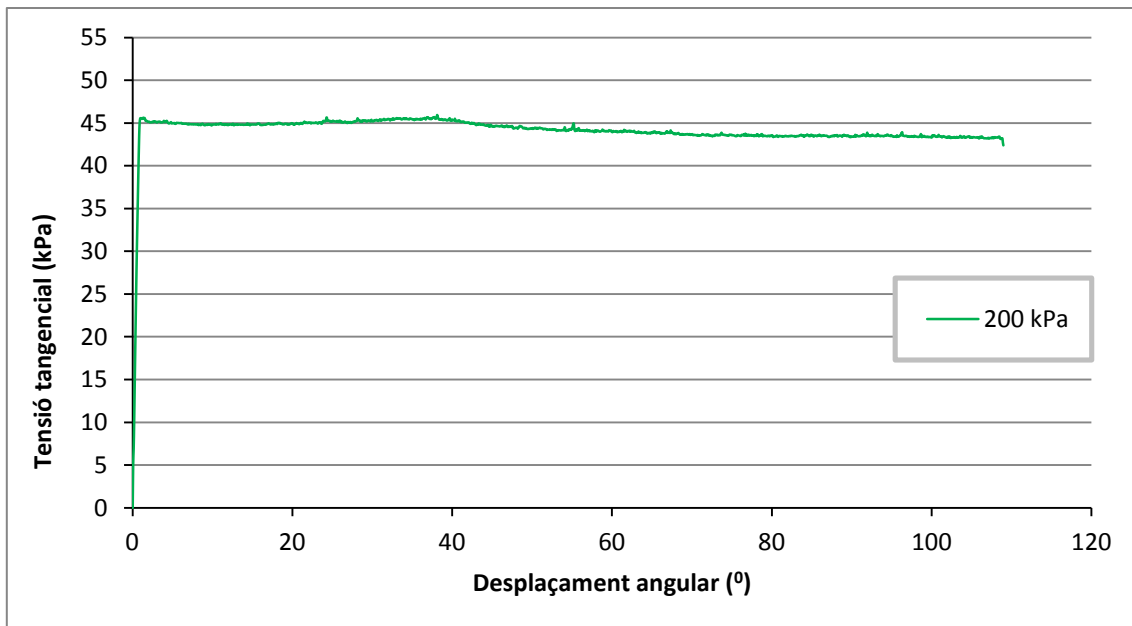


Figura 41. Evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament angular sota una càrrega de 200kPa.

L'angle de fricció residual s'obté en el moment en què els valors de la tensió tangencial s'estabilitzen o assoleixen un mínim. Per tal de conèixer un valor estable representatiu de la tensió tangencial hem establert dos criteris diferents i utilitzats sovint per tal d'obtenir un valor de l'angle de fricció.

- Criteri 1. En primer lloc, s'estableix com a valor representatiu de la tensió tangencial ( $\tau$ ) una mitjana aritmètica dels valors situats a la recta d'estabilització, que apareix en els últims moments de l'assaig. D'aquesta manera, hem tingut en compte per al cicle de 50 kPa els valors de tau compresos entre els desplaçaments angulars de 90 a 95°. En el segon cicle, també els valors entre els 90 i 95°. I en la fase de 300 kPa, entre els desplaçaments angulars de 100 i 108°.
- Criteri 2. En segon lloc, s'adopta com a criteri prendre com a valor representatiu de la tensió tangencial ( $\tau$ ) el punt més baix (el mínim) de la vall que es forma després del pic de tau en els primers moments de l'assaig. En els cicles de càrrega de 50 i 100 kPa, aquest punt mínim es veu molt clar a les figures. És en l'assaig a 200 kPa on costa més distingir-lo tot i que es pot calcular de totes maneres.

Amb aquests valors obtinguts segons el criteri adoptat i amb els corresponents a les seves càrregues es duu a terme una regressió lineal i, seguint el criteri de Mohr-Coulomb, s'obté l'angle de fricció residual. Recordem que sempre s'imposa la cohesió nul·la ( $c'=0$ ).

CRITERI 1		CRITERI 2	
Tensió vertical (kPa)	Tensió Tangencial (kPa)	Tensió vertical (kPa)	Tensió Tangencial (kPa)
50	15.80	50	13.52
100	26.05	100	24.60
200	43.32	200	44.71

Taula 15. Tensions normals i de tall obtingudes amb cada criteri.

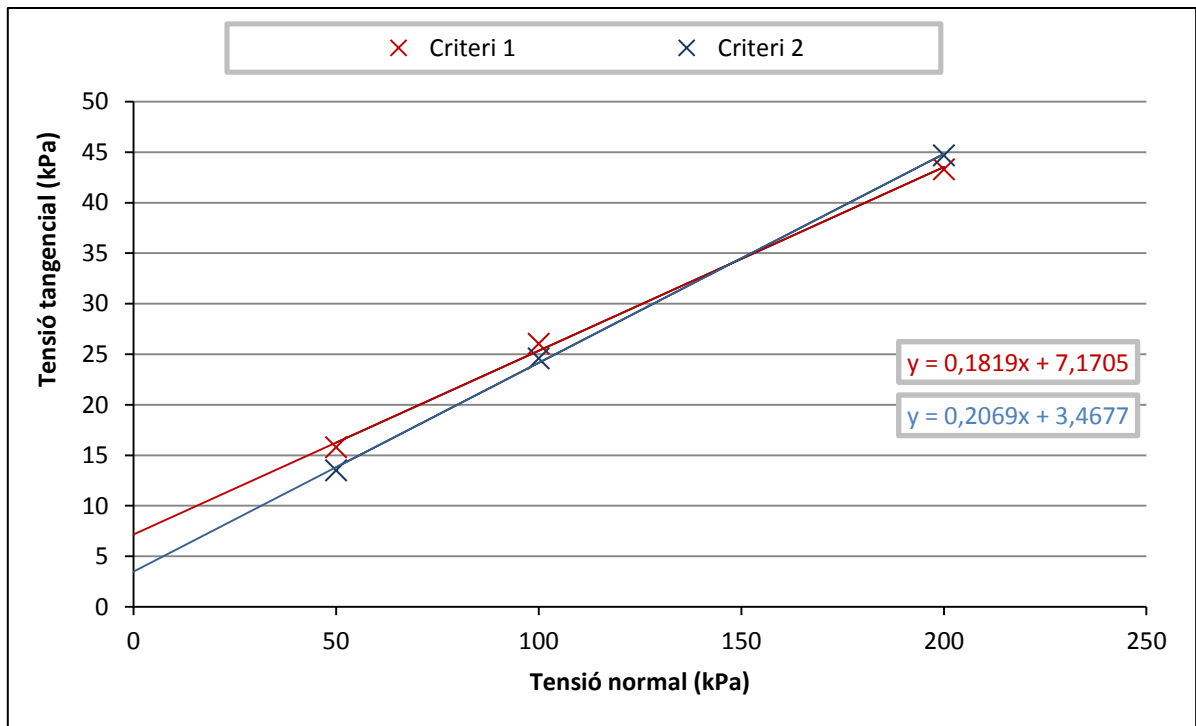


Figura 42. Rectes de Mohr-Coulomb segons els criteris.

Analitzant la figura 42, resulta que segons el criteri de Mohr-Coulomb la cohesió no és nul·la, tot i que ho hauria de ser ja que la mostra assajada està remoldejada. No obstant, la cohesió que ens resulta no és molt elevada i és difícil que ens resulti nul·la en aquest tipus d'assaig. D'aquesta manera, els resultats obtinguts de l'angle de fricció residual i de la cohesió es mostren en la següent taula:

Paràmetres	CRITERI 1	CRITERI 2
$\phi'_{\text{RESIDUAL}} (^{\circ})$	10.31	11.69
$C' \text{ (kPa)}$	7.1705	3.4677

Taula 16. Resultats obtinguts mitjançant el criteri de Mohr-Coulomb.

#### 4.3.4. Assaig de tall directe

En l'assaig de tall directe es duen a terme tres estats de càrrega diferents: 100, 200 i 300 kPa, i per cadascun s'utilitza una mostra diferent del material. Les tres mostres utilitzades s'han denominat FBCD1, FBCD2 i FBCD3.

Abans de començar l'assaig de tall es realitzen una sèrie de mesures amb la finalitat de trobar el pes específic del material. Coneixem les dimensions de l'anell i també el pes de la mostra. Per tant, obtenim directament aquestes dades:

$M_1$  = tara+pes total de la mostra

$M_2$  = tara

$D_{\text{ext}}$  = 10 cm (diàmetre exterior)

$D_{\text{int}} = 7 \text{ cm}$  (diàmetre interior)  
 $h = 0.5 \text{ cm}$  (espessor de la mostra)

Paràmetres	FBCD1	FBCD2	FBCD3
<b>M<sub>1</sub>: tara+pes total de la mostra (g)</b>	1323.05	1325.01	1324.76
<b>M<sub>2</sub>: tara (g)</b>	1177.31	1177.31	1177.31
<b>D: diàmetre mostra (mm)</b>	60	60	60
<b>h: alçada mostra (mm)</b>	25	25	25

Taula 17. Dades obtingudes a partir de l'anell de la mostra.

A partir de les dades anteriors i mitjançant les fórmules que es detallen tot seguit, obtenim el pes específic del nostre sòl:

Mostra FBCD1:

$$P = M_1 - M_2 = 1323.05 - 1177.31 = 145.74 \text{ kg}$$

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 2.5 = 70.68 \text{ cm}^3$$

$$\rho_n = \frac{P}{V} = \frac{145.74}{70.68} = 2.062 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (densitat natural)}$$

$$\gamma_n = 2.062 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 20.226 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \text{ (pes específic natural)}$$

I anàlogament, se segueix el mateix procediment de càlcul per a les mostres FBCD2 i FBCD3. Els resultats obtinguts es resumeixen en la següent taula:

FBCD1	FBCD2	FBCD3
20.226 kN/m <sup>3</sup>	20.497 kN/m <sup>3</sup>	20.404 kN/m <sup>3</sup>

Taula 18. Resultats del pes específic natural de cada mostra assajada.

També de manera prèvia a l'assaig es pren una mesura de la humitat de la mostra, que es compararà amb la humitat final que presenti la mostra que es recupera un cop finalitzat el tall directe. D'aquesta manera es duu a terme un control de la humitat durant l'assaig que es representa en la taula 19:

Paràmetres	FBCD1		FBCD2		FBCD3	
	Prèvia (g)	Final (g)	Prèvia (g)	Final (g)	Prèvia (g)	Final (g)
<b>Dades</b>						
<b>t+s+a</b>	116.41	87.66	120.99	90.33	92.66	120.47
<b>t+s</b>	101.27	81.54	112.67	84.72	81.47	113.87
<b>t</b>	25.25	54.68	69.68	57.09	25.29	80.61
<b>W (%)</b>	19.92	22.78	19.35	21.07	19.92	19.84

Taula 19. Dades per al control d'humitat en les mostres durant l'assaig de tall directe.

#### 4.3.4.1. Consolidació

De la mateixa manera que en l'assaig de tall anular, en l'assaig de tall directe la mostra experimenta una deformació vertical deguda a les tensions normals que se li apliquen durant el procés per tal de simular les tensions verticals que el terreny rep en el seu estat natural. Aquesta deformació vertical es produeix quan el sòl consolida, és a dir, el volum d'aigua als porus disminueix amb l'aplicació de la càrrega. Tot seguit es detalla el comportament de la deformació vertical per a cada tensió normal i per a les dues fases de cada assaig:

Mostra	Tensió normal (kPa)	Assentament en consolidació ( $\mu\text{m}$ )	Assentament en fase de tall ( $\mu\text{m}$ )
FBCD1	100	1980	330
FBCD2	200	2775	582
FBCD3	300	2852	363

Taula 20. Deformació vertical produïda durant l'assaig de tall directe.

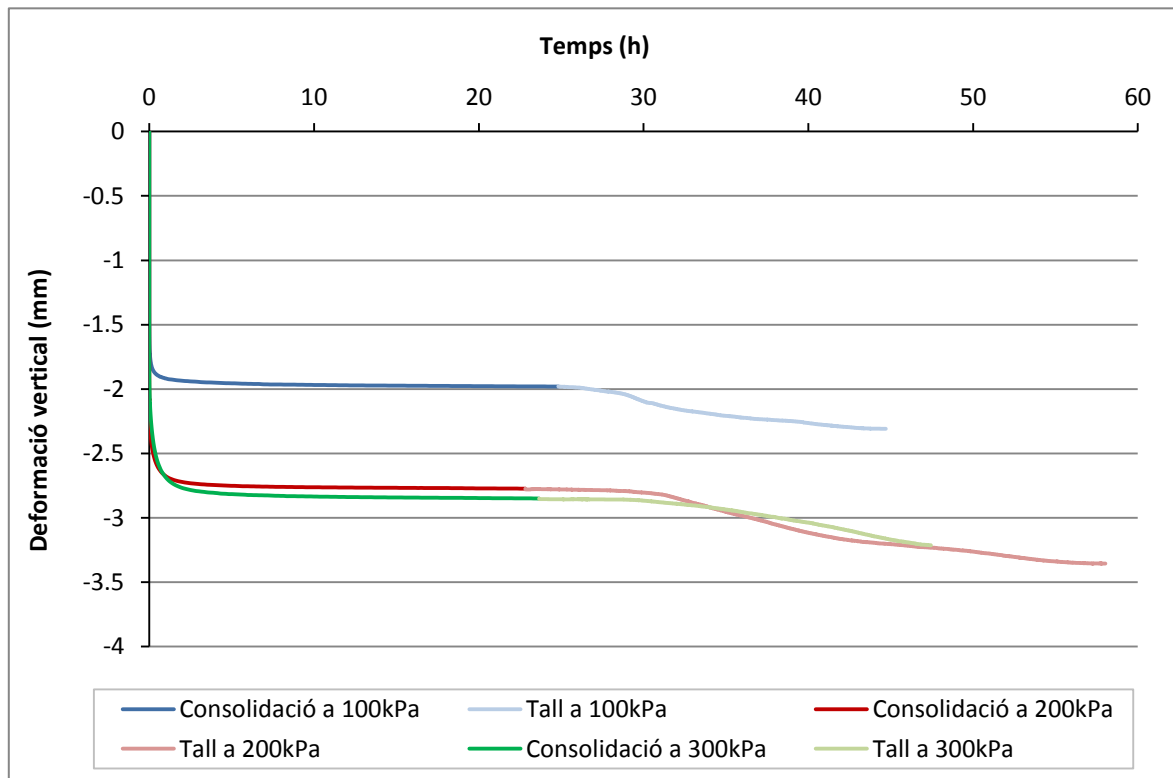


Figura 43. Evolució de la deformació vertical en el temps durant l'assaig de tall directe.

Amb els resultats de la taula 20 i les gràfiques anteriors, podem veure que l'assentament vertical més pronunciat es produeix en particular just a l'inici de l'aplicació de la càrrega normal que coincideix amb l'inici de l'assaig. Així, la deformació arriba a uns primers valors que s'estabilitzen fins ben entrada la fase de tall on podem veure que es torna a reactivar. En aquest moment, però, la deformació vertical és molt més lenta que al començament de l'assaig (es veu clarament amb els pendents).

Cal recordar que el temps de consolidació es va estimar suficient en 24 hores. I així ho podem comprovar als gràfics, per l'estabilitat que prenen les corbes durant el procés. D'altra banda, durant la fase de tall (24 hores més) la deformació vertical no acaba d'estabilitzar-se i té tendència a seguir augmentant lentament.

#### 4.3.4.2. Angle de fricció residual

Per tal de calcular l'angle de fricció residual ( $\phi'$ ) es necessiten els valors de la tensió tangencial ( $\tau$ ) i la tensió normal ( $\sigma$ ) de cada assaig. La tensió normal de cada assaig ja és coneguda i la tensió tangencial s'ha de calcular amb les dades que proporciona l'assaig. El procediment i la formulació que se segueix està detallat a l'apartat 3 de metodologia. A continuació es mostra la gràfica que reflecteix l'evolució de la tensió de tall en funció del desplaçament horitzontal, un cop iniciada la fase de tall per cada cas.

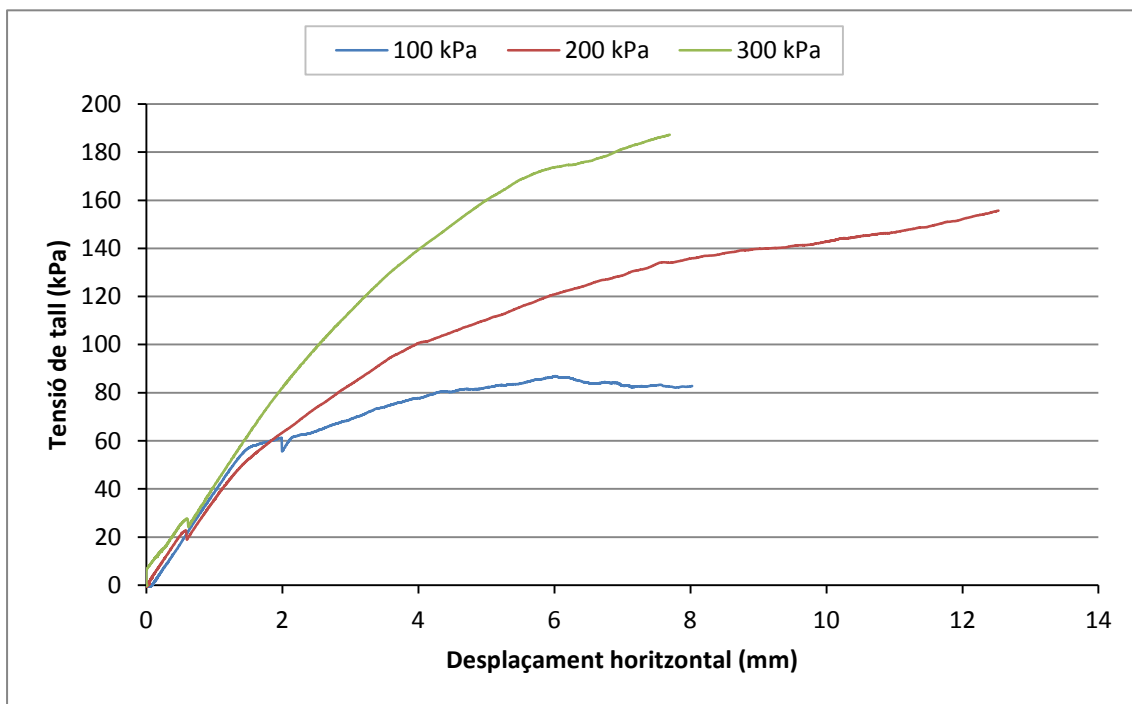


Figura 44. Evolució de les tensions tangencials dels tres assaigs de tall directe a diferents tensions normals.

Les corbes obtingudes no concorden amb els resultats típics d'un assaig de tall directe. La tensió de tall hauria d'augmentar fins a cert punt on es produeix el trencament de la mostra i es forma la superfície de trencament. A partir d'aquest punt la resistència al tall ha de baixar generant un pic (obtidríem l'angle de fricció pic) i després estabilitzar-se (obtidríem l'angle de fricció residual).

Tot i que el trencament s'ha experimentat en totes les mostres durant l'assaig, aquest no s'ha plasmat en l'evolució de la tensió de tall. Si observem la forma que prenen les gràfiques, veiem que per a 200 i 300 kPa no obtenim valors estables de tau ( $\tau$ ), ja que les corbes tenen tendència a seguir augmentant, com si no haguessin assolit encara el

punt màxim. En canvi, per l'assaig a 100kPa es pot intuir una mica la forma esperada, però tampoc de forma molt clara. Per tant, no és raonable la forma que prenen els resultats tenint en compte que l'assaig es va dur a terme amb el tècnic de laboratori i seguint el procediment adequat.

En aquesta situació és impossible extreure dels resultats el valor residual de l'angle de fricció del material. No obstant això, es pot obtenir un valor una mica condicionat de la resistència residual pic. Per a 200 i 300 kPa la tensió tangencial que es tria segons el següent criteri: s'agafa el valor final de tau, que alhora és el més gran. Se sap que aquest criteri no és l'adequat perquè encara no s'ha format un pic però s'utilitza per a poder obtenir un angle de fricció pic de l'assaig i obtenir un resultat. Els valors adoptats en cada cas es detallen en la taula:

Tensió vertical (kPa)	Tensió Tangencial (kPa)
100	86
200	155
300	187

Taula 21. Valors de les tensions obtinguts en l'assaig de tall directe.

Amb aquests valors obtinguts segons el criteri adoptat es duu a terme una regressió lineal i, seguint el criteri de Mohr-Coulomb, s'obté l'angle de fricció pic.

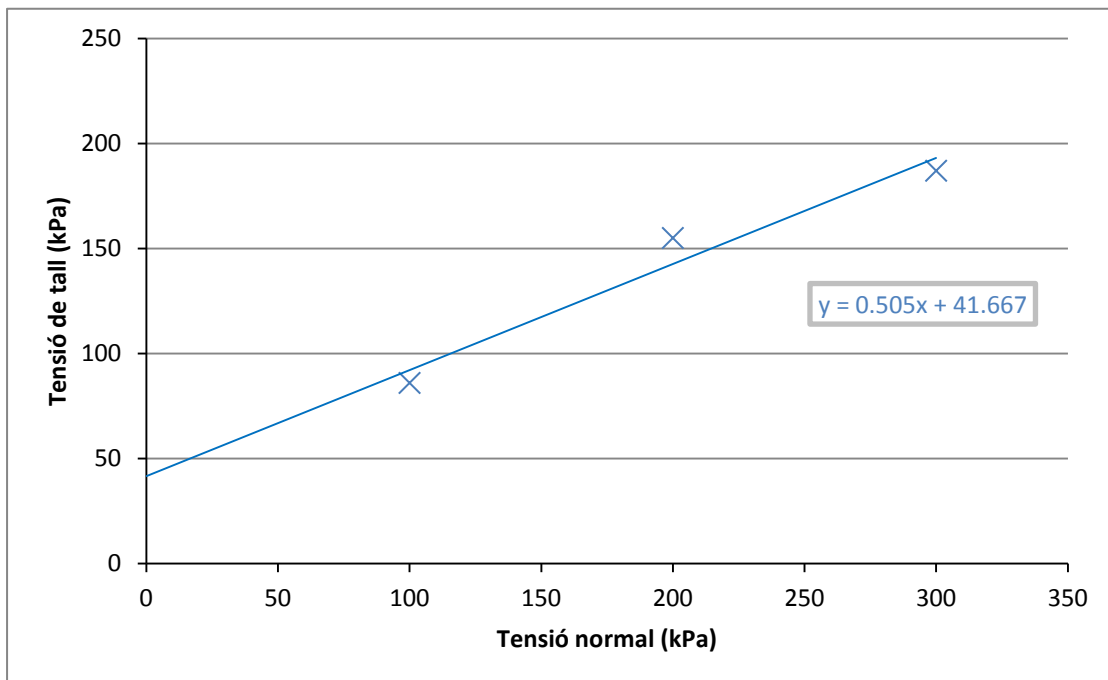


Figura 45. Recta de Mohr-Coulomb obtinguda en l'assaig de tall directe per al material de la Font del Bullidor.

$\phi'_{PIC}$ (°)	$c'$ (kPa)
26.79	41.667

Taula 22. Resultats de l'assaig de tall directe.

L'assaig de tall directe s'ha dut a terme, ja que és una altra manera d'acotar l'angle de fricció residual del material obtingut al tall anular. Tanmateix, ja hem vist que amb els resultats que tenim només hem pogut obtenir i de manera força condicionada un angle de fricció pic i una cohesió. Els valors pic no ens interessen per l'anàlisi d'estabilitat, ja que un cop es forma la superfície de trencament la cohesió es torna nul·la i l'angle de fricció és el residual. Tot i això, són uns resultats pic que podrien ser normals pel tipus de material encara que la corba no experimenta el pic en les tensions de tall esperat després de la ruptura.

#### 4.4. CÀLCUL D'ESTABILITAT

En aquest apartat es pretén valorar, a partir dels càlculs d'estabilitat realitzats amb el programa Slope W, quina és la influència de la variació de certs paràmetres o condicions de contorn sobre l'estabilitat d'un vessant. Concretament, s'estudia la influència de la variació de l'angle de fricció residual, de la variació del nivell freàtic i de la profunditat de la superfície de trencament.

Les diferents posicions del nivell freàtic (material sec, semi-saturat i saturat) i les profunditats de la superfície de trencament (4, 7.5 i 10m) ja s'havien fixat a l'apartat de metodologia.

Pel que fa al rang de variabilitat en l'angle de fricció residual s'ha fixat ara tenint en compte els resultats de l'assaig de tall anular. D'aquesta manera, l'angle de fricció varia de 9 a 16°, en intervals de mig grau.

Per tant, per a cada superfície de trencament es valoraren tres nivells freàtics diferents, i cadascun d'ells en un rang de catorze angles de fricció diferents. L'anàlisi ens proporciona un total de 126 combinacions diferents.



Sup. Tr.	NF	Cond.	Angle de fricció residual (°)														
			9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16
10	10	sec	0.605	0.639	0.673	0.707	0.742	0.777	0.811	0.846	0.881	0.916	0.952	0.987	1.023	1.059	1.094
	5	semi	0.467	0.493	0.519	0.546	0.573	0.599	0.626	0.653	0.68	0.707	0.734	0.762	0.789	0.817	0.845
	0	sat	0.323	0.342	0.36	0.378	0.397	0.415	0.434	0.452	0.471	0.49	0.509	0.528	0.547	0.566	0.584
7.5	7.5	sec	0.602	0.636	0.67	0.704	0.738	0.773	0.808	0.842	0.877	0.912	0.947	0.983	1.018	1.054	1.089
	3	semi	0.422	0.444	0.473	0.494	0.518	0.542	0.567	0.591	0.616	0.64	0.665	0.69	0.714	0.739	0.765
	0	sat	0.33	0.349	0.368	0.387	0.405	0.424	0.442	0.461	0.480	0.498	0.517	0.535	0.554	0.572	0.591
4	5	sec	0.628	0.664	0.7	0.735	0.771	0.799	0.835	0.869	0.905	0.941	0.978	1.014	1.051	1.087	1.124
	3	semi	0.515	0.544	0.573	0.603	0.632	0.662	0.691	0.721	0.751	0.781	0.811	0.841	0.871	0.902	0.932
	0	sat	0.338	0.357	0.376	0.394	0.413	0.432	0.451	0.470	0.488	0.507	0.526	0.545	0.563	0.582	0.601

Taula 23. Factors de seguretat obtinguts amb el programa Slope W en l'anàlisi d'estabilitat del moviment.

**Sup. Tr.** = Superfície de trencament. Tres superfícies de trencament diferents de 10, 7.5 i 4 metres de profunditat mitjana.

**NF** = Nivell freàtic. Per cada cas, tenim les tres profunditats mitjanes del nivell freàtic aplicades (en metres).

**Cond.** = Condicions del terreny del moviment. Segons la profunditat del nivell freàtic en cada cas estarem en condicions saturades (nivell freàtic en superfície), semi-saturades (nivell freàtic entre la superfície de trencament i la del terreny) o seques (nivell freàtic per sota la superfície de trencament).

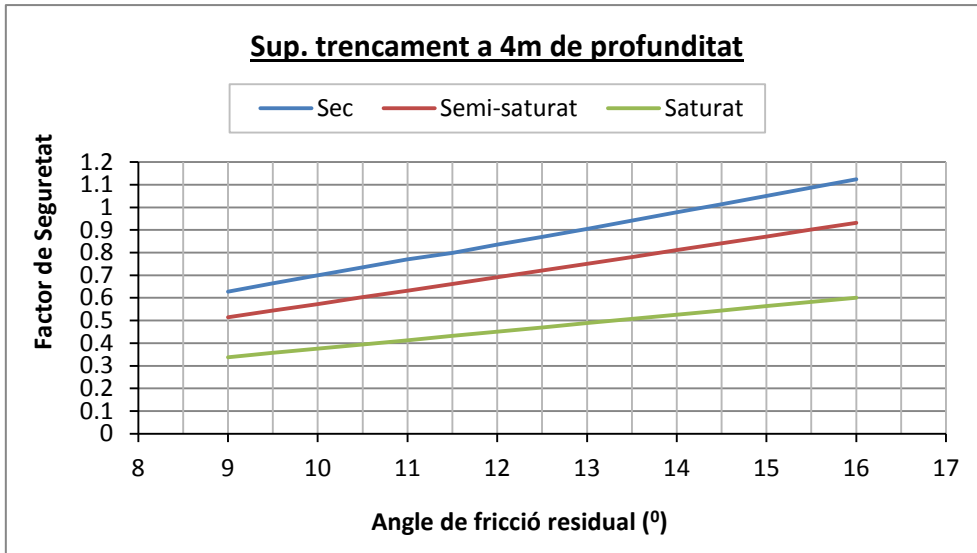


Figura 46. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 4m de profunditat mitjana.

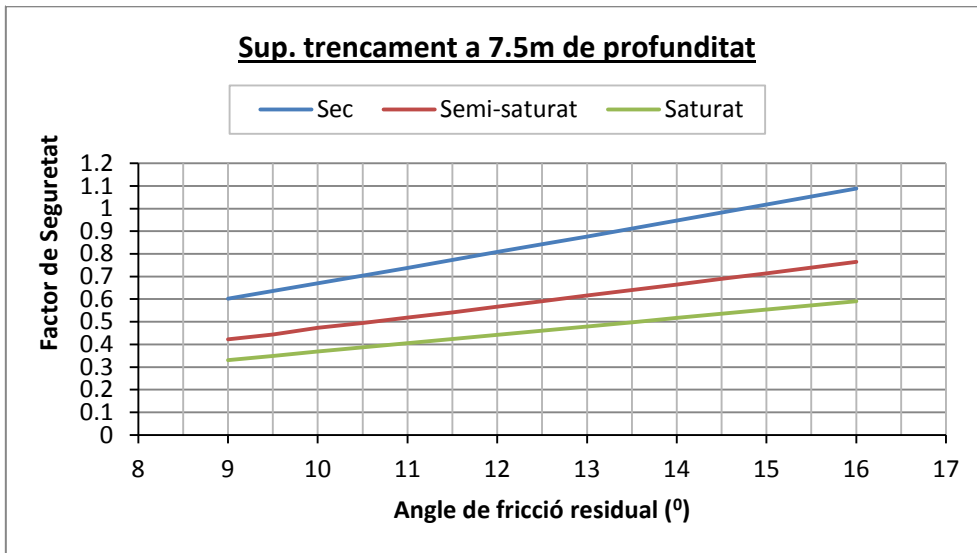


Figura 47. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 7.5m de profunditat mitjana.

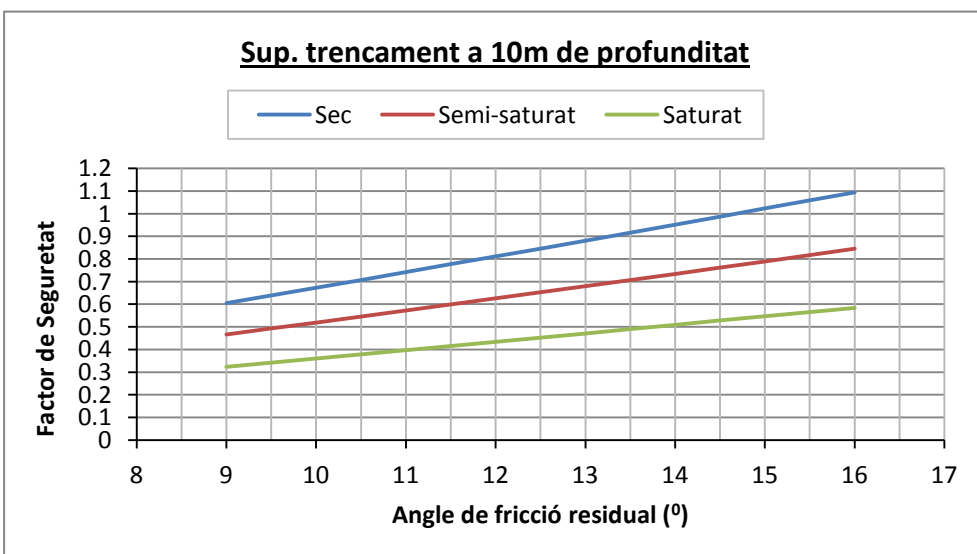


Figura 48. Variació del FS en funció de l'angle de fricció residual i la condició del nivell freàtic, per una superfície de trencament a 10m de profunditat mitjana.

Analitzant els resultats de les figures 46, 47 i 48 per cadascuna de les tres profunditats de la superfície de lliscament en podem extreure les següents dades.

- Per una banda, la tendència ascendent de les línies mostra un augment del valor de  $FS$  a mesura que augmenta el valor de l'angle de fricció residual. Per tant, a major angle de fricció major resistència al tall presenta el material.
- Per l'altra banda, en cada figura també es mostra com un augment de la presència d'aigua a la zona d'esllavissada implica una disminució del valor del Factor de Seguretat. Així doncs, contra més saturat es troba el terreny, més baix és el seu factor de seguretat i més inestable es comporta. En condicions seques és on obtenim els factors de seguretat més alts.

Pel que correspon a la profunditat de la superfície de trencament, es pot comprovar que influeix relativament poc en el factor de seguretat. Els valors del  $FS$  són gairebé els mateixos per les tres profunditats i no suposarien un gran canvi en el comportament del vessant.

Amb aquests comentaris anteriors es pot parlar de l'anàlisi de sensibilitat. Una de les conclusions principals és que la profunditat de la superfície de trencament influeix molt poc en el factor de seguretat. També es demostra que tant l'angle de fricció residual com la posició del nivell freàtic són els paràmetres clau que afecten el factor de seguretat. Per tant, per a una anàlisi d'estabilitat realista, el més important seria poder obtenir un angle de fricció residual fiable al laboratori i caracteritzar el nivell freàtic amb sondejos per col·locar piezòmetres.

Si interpretem també els valors obtinguts en la taula 23 de totes les combinacions, es fa evident que obtenim factors de seguretat força baixos. La majoria esdevenen inferiors a la unitat. Això implica que els casos principalment els estudiats per aquest moviment es defineixen inestables amb les hipòtesis considerades.

Segons els resultats, el material de la Font del Bullidor només es comença a comportar de forma estable ( $FS > 1$ ) per valors de l'angle de fregament a partir de  $15^\circ$ . I això en condicions seques. En condicions saturades s'haurien de donar angles de fricció de  $20^\circ$  o més per a l'estabilitat del vessant.

La inestabilitat del vessant que indiquen els nostres resultats no es considera representativa de la realitat del moviment. Caldrà discutir el perquè d'aquests resultats i la incongruència que presenten respecte de la realitat.

## 4.5. COMPARACIÓ DE LA FREQÜÈNCIA DE REACTIVACIÓ I DEL GRAU D'ESTABILITAT AMB ALTRES MOVIMENTS

La zona alta de la conca del Llobregat a l'alt Berguedà és una zona força activa pel que fa a moviments de vessant, en bona part degut als tipus de materials que hi afloren. L'estudi del lliscament translacional de la Font del Bullidor es tracta d'un cas que pretén ajudar a extreure conclusions a escala regional.

Els resultats obtinguts en la freqüència de reactivació i el grau d'estabilitat de la Font del Bullidor, es compararan amb quatre moviments de la mateixa zona. Aquests moviments ja han estat registrats i estudiats en tesines anteriors i l'objectiu és posar tots els resultats en comú. Així doncs, compararem els moviments de vessant de La Nou, Can Pujals i Malanyeu (Jímenez i Llobet, 2006), el del Torrent de l'Albiol (Pere Ribas, 2014) i el de la Font del Bullidor.

Jiménez i Llobet (2006) va analitzar tres moviments propers del tipus colada de terra de la conca del riu Llobregat. Es troben situats a pocs quilòmetres cap a l'est de distància del moviment de la Font del Bullidor. I són moviments que s'han generat en materials lutítics del Garumnà.

Pere Ribas (2014) va estudiar el moviment del Torrent de l'Albiol de Guardiola de Berguedà, que ha patit mobilitzacions de massa de flux del tipus colada de terra. També són fenòmens propers geogràficament, però en aquest cas el moviment es dona en materials del Keuper.

Així doncs, recopilem en la taula següent els paràmetres característics de tots els moviments estudiats al Berguedà:

	Font del Bullidor	La Nou	Can Pujals	Malanyeu	Torrent de l'Albiol	
<b>Anys de reactivacions</b>	2010	1962 1971 1977 1980 1982 1985-86 1987	1962 1971 1974 1976 1982	1976-77 1978-79 1982-83	1975-76 1978-79	
<b>Anys de registre</b>	69	60	60	80	52	
<b>Freqüència de reactivació</b>	0.014 casos/any	0.19 casos/any	0.11 casos/any	0.1 casos/any	0.054 casos/any	
<b>Període de retorn</b>	69 anys	5.4 anys	8.6 anys	9.6 anys	18.5 anys	
<b>Angle de fricció</b>	9°-16°	11°-15°	11°-15°	11°-15°	18.83°	
<b>Factor de seguretat</b>	Condició saturada	0.34-0.63	0.38-0.52	0.46-0.63	0.55-0.76	0.734
	Condició seca	0.61-1.12	0.65-0.9	0.9-1.24	1.08-1.49	1.308

Taula 24. Resum de les característiques principals de les inestabilitats del Berguedà.

La millor manera d'interpretar tots aquests resultats és representant-los tots junts en un gràfic. Per cada moviment, s'ha decidit que l'angle de fricció residual que s'utilitza és el més estable dels estudiats. D'aquesta manera: Font del Bullidor (16°), La Nou (15°), Can Pujals (15°), Malanyeu (15°) i Torrent de l'Albiol (18.83°). El nivell freàtic es considera en les dues situacions límit: sobre la superfície del terreny (condició saturada) i sota la superfície de trencament (condició seca). Per la seva banda, la profunditat de la superfície de lliscament considerada en el cas de la Font del Bullidor és de 4 metres, la més estable tot i que les més profundes tampoc feien variar massa el factor de seguretat.

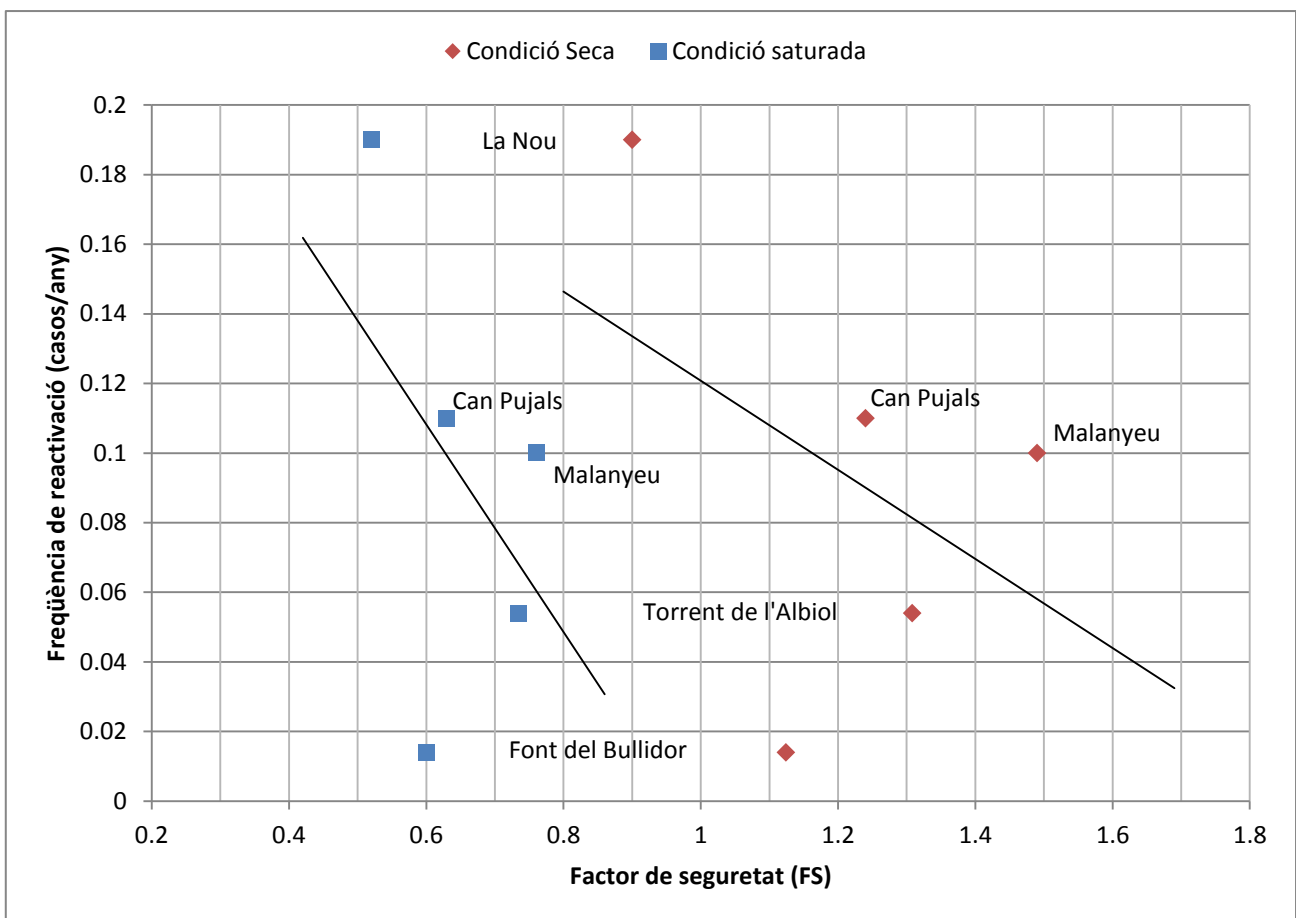


Figura 49. Comparació del Factor de Seguretat i la Freqüència de Reactivació dels moviments estudiats al Berguedà.

A la introducció s'ha comentat que s'esperava que per a valors del factor de seguretat alts, la freqüència de reactivació fos menor, ja que el moviment hauria de ser més estable. Veient el gràfic, la varietat dels resultats és força gran i sembla difícil establir conclusions a mode general. Tot i això, les línies de tendència es comporten de la manera esperada: un moviment de vessant és més estable (major FS) contra més baixa és la freqüència de reactivació.

Si tractem de comparar els resultats dos a dos, aquesta hipòtesi anterior ja no es compleix en alguns casos: Can Pujals-Font del Bullidor o Malanyeu-Torrent de l'Albiol,

per exemple. En aquests casos, esllavissades amb menors freqüències de reactivació són menys estables. Semblen resultats no massa coherents, si ho mirem així.

Aquesta comparació de freqüències de reactivació i factors de seguretat no permet extreure conclusions raonables a causa del conjunt d'incerteses que tenim. En el cas de la Font del Bullidor, s'han de tenir clares les limitacions del resultat que se'ns presenta per a poder quines han estat les incerteses que han afectat.

Per començar, vistos els resultats del laboratori es desconeix l'angle de fricció residual real del material, ja que hem obtingut un valor molt baix i és molt possible que sigui superior a aquest. També cal tenir en compte el fet que la freqüència de reactivació que s'ha calculat és mínima. Podria ser més gran, ja que en les esllavissades translacionals existeixen reactivacions que deformen poc la superfície del terreny i no afecten els arbres. I per últim, la profunditat de la superfície de trencament que tot i que no influeix massa en els resultats, s'ha considerat de forma aproximada.

## 5. CONCLUSIONS

---

L'estudi del lliscament translacional de la Font del Bullidor, ens ha proporcionat una sèrie de resultats que és convenient entendre i interpretar més enllà del que ja s'ha fet anteriorment. En aquest apartat, es duu a terme la feina més important de tota la tesina: analitzar les dades obtingudes amb criteri crític i, tenint en compte la realitat del moviment, plasmar quines han estat les coses apreses durant aquest treball i proposar millores amb l'objectiu d'obtenir resultats més fiables.

Els resultats del treball han estat condicionats per la varietat d'incerteses que es presenten en l'anàlisi i s'ha de tenir clares les limitacions que això suposa:

- Angle de fricció residual. Els resultats dels assajos de laboratori no sempre són representatius de la realitat i aquest problema ja s'ha experimentat en altres estudis d'esllavissades del mateix tipus de material, les argiles del Garumnià. L'angle de fricció residual real del material es desconeix, ja que hem obtingut en l'assaig de tall anular valors massa baixos ( $10.3^\circ$  i  $11.7^\circ$ ), incompatibles amb la inactivitat manifesta de l'esllavissada. Per tant, és molt probable que l'angle de fricció sigui superior a aquest o, en qualsevol cas, que les condicions de realització dels assaigs no permetin reproduir el comportament real d'aquests materials.

Els desplaçaments observats a les superfícies de trencament solen ser de diversos metres, com a mínim, i les tensions de tall a les que estan sotmesos els materials poden ser molt grans. Amb els aparells disponibles al Laboratori de Mecànica de Sòls de la Divisió d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de la UPC, no és possible aplicar tensions molt elevades i els desplaçaments són mil·limètrics. Aquesta diferència respecte a la realitat es creu que pot contribuir al fet que els resultats de laboratori no siguin del tot adequats.

- Freqüència de reactivació. L'anàlisi dendrogeomorfològica ens indica que l'esllavissada s'ha mogut clarament en una ocasió, l'any 2010. L'inici del registre dendrocronològic és el 1947, any al qual hi havia un mínim de cinc arbres vius damunt l'esllavissada. Amb una sola reactivació des de 1947, no es possible obtenir un període de retorn exacte. S'han trobat indicis clars de l'existència de l'esllavissada abans de l'any 2010. La formació de la mateixa, potser va ser anterior al 1947, però també poden haver esdevingut reactivacions petites (amb desplaçaments de decímetres o uns pocs metres), que difícilment serien registrades pels arbres en una esllavissada de tipus translacional. Efectivament, en un moviment translacional, els desplaçaments petits haurien deformat poc el terreny de manera que els arbres només són desplaçats amb la massa i no inclinats.

Per aquest motiu, es suggereix que el resultat de la dendrogeomorfologia podria

ser incert. Només s'ha pogut obtenir una freqüència de reactivació mínima i un període de retorn màxim.

- Factor de seguretat. Els factors de seguretat obtinguts emprant els valors d'angles de fricció resultants dels assaigs de laboratori són menors a la unitat. Això indicaria que el vessant seria inestable fins i tot en condicions seques (amb nivell freàtic sota la superfície de lliscament). La realitat és, no obstant, que l'esllavissada no és activa (no està en moviment).

A la vista d'aquests resultats contraposats i les incerteses dels valors d'algunes variables en l'estabilitat (angle de fricció residual, profunditat de la superfície de trencament i posició del nivell freàtic), es va fer l'anàlisi de sensibilitat. I així poder determinar la influència de cada variable en el factor de seguretat.

- Anàlisi de sensibilitat. Les conclusions extreïtes en aquest apartat són dues. Pel que correspon a la profunditat de la superfície de trencament, es pot comprovar que influeix relativament poc en la inestabilitat del lliscament. També s'ha trobat que el factor de seguretat és molt sensible tant a la variació de l'angle de fricció com a la posició del nivell freàtic. Per tant, aquests dos factors són els que s'haurien d'estimar amb major certesa per fer una anàlisi realista del lliscament.
- Comparació de resultats amb altres esllavissades. Es fa difícil extreure conclusions vàlides per a tots els casos, ja que la varietat dels diferents resultats és força gran. Tot i això, les línies de tendència es comporten de la manera esperada: un moviment de vessant és més estable (major FS) quan més baixa és la freqüència de reactivació. És un fet que s'esperava confirmar des del principi de la tesina, encara que els resultats estan condicionats per moltes incerteses.

Un cop discutides les limitacions que ens han afectat en el present estudi, podem concloure que alguns resultats no són representatius de la realitat; i que és difícil obtenir conclusions raonables pel que fa a la relació entre la freqüència de reactivació i el factor de seguretat en el cas estudiat. Per tant, cal analitzar amb quines decisions es podrien millorar els estudis dels moviments de vessant.

Pel que fa a l'anàlisi dendrogeomorfològica, es podria mostrejar un número més gran d'arbres i també comparar-lo amb una sèrie d'arbres no inclinats per conèixer afectacions climàtiques. També es podrien haver mostrat arbres molt més inclinats, que presenten sovint molta més fusta de reacció, tot i que distingir els anells és més difícil.

Els angles de fricció residual obtinguts al laboratori han resultat massa baixos; com també ha esdevingut en altres tesines sobre argiles del Garumnià. El procediment utilitzat és el correcte però potser s'hauria d'estudiar si hi ha millors maneres d'obtenir l'angle de fricció residual en aquest tipus de materials.



Per a conèixer la posició del nivell freàtic i la profunditat de la superfície de trencament, es recomanaria dur a terme una campanya de sondejos. D'aquesta manera aquestes dues variables tan claus en el factor de seguretat s'estimarien amb molta més certesa.

A banda dels resultats i conclusions tècniques obtingudes, aquesta tesina ha suposat un període de formació per a mi. L'extracció de mostres a camp, els assajos de laboratori, la recopilació de dades i la seva anàlisi, els càlculs d'estabilitat o l'anàlisi de sensibilitat, han estat una font d'aprenentatge essencial per a complementar els coneixements assolits durant el grau.

Finalment, i com a conclusió, podem destacar que tot i els resultats obtinguts semblen poc realistes, s'ha donat una visió crítica i analítica dels condicionants apareguts en l'estudi. Així doncs, a més de caracteritzar el moviment de la Font del Bullidor hem identificat aquells factors que afecten més directament en la inestabilitat del sòl.

## 6. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

---

**Alonso Pérez de Ágreda E.** (2005). *Estabilidad de Taludes*. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Corominas y Alonso** (1984). *Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán. Tipología y causas*. Jornadas sobre Inestabilidad de Laderas en el Pirineo. Universidad Politécnica de Barcelona: C-1-C.53.

**Corominas** (1989). *Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales*. Monografía nº3. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza. pp.1-30.

**Corominas y García Yagüe** (1997). *Terminología de los movimientos de ladera*. IV Simposio Internacional sobre taludes y laderas inestables. Granada. Vol. 3:1051-1072.

**Cruden D.M. and Varnes D.J.** (1996). *Landslide types and processes*. In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.) *Landslides: investigation and mitigation*. TRB Special Report, 247. National Academy Press, Washington: 36-75.

**Dikau R., Brunsden D., Schrott L. i Ibsen M.** (1996). *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. International Association of Geomorphologists.

**Fernández I.** (2012). *Estudio del potencial de reactivación de coladas de tierras estrechas mediante el cálculo de la resistencia lateral y el análisis del mecanismo de reactivación. Aplicación a la colada de tierra de la Nou (Alt Berguedà)*. Treball Fi de Carrera. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Head K. H.** (1997). *Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. Pentech Press, London.

**Highland L., Bobrowsky P.** (2008). *The Landslide Handbook- A Guide to Understanding Landslides*. United States Geological Survey and Geological Survey of Canada.

**Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICC).**

**Jiménez, M.** (2006). *Anàlisis de la susceptibilitat a la reactivació de colades de terra*. Tesines Universitat Politècnica de Catalunya.

**Krahn J.** (2004). *Stability Modeling with SLOPE/W*. Geo-Slope/W International Ltd.

**Lloret A., Suriol, J** (2000), *Pràctiques de Laboratori*. Departament d'Enginyeria de Terreny i Cartogràfica, ETSECCPB-UPC.

**Montero I.** (2011). *Determinación y análisis de la actividad del deslizamiento de Les Pales (Cuenca de Tremp, Lleida)*. Treball Fi de Carrera. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Moya, J.** (2002). *Determinación de la edad y de la periodicidad de los deslizamientos en el Pirineo Oriental*. Tesi Doctoral. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Oliveras G.,** (2011). *Determinació i anàlisi de l'esllavissada de Clot dels Oms (Conca de Tremp, Lleida)*. Treball Fi de Carrera. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Pernía C.** (2015). *Análisis de estabilidad de un deslizamiento superficial en Cercs*. Treball Fi de Grau. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Ribas P.** (2014). *Freqüència de reactivació i grau d'estabilitat del lliscament del Torrent de l'Albiol (Guardiola del Berguedà)*. Treball Fi de Carrera. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

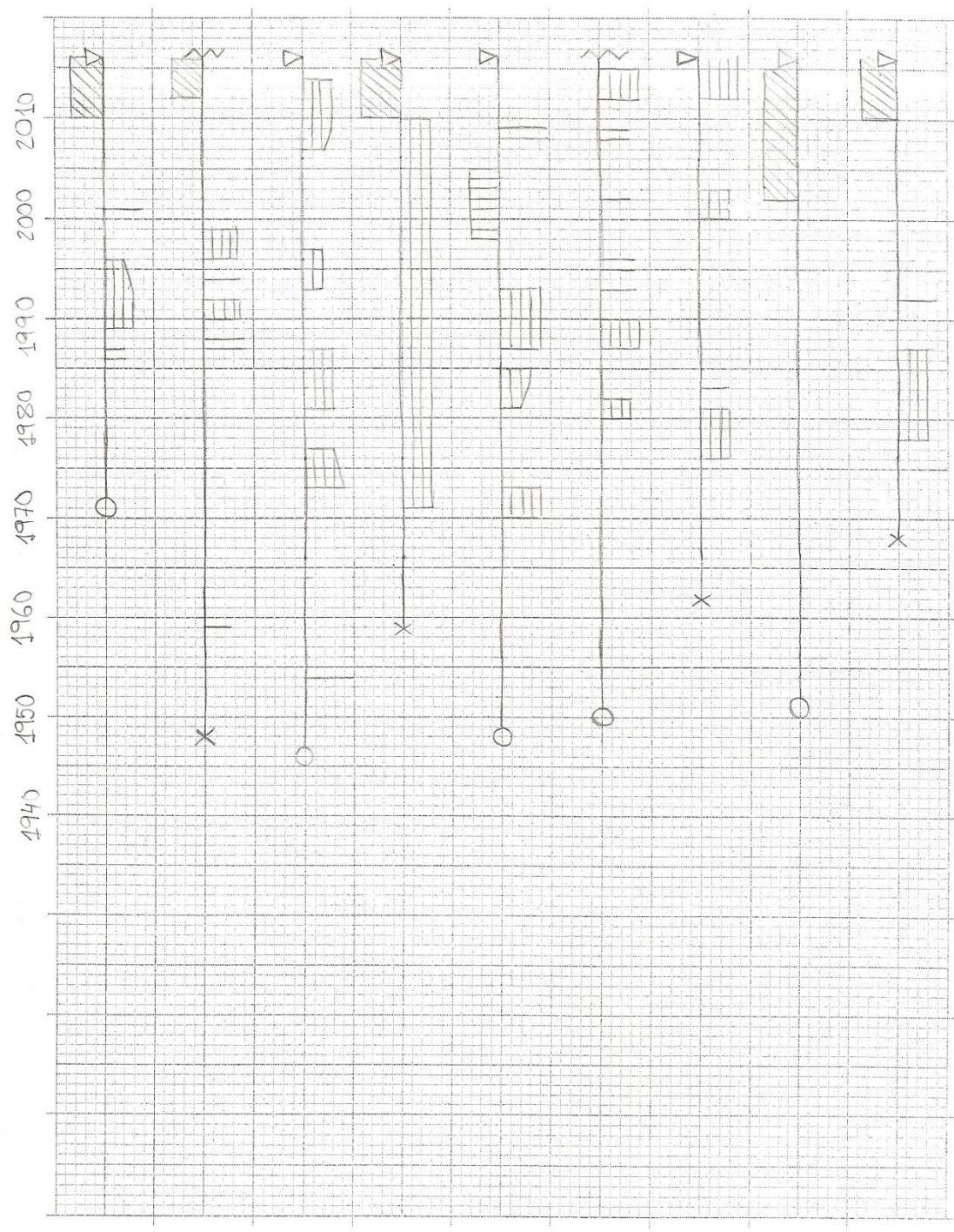
**Varnes, D. J.** (1978). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Paris: Unesco.

# 7. ANNEX: ANÀLISI DENDROGEOMORFOLÒGICA

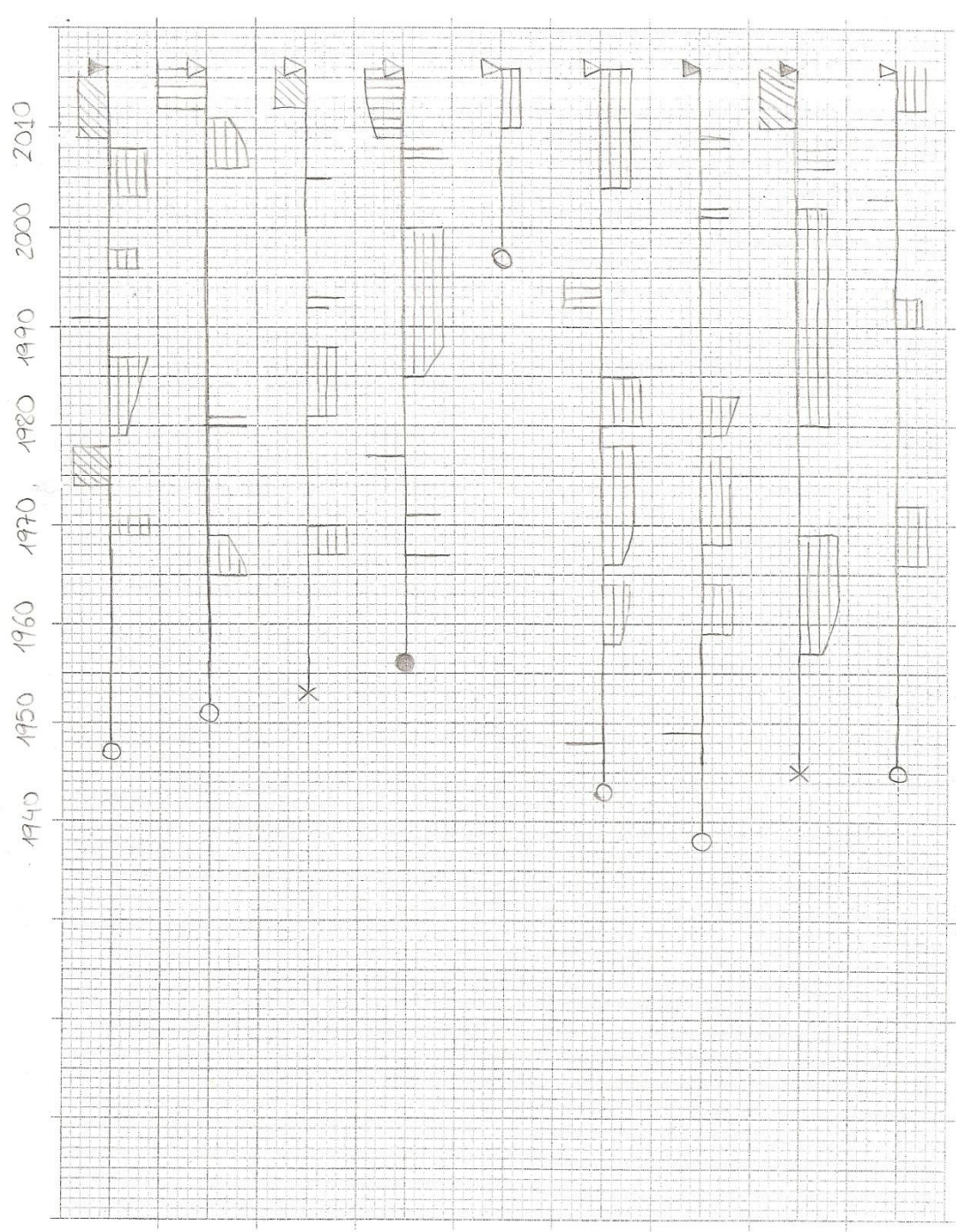
---

## LLEGENDA

- Primer anell de la mostra amb medul·la al tronc
- Primer anell proper a la medul·la
- × Primer anell allunyat de la medul·la
- ▼ Últim anell complet
- ▽ Últim anell incomplet
- ≋ Testimoni trencat
- ⊥ Anell clarament reduït
- ⊥ Anell clarament augmentat
- ▨ Anells amb fusta de reacció
- ▨ Sèrie d'anells augmentant
- ▨ Sèrie d'anells reduïts



- FB1 PRI (1972)
- FB2 PRS (1948)
- FB3 PRI (1944)
- FB4 PRS (1959)
- FB6 PRI (1949)
- FB7 PRS (1951)
- FB8 PRI (1965)
- FB9 PRI (1952)
- FB10 PRS (1968)



FB11 PRI (1948)  
 FB12 PRI (1952)  
 FB13 PRI (1953)  
 B14 PRI (1959)  
 B15 PRS (1978)  
 FB16 PRI (1994)  
 FB17 PRI (1998)  
 B18 PRS (1945)  
 B19 PRS (1946)