



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

Realització d'assajos d'extracció de reforços en sòls.

Treball realitzat per:
Eric Cortés Catalan

Dirigit per:
Ivan Puig Damians

Grau en:
Enginyeria d'Obres Públiques.

Barcelona, 15 de juny de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUM

El terreny és un material que resisteix relativament bé a compressió, però no a tallant ni tracció. Si reforcem aquesta mancança, podem millorar el seu comportament. Aquesta és la base de les estructures de contenció de terres mitjançant sòl reforçat. A partir d'un rebliment de material granular en el qual mitjançant l'encastament d'elements (lineals o planars) que assumeixen mecànicament part dels esforços tallants desenvolupats, relaxant així les pressions horitzontals, i afegint una certa cohesió aparent al terreny.

En aquest estudi s'han realitzat una sèrie d'assaigs en l'àmbit de murs de sòl reforçat, per tal de millorar el coneixement del comportament a l'extracció de reforços de naturalesa metàl·lica (més concretament, malles metàl·liques) encastades en un sòl determinat. Mitjançant assaigs de laboratori estipulats i estandarditzats en diferents normes internacionals actuals s'ha pogut simular diferents casos d'arrencament de reforços en el terreny, adequant els assaigs a condicions de contorn reals, i verificant el seu sobre-dimensionament respecte a normes de disseny d'estructures de contenció de sòl reforçat.

RESUMEN

El terreno es un material que resiste relativamente bien a compresión, pero no a cortante ni a tracción. Si reforzamos esta carencia, podemos mejorar su comportamiento. Esta es la base de las estructuras de contención de tierras mediante suelo reforzado. A partir de un relleno de material granular en el cual mediante la introducción de elementos (lineales o planos) que asumen mecánicamente parte de los esfuerzos cortantes desarrollados, relajando así las presiones horizontales, y añadiendo una cierta cohesión aparente al terreno.

En este estudio se han realizado una serie de ensayos en el ámbito de muros de suelo reforzado, para mejorar el conocimiento del comportamiento a la extracción de refuerzos de naturaleza metálica (más concretamente, mallas metálicas) empotradas en un suelo determinado. Mediante ensayos de laboratorio estipulados y estandarizados en diferentes normas internacionales actuales se ha podido simular diferentes casos de extracción de refuerzos en el terreno, adecuando los ensayos a condiciones de contorno reales, y verificando el sobre-dimensionado respecto a normas de diseño de estructuras de contención de suelo reforzado.

ABSTRACT

The soil is a material which has a relatively good strength against compression, but not against shear neither tensile performance. If this lack is strengthened, both shear and tensile behaviour of the soil can be improved. This is the rationale of the reinforced-soil retaining-earth structures. From a granular backfill material in where linear or planar reinforcement elements are included, part of the shear loads developed by the soil are mechanically transmitted to the reinforcements, and thus, a reduction the horizontal soil pressures occurs with adding a certain apparent cohesion to the soil.

In this study, a series of tests have been carried out in the field of the reinforced soil walls, to improve the knowledge of the behaviour against pull-out of steel reinforcements (more specifically, steel ladders) embedded in a determined soil. Through laboratory tests stipulated and standardized in different current international standards it has been possible to simulate different cases of reinforcement pull-out, with adapting the tests to real boundary conditions, and verifying the over-dimensioning with respect to design standards of reinforced-soil retaining-earth structures

AGRAÏMENTS

Després d'un intens període de 3 mesos, avui és el dia en què escric aquest aparat d'agraïments per finalitzar el meu treball de fi de grau. Ha sigut un període d'aprenentatge intens, no sols en el tema tractat, sinó també en l'àmbit personal. Realitzar aquest treball m'ha donat l'oportunitat de conèixer la gent que m'ha ajudat i donat suport durant aquest procés.

En primer lloc vull agrair a la Universitat Politècnica de Catalunya per donar-me la possibilitat de realitzar els meus estudis en aquests 4 anys de grau en l'Enginyeria d'Obres Públiques i el suport brindat en tot moment. Agrair també la Universitat de Girona per les instal·lacions cedides en el laboratori d'enginyeria i remarcar a VSL per la gran implicació d'haver proporcionat tot el material i despeses necessàries per a la realització d'aquesta campanya d'assaigs.

A continuació vull seguir donant les gràcies al meu tutor Ivan Puig Damians per haver dedicat tot el seu compromís per organitzar la realització d'aquests assaigs. Valorar també la dedicació en instruir tots els coneixements que han sigut necessaris per a comprendre la feina realitzada, però més important encara, el bon tracte familiar que he rebut en tot moment.

Altrament agrair al Miquel Llorens (UDG&3STECH) per la implicació tècnica aportada en tot moment i al responsable del laboratori Pere Bellvehí (UDG) per cedir tots els útils i ajudar en tot instant.

Aquest treball ha requerit sobretot esforç físic (quasi com treballar a peu d'obra) a l'hora de realitzar tots els assaigs, que malauradament no tots han resultat vàlids, fent que el procés s'allargués encara més. Per això vull donar la meva gratitud a les persones que han compartit suor i esforç per ajudar-me a realitzar els assaigs, com han sigut els estudiants d'Erasmus provinents de Bèlgica Kevin Diericx i Ruben Masquelin i al també Belga Tobie Plancke (3STECH) que a més ha fet possible tot el procés d'adquisició de dades.

Finalment vull donar gràcies a la família; als pares per haver-me donat la possibilitat d'haver pogut estudiar durant tots aquests anys, al meu germà per tots els consells i ànims donats, als avis per l'estim i la motivació que m'han brindat i sense deixar de banda als amics pròxims que m'han ajudat agafar forces en moments de complexitat.

ÍNDEX

1. Generalitats i antecedents	2
1.1 Introducció	2
1.2 Objectiu del treball	2
1.3 Estructures de contenció i murs de sòl reforçat	3
1.4 Disseny de murs de sòl reforçat	7
1.3.1 Estabilitat externa	7
1.3.2 Estabilitat interna	10
1.5 Resistència a l'extracció de reforços en el terreny	19
1.6 Estat de l'art / Actualitat dels assaigs d'extracció	25
2. Assaigs d'extracció de reforços en el terreny	29
2.1 Instrumentació / Utilitatge	29
2.2 Metodologia utilitzada	38
2.3 Materials a assajar	40
2.3.1 Malles metàl·liques	40
2.3.2 Sòl granular	41
2.4 Desenvolupament dels assaigs	43
2.5 Resolució d'incidències i refinament de la metodologia	44
3. Resultats	46
3.1 Resistència a l'extracció	46
3.2 Pressió vertical de terres	47
3.3 Factor d'interacció sòl-estructura	49
3.4 Comparació amb normes	53
4. Conclusions i treballs futurs	58
5. Referències bibliogràfiques	59
Annexes	61
A.1 Gràfiques de resistència a l'extracció	61
A.2 Gràfiques de pressions de terres	66

1. GENERALITATS I ANTECEDENTS

1.1 Introducció

La principal idea que ens passa pel cap en pensar en un mur majoritàriament l'associem a murs de maçoneria tradicionals, murs ciclopis de pedra, elaborats amb formigó en massa o bé formigó armat, i no tant comú és parlar de murs de sòl reforçat. El terreny és un material que resisteix relativament bé a compressió, però no a tallant ni a tracció. D'aquí ve la idea i concepte de reforçar el sòl mitjançant l'encastament d'elements (lineals o planars) que assumeixin mecànicament part dels esforços tallants desenvolupats, relaxant les pressions horitzontals, i afegint una certa cohesió aparent al terreny.

Aquesta tipologia de contenció s'ha utilitzat en el llarg de l'història i en moltes zones d'arreu del món, fent ús de materials locals es van realitzar nombroses actuacions per a reforçar i per tant per augmentar les capacitats resistents del terreny com ara: la utilització de branques d'arbres com a reforç en dics de terra o la utilització de capes alternatives de terra i troncs per a la construcció de fortificacions.

El principi es basa en combinar materials resistents a tracció en el sòl per dotar-lo de la mancança de resistència a tracció.

Els murs de sòl-reforçat actuals són una combinació de diversos materials moderns que fan possible la construcció de grans alçades i longituds de mur i aporten solucions que sovint són avantatjoses enfront altres tipologies de mur que pel contrari resultarien inviables.

Ara bé, es de gran importància conèixer com treballa el conjunt del mur i posant especial atenció a la interacció entre sòl i reforç, ja que es la que determinarà les principals característiques resistents d'aquesta solució constructiva.

1.2 Objectiu del treball

Aquest estudi té la finalitat de millorar el coneixement del comportament a l'extracció de reforços de naturalesa metàl·lica (més concretament, malles metàl·liques) encastades en un sòl determinat. Mitjançant assaigs de laboratori estipulats i estandarditzats en diferents normes internacionals actuals s'ha pogut simular diferents casos d'arrencament de reforços en el terreny, adequant els assaigs a condicions de contorn

reals, i verificant el seu sobre-dimensionament respecte a normes de disseny d'estructures de contenció de sòl reforçat.

1.3 Estructures de contenció i murs de sòl reforçat

A continuació es farà una breu descripció de les diferents tipologies i origen dels murs, per a poder introduir, més endavant els murs de sòl reforçat, el principal motiu d'estudi d'aquesta tesi.

Al llarg del temps, el ser humà ha tingut la necessitat de realitzar diverses accions constructives en el seu medi per tal d'estabilitzar-les o mantenir-les, com ara els talls, reblerts i estabilitzacions. Els reblerts sempre es veuen afectats per l'acció gravitacional, el que provoca el desplaçament del seu centre de gravetat en la seva mateixa direcció. Aquesta característica depèn dels tipus de sòls existents en el terreny, condicions hidrològiques, profunditat d'excavació, inclinació, pes de l'estructura i molts altres factors que fan necessari la col·locació d'algun tipus de sosteniment.

A continuació es mostren alguns tipus de murs de contenció que s'han utilitzat al llarg de la història:

En els murs de gravetat (observar Figura 1.1), el principi de sustentació ve donat pel gran pes del propi mur que es capaç de contrarestar l'empenta del terreny del extradós. La confecció es pot donar en formigó armat, en massa, de maçoneria o de grans blocs. Poden presentar diferents geometries i característiques com tacons, contraforts o inclús ancoratges en el terreny.

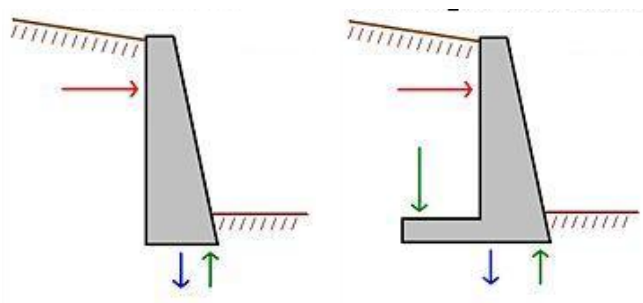


Figura 1.1 Murs de gravetat.

Els murs pantalla (observar Figura i.2) són estructures de contenció flexible que serveixen per poder resistir les empentes del terreny en els períodes crítics d'excavació de solars, evitant així les entrades d'aigües provinents del nivell freàtic i la contenció del pes del extradós.

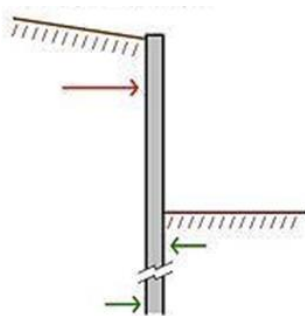


Figura 1.2 Murs pantalla.

Des de l'antiguitat el reforç del terreny ha sigut un element clau per a la construcció i el desenvolupament de les ciutats. Per exemple, les branques dels arbres van ser utilitzades com a reforç en dics de terra a la Xina durant almenys 1.000 anys o durant l'època medieval, on la gent va utilitzar capes alternatives de terra i troncs per a la construcció de fortificacions. No es fins a principis de 1960 on Henri Vidal va desenvolupar l'actual sistema de reforç que coneixem actualment i que va conduir a l'establiment de la patent Terra Armada[®].

El sistema constructiu es basa en el reforç de un terraplè mitjançant fleixos, metàl·lics o sintètics (observar figura 1.4), provocant fregament amb el terreny.

D'aquesta manera, el propi massís es comporta com un mur de contenció (observar figura 1.3), evitant construir cimentació ja que el terraplè actua de base de recolzament en tot la seva superfície. Això fa que la seva utilització sigui molt indicada en sòls compressibles i de baixa capacitat portant.

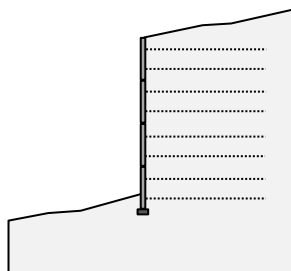


Figura 1.3 Mur de sòl reforçat.

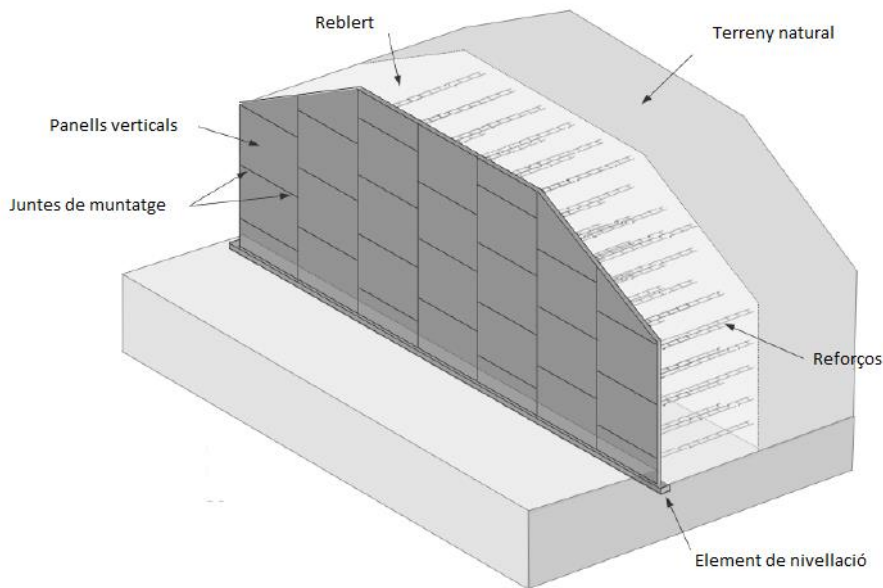


Figura 1.4 Components dels murs de sòl reforçat amb parament de formigó. (Font: Damians 2016)

A continuació es descriuran les principals parts de murs de sòl reforçat (observar Figura 1.4):

- El material de **reblert** ha de garantir característiques de densitat, capacitat portant, granulometria i plasticitat que poden estar relacionats en el tipus de reforç utilitzat. La correcta elecció, col·locació i compactació segons es marquen en els projectes, són els principals factors que determinen l'estabilitat, durabilitat i drenatge intern, per garantir un bon rendiment del sistema i una mínima corrosió de reforços. (Principalment es requereixen sòls amb coeficients d'uniformitat majors de 4 ($C_u > 4$) i coeficients de curvatura compresos entre 1 i 3 ($1 < C_c < 3$).)
- Els **reforços** són generalment elements lineals (barres, flexos, malles, tires, etc.), amb escassa o nul·la resistència a flexió, però bon comportament a esforços de tracció i cisalla. Depenent de la naturalesa del material (observar figura 1.5) es pot diferenciar en reforços inextensibles (metà·lics) i extensibles (polimèrics) enfront a càrregues de tracció. L'elecció del material ve determinada per les condicions ambientals i del tipus de reblert a utilitzar. S'ha de garantir la durabilitat a la corrosió i resistència enfront les forces transmeses pel conjunt del sistema constructiu.



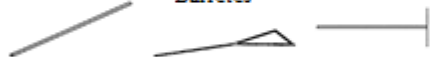

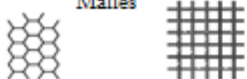

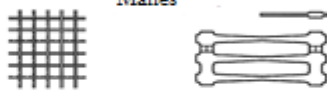

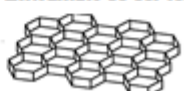
Reforços de naturalesa metálica (acer)	Reforços de naturalesa polimérica
<p>Tires, bandes flexios: llises o rugoses</p>  <p>Barres d'armar, cordons: llisos o corrugats</p>  <p>Barretes</p>  <p>Enllaçats de barretes o barres amb cercols</p>  <p>Malles</p> 	<p>Làmines, tires, bandes</p>  <p>Malles</p>  <p>Tires, bandes</p>  <p>Entramats de cel·les</p> 

Figura 1.5 Llistat dels diferents reforços emprats en murs sol-reforçat segons la seva naturalesa. (Font: British Standard 6008)

- Els **panells verticals** s'encarreguen principalment de sostenir el frontal del reblert i de garantir la unió dels reforços. Habitualment son prefabricats de formigó de diverses geometries que depenen principalment del sistema i del fabricant. El conjunt de panells tenen un comportament de caràcter flexible, ja que permeten certs moviments gràcies a les juntes obertes, que es mantenen vertical i horitzontalment entre peces i que alhora garanteixen un cert drenatge. També es pot donar que el parament vertical estigui format per blocs de maçoneria especialment dissenyats per unir els reforços, caixons metàl·lics que engabien blocs de pedra i material granular de mida gran o mantes geotèxtils que a la vegada fan de reforç ja que la seva posada en obra es continua.
- Les **juntes de muntatge** garanteixen una bon contacte entre panells i alhora permetent els moviments que es generen per dilatació/contracció i possibles assentaments del propi sòl.
- La **fonamentació** ha de garantir una capacitat portant que resisteixi les carregues del conjunt del mur i s'ha de poder controlar els assentaments que es produeixen en el temps. Per tant es necessari sanejar o estabilitzar tot els materials que puguin ocasionar alguna patologia en el futur.
- El **terreny natural** juga un paper important pel que fa la unió del reblert. S'ha d'estudiar les característiques mecàniques per establir el talús mes adient.

La fricció sòl/reforç depèn directament dels materials utilitzats i de la correcta execució del reblert i col·locació dels reforços. Per tant, els principis de mecànica de sòls són fonamentals en els murs de sòl reforçat

1.4 Disseny de murs de sòl reforçat

Com qualsevol estructura de contenció, els murs de sòl reforçat s'han de dissenyar sota uns paràmetres per a que es compleixi els requisits de durabilitat i estabilitat. Per tant és important identificar els sistemes de ruptura que poden malmetre el funcionament de la construcció.

El requisit d'equilibri es diferencien en: **estabilitat externa** i **estabilitat interna**.

1.3.1 Estabilitat externa

El càlcul de l'estabilitat externa és realitza de la mateixa metodologia que en qualsevol altre mur de gravetat, considerant tot el mur de terra armada com un conjunt. Cal comprovar les següents estabilitats:

- L'estabilitat a la bolcada (observar Figura 1.3.1.1): es determina comprovant que els moments estabilitzadors respecte al punt de gir (suposat a la punta de la base del mur (O)), són superiors que els moments bolcadors amb un factor de seguretat igual o superior a 2 (observar Figura 1.3.1.2) :

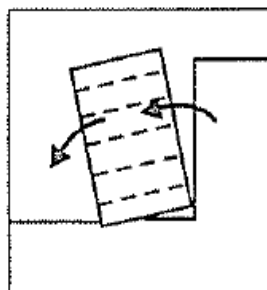


Figura 1.3.1.1 Il·lustració del bolcament d'un mur respecte el punt de gir situat al peu de la base del mur. (Font: Potts 2001)

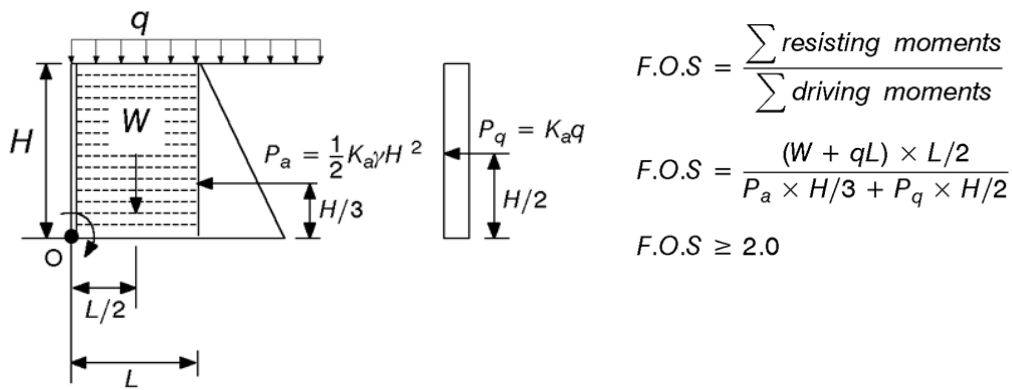


Figura 1.3.1.2 Esquema del mecanisme de bolcada d'un mur degut a les empentes produïdes pel terreny més carregues externes amb els càlculs del factor de seguretat (F.O.S). (Font: FHWA 1989)

- L'estabilitat al lliscament (observar Figura 1.3.1.3) : es tracta d'analitzar si la resistència al tall del contacte terreny-mur en la base es superior als esforços tangencials produïts pel pes de les terres de l'extradós. S'utilitza un factor de seguretat igual o superior a 1,5. La resistència al tall en la base (Σ Forces estabilitzadores) es calcula mitjançant la tangent del angle de fregament (μ) i multiplicant per les forces verticals tant de pes propi com de carregues externes (observar Figura 1.3.1.4) .

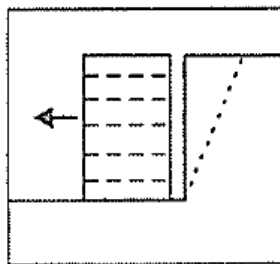


Figura 1.3.1.3 Il·lustració del lliscament d'un mur. (Font: Potts 2001)

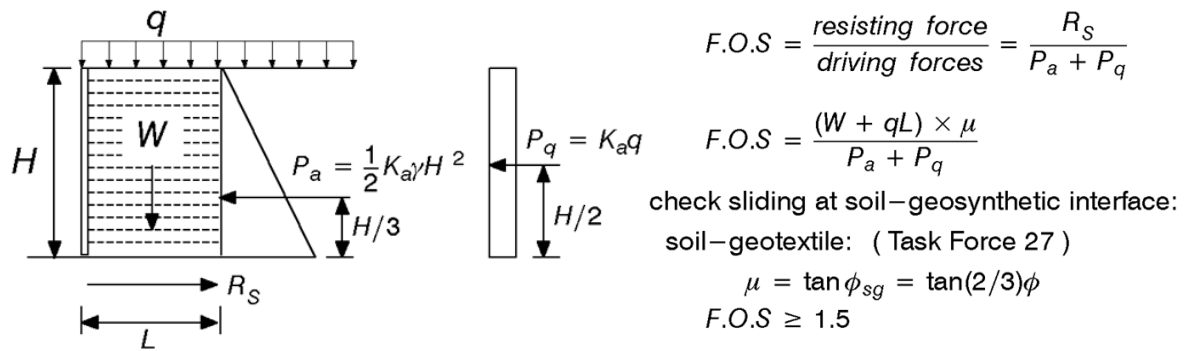


Figura 1.3.1.4 Esquema del mecanisme de bolcada d'un mur degut a les empentes produïdes pel terreny més carregues externes amb els càlculs del factor de seguretat (F.O.S). (Font: FHWA 1989)

- L'estabilitat a l'enfonsament (observar Figura 1.3.1.5): es tracta de comprovar l'enfonsament del terreny a la base del mur. Es planteja amb el mètodes de càlcul de cimentacions superficials (Meyerhof), es realitza un equilibri de forces que es comparen amb la resultant de les forces verticals totals. S'utilitza un factor de seguretat igual o superior a 2 (observar figura 1.3.1.6).

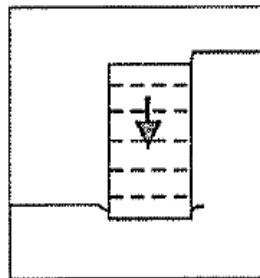


Figura 1.3.1.5 Il·lustració del enfonsament d'un mur. (Font: Potts 2001)

- L'estabilitat general (observar Figura 1.3.1.7): com a última comprovació, s'ha de verificar la possible inestabilitat del terreny (tractant el terreny circumdant com si fos un talús) que envolta l'estructura i comprovar les superfícies de ruptura que es poden donar i els factors de seguretat corresponents.

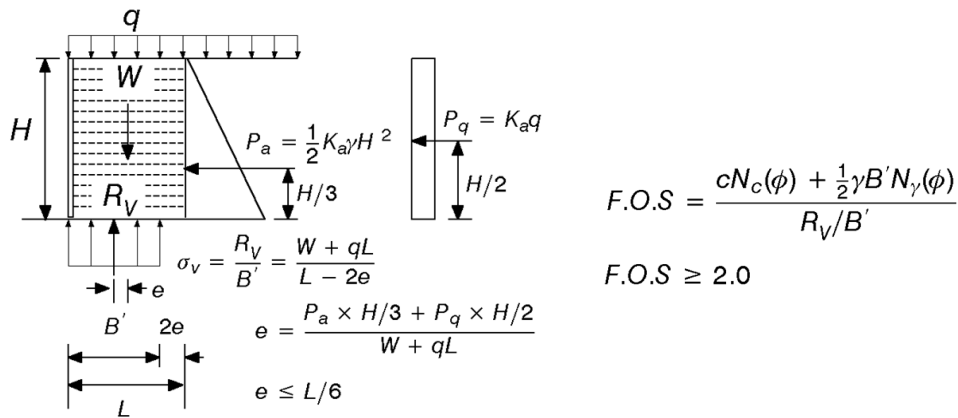


Figura 1.3.1.6 Esquema del mecanisme de bolcada d'un mur degut a les empentes produïdes pel terreny més carregues externes amb els càlculs del factor de seguretat (F.O.S). (Font: FHWA 1989)

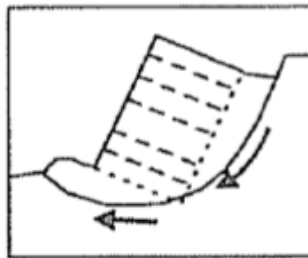


Figura 1.3.1.7 Il·lustració de l'enfonsament d'un mur. (Font: Potts 2001)

1.3.2 Estabilitat interna

El terreny es un material, com s'ha citat anteriorment, resisteix molt poc els esforços de tall. El reforç mitjançant un element introduït en el reblert o el confinament del terreny, aporta una resistència notable per als esforços de tall (observar figura 1.3.2.1), ja que per a carregues pròximes al trencament (en terreny no reforçat), el reforç resisteix les tensions horitzontals que el terreny no es capaç de sostenir, aportant una tensió vertical final o ruptura major (observar figura 1.3.2.3).

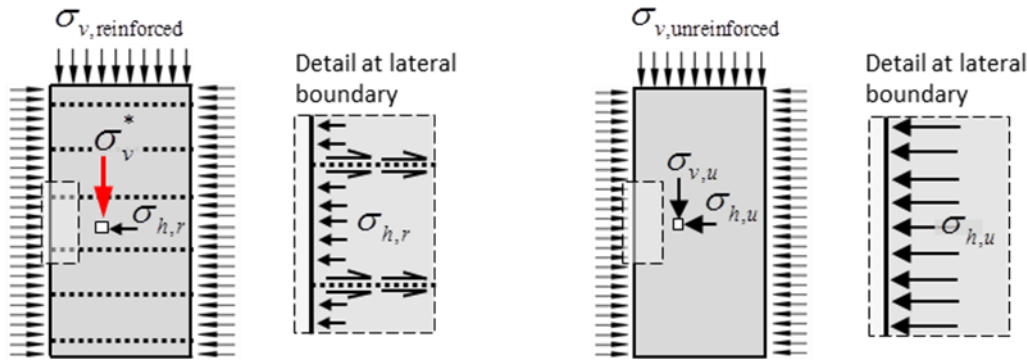


Figura 1.3.2.1 Comparativa (entre sòl-reforçat i sòl no reforçat) del comportament sota càrregues verticals. (Font: Damians 2016)

Un altre efecte que s'ha de considerar és la dilatància, una propietat dels materials utilitzada freqüentment per descriure l'increment de volum d'un material granular davant d'un esforç de tall. En aplicar alt confinament sobre materials granulars sense cohesió es pot observar una alteració en el seu comportament, on a més pressió es tornen netament contractius, en règim d'alts esforços també pot donar lloc a la ruptura de fragments generant així una disminució en la distància del material (observar figura 1.3.2.4).

Si la compacitat és suficient, els esforços tallants que es desenvolupen en els voltants de les armadures donen tendència a produir un augment local del volum del sòl. La seva expansió queda limitada per la poca compressibilitat de les zones pròximes del reforç, resultant un augment de la tensió normal aplicada sobre l'armadura (observar figura 1.3.2.5) amb l'augment consegüent del valor de la interacció entre el sòl i el reforç.

Una analogia fora de la mecànica de sòls seria el que passa al lliscar una filera de corrons sobre una altra filera de corrons en estar col·locades de manera que intenten ocupar tots els espais (observar figura 1.3.2.2) , en produir un moviment de tall per sota de la filera inferior la filera superior necessita pujar per sobre de les generatrius dels rodets de la filera inferior per poder desplaçar-se. La deformació de tall seria en aquest cas el desplaçament del centre de la filera superior respecte al centre de la filera inferior, hi ha un augment de volum ja que l'altura total de les dues fileres de cilindres és més gran quan està passant un cilindre exactament per sobre de l'altre que quan els cilindres superiors es troben entre els inferiors. En un sòl passa una cosa semblant amb els grans. Aquest procés es coneix com dilatància (Josa et al 2017).

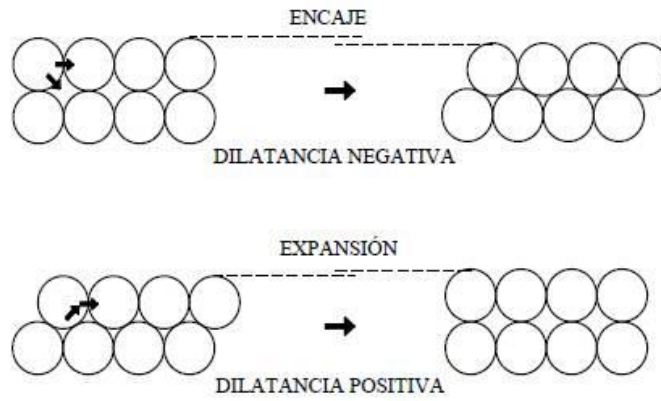


Figura 1.3.2.2 Possibles tipus de moviment de partícules en un sòl granular. (Font: *Modelación en 3D cimentaciones aisladas bajo carga centrada en suelos friccionales. ABAQUS/CAE*)

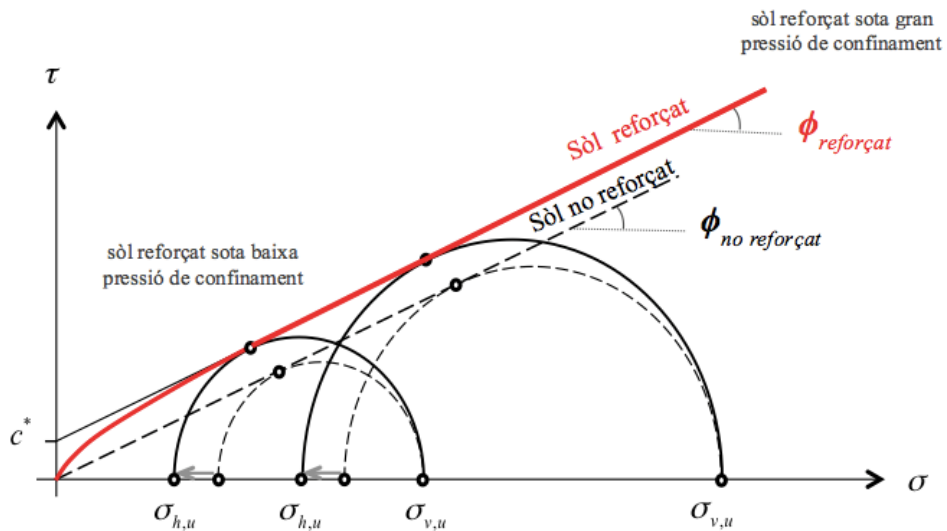
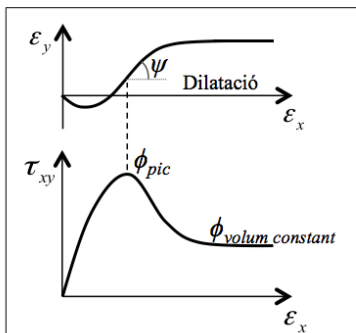


Figura 1.3.2.3 Comportament de sòl-reforçat i no reforçat il·lustrat amb el cercle de Mohr. (Font: *Damians 2016*)

Sorra densa sotmesa a baixa pressió de confinament



Sorra densa sotmesa a alta pressió de confinament

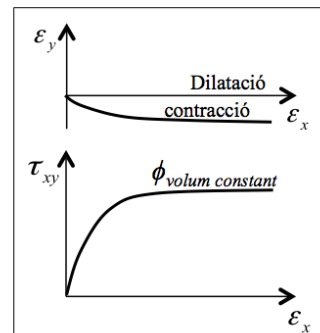


Figura 1.3.2.4 Efecte de la dilatància respecte alta i baixa pressió de confinament. (Font: *Damians 2016*)

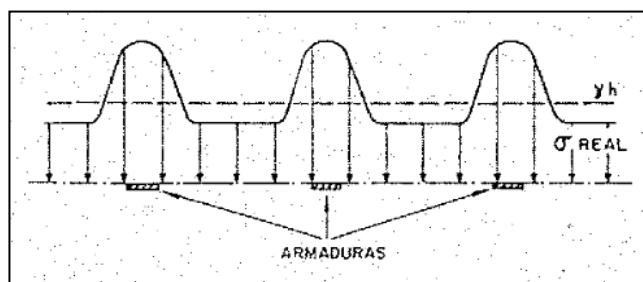


Figura 1.3.2.5 Variació de la tensió vertical produïda per la dilatació generada pel cisallament dels reforços. (Font: MOPU-DGC 1994)

Per una altra banda, el mateix reforç genera un fregament aparent en la interacció d'arrencament, que depèn tant de l'angle de fregament intern del sòl, com de la rugositat superficial dels reforços (reforços llisos o amb ressaltos deguts a estries, solapaments, soldadures, etc.). La figura 1.3.2.6 mostra un exemple d'aquesta influència en el coeficient de fregament aparent (interacció sòl-reforç, $\tan \delta$) respecte el valor de la sobrecarrega de terres en el nivell del reforç (Josa et al 2017).



Figura 1.3.2.6 Influència de la profunditat en el coeficient de fregament aparent respecte armadures amb o sense ressaltos. (Font: MOPU-DGC 1994)

El valor de $\tan \psi$ de l'anterior figura fa referència al fregament entre el sòl i els reforços (abans $\tan \delta$), i el que ve a dir és que amb reforços amb certa rugositat superficial, la interacció sòl-reforç equival a la del sòl-sòl ($\tan \phi$) al generar-se la hipotètica superfície de lliscament amb una certa separació dels reforços (Josa et al 2017).

Per a l'estudi de l'estabilitat interna dels murs de sol-reforçat, s'ha de tenir en compte també, el comportament dels materials que el componen i la interacció entre ells.

El material principal és el terreny de reblert, ja que n'ocupa la major part en volum respecte els panells verticals i els reforços. Però al mateix temps exerceix unes empentes (degudes al propi pes) que son transmeses al parament i sostingudes pels reforços, que resisteixen per fricció.

Això genera que existeixi una zona en el que el terreny es troba en ruptura (estat actiu) i una altra que es comporti de manera resistent (observar figura 1.3.2.7) on es sostenen els esforços de les empentes del terreny.

La localització de la superfície, on les traccions en els reforços son màximes i la zona d'estat actiu canvia depèn de la naturalesa del reforç a utilitzar i es diferencien en:

- Reforços inextensibles (observar figura 1.3.2.8): elements molt poc deformables de naturalesa metàl·lica, generalment a força de bandes, barres o malles metàl·liques (observar figura 1.5). On la deformació en ruptura és menor que la deformació de falla del sòl, per a condicions d'operació similars. El comportament del material en termes de la localització de l'estat actiu en el terreny es veu reduïda per la rigidesa del material.

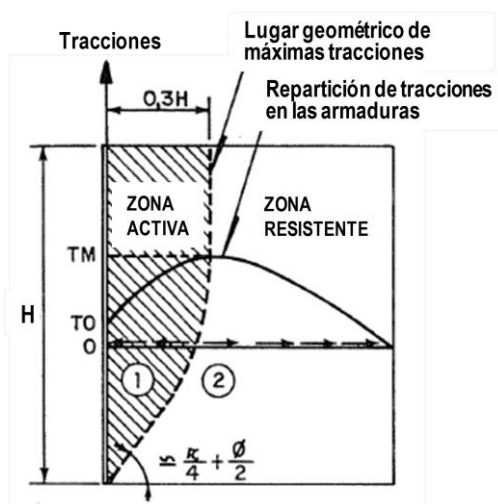


Figura 1.3.2.7 Esquema del comportament d'un reforç i la localització de la zona activa i resistent. (Font: *Geotecnia y Cimientos II, Jiménez et al.*)

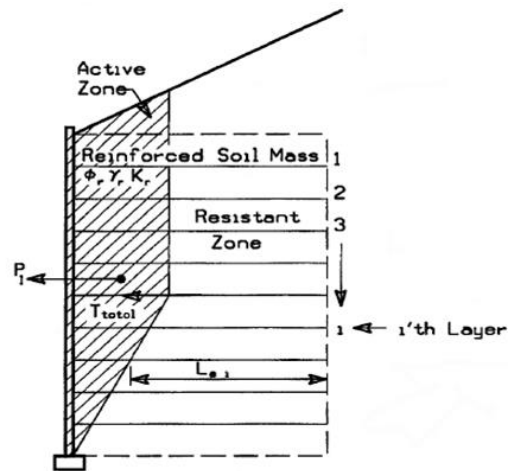


Figura 1.3.2.8 Esquema de la localització de la zona activa en reforços inextensibles. (Font: British Standard 8006)

- Reforços extensibles (observar figura 1.3.2.9): materials de naturalesa polimèrica (observar figura 1.5) on la deformació en ruptura és major que la deformació de falla del sòl. La flexibilitat del material permet tolerar les deformacions que s'originen en el mateix procés constructiu, en el qual el coeficient d'empenta va augmentant (de l'estat actiu K_a afins al estat de repòs K_0) fins a coronar el mur.⁴ Això fa que la superfície de terreny en estat actiu s'ampliï respecte el reforç inextensible.

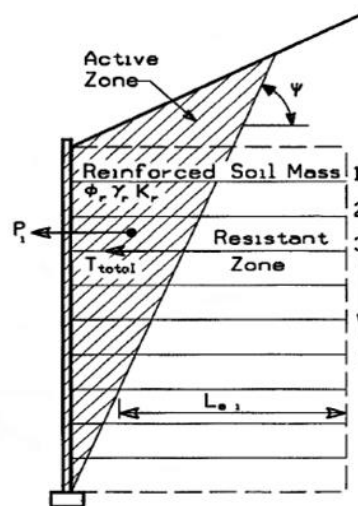


Figura 1.3.2.9 Esquema de la localització de la zona activa en reforços extensibles. (Font: British Standard 8006)

Vist el comportament dependent del tipus de material a emprar, el següent pas es el de conèixer les tensions màximes (T_{max}) que es donen en la frontera de zona activa/resistent (observar figura 1.3.2.10).

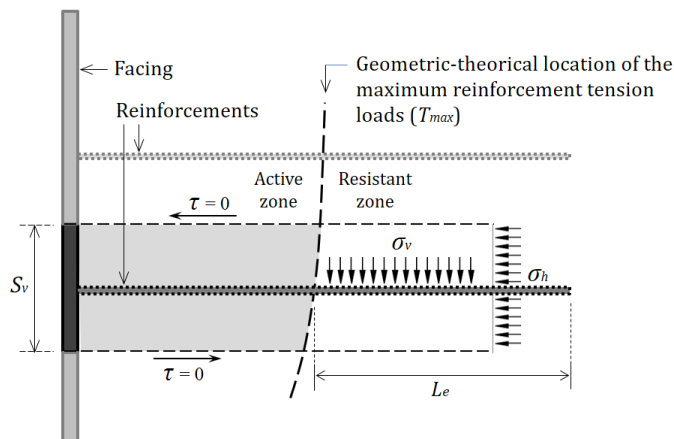


Figura 1.3.2.10 Localització de la màxima tensió (T_{max}) en un reforç inextensible. (Font: Damians 2016)

Aquestes tensions venen donades per l'expressió:

$$T_{max} = S_v \cdot \sigma_h = S_v \cdot (\sigma_v \cdot K_r)$$

On S_v correspon a la separació vertical dels reforços (figura 1.3.2.10), σ_v correspon a la pressió de terres en l'alçada del reforç a estudiar (pes de les terres més les sobrecarregues), i K_r és el coeficient d'empenta lateral de terres del sòl-reforçat ($K_r = \sigma_2 / \sigma_1$), i relacionat amb el coeficient de fregament aparent comentat anteriorment. El valor ve donat en funció del coeficient d'empenta al repòs, i actualment s'utilitza en àbacs semi-empírics com el de la figura 1.3.2.11 (corresponent al Mètode Simplificat, AASHTO 2012) per la seva determinació (Josa et al 2017)..

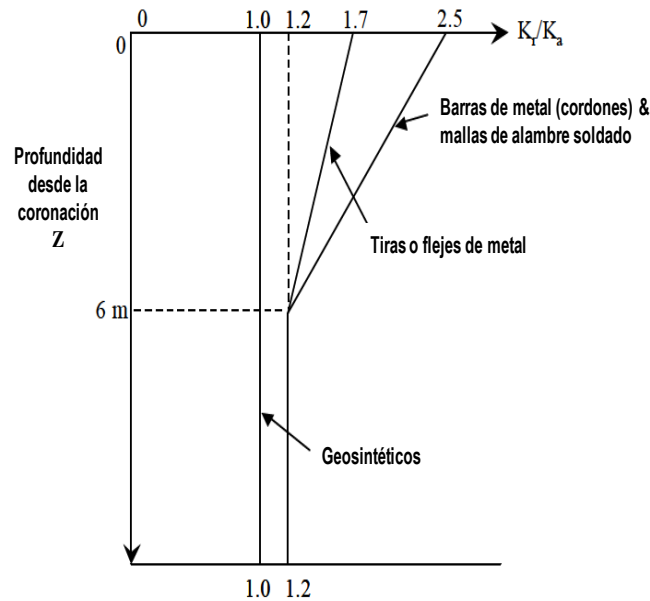


Figura 1.3.2.10 Variació del coeficient d'empenta del sòl-reforç en funció de l'alçada i tipus de reforç. (Font: modificada de AASHTO 2012 per Geotecnica – GICO UPC. Tema 7, Resistencia y deformación)

Com s'ha esmentat, la tensió màxima (T_{max}) ha de satisfer els diferents modes de ruptura en termes d'estabilitat interna de l'estructura. L'estabilitat interna s'encarrega de determinar les resistència de cada un dels materials que componen el mur de sòl reforçat i la interacció entre ells, per tant les verificacions a realitzar són:

- Verificació del trencament dels punts d'ancoratge en els panells : s'ha de comparar la tensió màxima (T_{max}) amb la tensió admissible dels punts d'ancoratges i verificar el bon funcionament. Aquesta verificació dependrà del panell vertical que s'utilitzi en cada cas, ja que la resistència va en funció del tipus de formigó que el compona.

- Verificació de la ruptura interna dels reforços (observar figura 1.3.2.12): el trencament es verifica mitjançant la tensió màxima (T_{max}) que suportaran els reforços i comparant amb la resistència del mateix, és a dir, el producte de la seva àrea pel límit elàstic del material del reforç o comparant amb la tensió màxima admissible que garanteixi el fabricant.

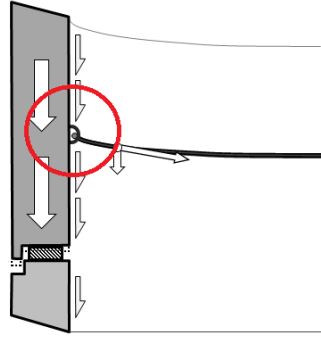
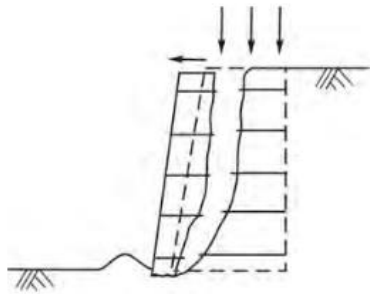


Figura 1.3.2.11 Detall dels punts d'ancoratge dels reforços en els panells verticals. (Font: Damians 2016)



$$T_{allow} \leq \frac{T_{capacity}}{FD \times FC \times FS}$$

$T_{capacity}$ = long-term creep tensile capacity

FD = Durability Factor of Safety
(biological or chemical attack, oxidation
environmental stress cracking)
= 1.1 to 2.0

FC = Construction Damage Factor of Safety
= 1.1 to 3.0

FS = Overall Factor of Safety ≥ 1.5

$$T_{capacity} = CRF \times T_{ult}$$

T_{ult} = ultimate (yield strength) of reinforcement
(Wide Strip Tensile Strength Test
ASTM D-4595)

CRF = Creep Reduction Factor

Figura 1.3.2.12 Ruptura dels reforços per superació del límit resistent estructural. (Font: FHWA 1989)

- Arrencament dels reforços : per verificar l'arrencament, es comprova que la tracció calculada anteriorment és menor que la resistència per fregament en la part que queda fora de la falca de trencament.

La verificació de l'arrencament és el principal motiu d'estudi d'aquesta tesi, per això a continuació s'exposarà diferents metodologies de comprovació d'extraccions de reforços ens murs de sòl reforçat.

1.5 Resistència a l'extracció de reforços en el terreny

En aquest apartat s'explicarà la resistència a l'extracció dels reforços comparant en el que citen les següents normatives:

- Norma "Standard Specification for Highway Bridges", de la "American Association of State Highway and Transportation officials "(**AASHTO**), dels Estats Units MSE (Mechanically stabilized Earth Walls) a la secció 5.8, 2014.
- Norma francesa **NF** (NF P 94-270, 2009).

▪ AASHTO

Tal i com s'ha citat en l'Apartat 1.3.2, la norma americana diferencia la naturalesa dels reforços en quan l'estudi a extracció.

Per als reforços extensibles, la zona de tensió màxima o superfície de falla potencial es defineix com a la Figura 1.4.1. On per a sistemes de paret extensible amb una inclinació de cara inferior a 10° des de la vertical ($\omega < 10^\circ$; $80 < \alpha < 100^\circ$), la zona de màxima tensió s'ha de determinar utilitzant el mètode Rankine (és a dir, $\psi = 45 + \phi_1 / 2$; on ϕ_1 és l'angle de fricció del sòl reforçat).

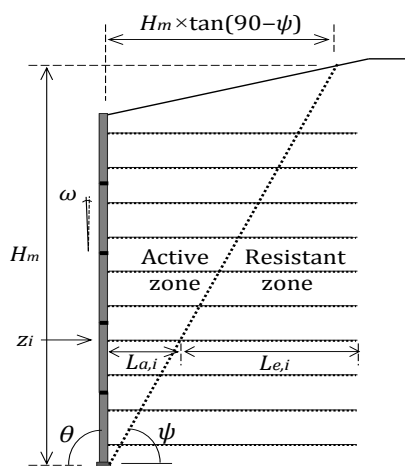


Figura 1.4.1 Límit entre zones actives i resistents (localització de càrregues de tracció de reforç o superfície potencial de falla) en reforços extensibles. (Font: Damians 2016)

Atès que el mètode de Rankine no pot explicar la càrrega de la cara de la paret o l'efecte de les càrregues de recàrrega concentrades per sobre de la zona de reforç, el mètode de Coulomb s'ha d'utilitzar per a murs amb reforç extensible en cas de massissos

importants ($\omega \geq 10^\circ$, $80^\circ \geq \alpha$ o $\alpha \geq 100^\circ$) i càrregues de recàrrega concentrades per determinar la ubicació de la zona de màxima tensió. En aquestes condicions, l'angle de la falca teòrica inestable s'ha de prendre com:

$$\psi = \phi_1 + \tan^{-1} \left(\frac{-\tan(\phi_1 - \beta) + \sqrt{\tan(\phi_1 - \beta) \cdot A [1 + \tan(\delta + 90 - \alpha) \cot(\phi_1 + \alpha - 90)]}}{1 + \tan(\delta + 90 - \alpha) \cdot A} \right)$$

On:

$$A = \tan(\phi_1 - \beta) + \cot(\phi_1 + \alpha - 90), \text{ utilitzant } \delta = \beta.$$

En el cas de reforços inextensibles, la zona de màxim estrès es defineix a la Figura 1.4.2.

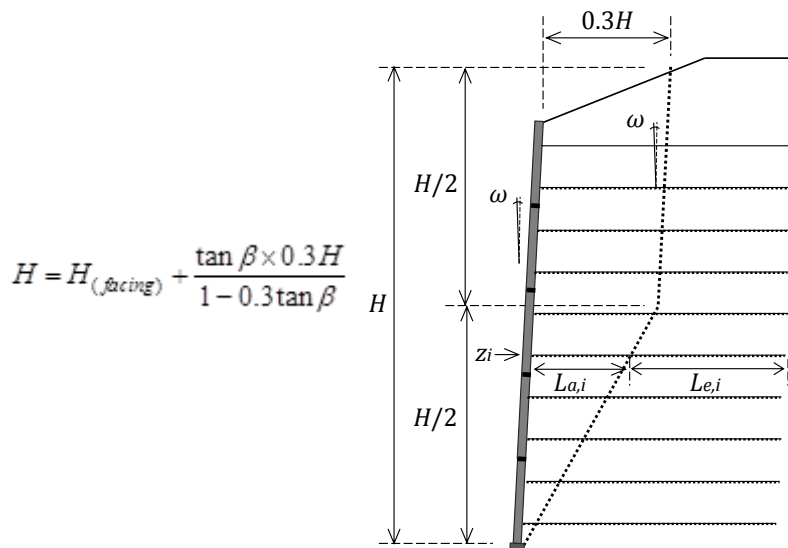


Figura 1.4.2 Ubicació de la superfície màxima d'estrès o ruptura potencial per reforços inextensibles (mètodes de gravetat simplificada i coherent; AASHTO). (Font: Damians 2016)

La resistència a l'extracció en la norma americana es defineix com:

$$P_r = CwL_e \cdot \sigma_v (F^* \alpha)$$

On en els mètodes de Gravetat Simplificats i Coherents, la longitud efectiva d'extracció (L_e) s'ha de determinar mitjançant la següent expressió:

$$L_{e,i} \geq \frac{T_{max,i}}{P_{r,i}} = \frac{T_{max,i}}{\phi F^* \alpha \sigma_{v,i} C R_{c,i}}$$

On:

- $T_{max,i}$ és la càrrega de tracció màxima;
- $P_{r,i}$ és la resistència última a l'extracció per unitat d'amplada de reforç;
- ϕ és el factor de resistència per a la retirada del reforç;
- F^* és el factor de fricció d'extracció, que conceptualment es refereix a $F^* = \tan(\delta i)$, essent δi l'angle d'interacció del reforç del sòl, o $F^* = C i \times \tan(\phi I)$, sent $C i$ el coeficient d'interacció del sòl-reforç (és a dir, $C i = \tan(\delta i) / \tan(\phi I)$);
- α és un factor de correcció d'efectes d'escala;
- $\sigma_{v,i}$ és la tensió vertical no factoritzada al nivell de reforç i a la zona resistent a la zona del nivell de reforç de la prova. Tenint en compte que només es consideren càrregues mortes en el càlcul d'estrès vertical per determinar T_{max} per avaluar càrregues d'extracció; per tant, les càrregues de servei no estan incloses. En cas de condició de l'angle β de la zona posterior, la pressió vertical s'obté amb la mateixa unitat de massa reforçada de la massa del sòl per sobre de la part superior de la paret orientada, definida com: $\sigma_v = Z_p \gamma_r$, on γ_r és el pes específic de la massa de sòl reforçat, i $Z_p = Z + S$; on: Z és la profunditat de la capa de reforç de la superfície superior a la seva localització de punt T_{max} , i S es defineix com: $S = (1/2) L \tan \beta$;
- C és el factor de geometria general de la superfície de reforç basat en el perímetre brut del reforç i és igual a 2 per a tires i escales (és a dir, dos costats);
- $R_{c,i}$ és la ràtio de cobertura de reforç, definida com:

$$R_c = b / S_h$$

On:

- b correspon a l'amplada de l'element de reforç (és a dir, la distància entre les barres longitudinals del reforç tipus escala d'acer i / o l'ample de les tires en cas de reforç polimèric);

S_h és l'espaiat entre els elements de reforç en la direcció d'execució de la paret (és a dir, a la mateixa capa de profunditat de la capa de reforç z_i).

F^* i α es determinaran a partir de proves de retirada específiques del producte en el material de reblert del projecte o sòl equivalent, o es poden estimar empíricament / teòricament. Per a materials de rebliment estàndard, a excepció de les sorres uniformes (és a dir, el coeficient d'uniformitat $C_u = D_{60} / D_{10} < 4$), en absència de dades de prova, és acceptable utilitzar valors predeterminats conservadors per a F^* (com es mostra a la Figura 1.4.3) i α (valor predeterminat de 1,0 per a tots els tipus de reforç d'acer, 0,8 per malles de geotèxtil i sense valors explícits proporcionats a reforços de la tira polimèrica).

Per a les xarxes, l'espaiat entre els elements de la quadrícula transversal (S_t) ha de ser uniforme en tota la longitud del reforç en lloc de tenir membres de la graella transversal concentrats només a la zona resistent.

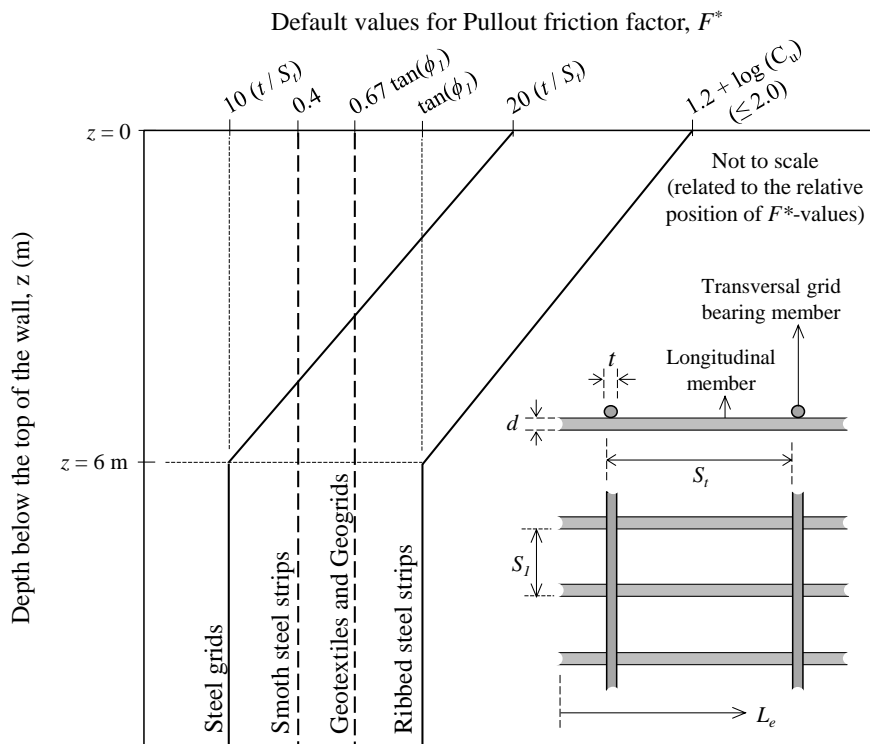
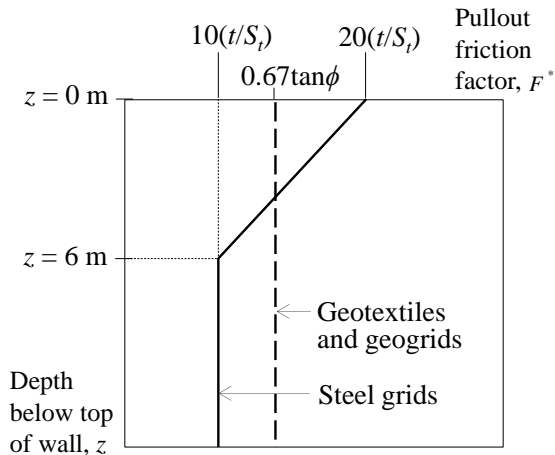


Figura 1.4.3 Valors predeterminats per al factor de fricció extracció (F^*). (Font: Damians 2016)



- No es menciona explícitament el tipus de reforç de l'escala d'acer i es consideren els valors donats al tipus de reforç de la xarxa d'acer;
 t és el gruix de les barres transversals, i S_t és la separació entre les barres transversals;
 No es menciona explícitament les tires polimèriques i es consideren els valors donats als geotèxtils i geo-malles (Geogrids).

Figura 1.4.3 Resum del factor de fricció d'extracció predeterminat F^* en acord on s'aplicarà en escales d'acer i tipus de reforç de polímer (segons AASHTO 2014). (Font: Damians 2016)

▪ **NF**

La capacitat de disseny de la resistència a la interacció de sòl-reforçat ($R_{f;d}$) per justificar l'estabilitat interna (a l'extracció) s'ha d'avaluar a la zona de resistència del sòl reforçat (és a dir, a la dreta del punt màxim de tracció en el reforç), vegeu la Figura 1.4.4), i ve donat per:

$$R_{f;d} = \frac{\tau_{max:k} P_s L_s}{\gamma_{M:f}}$$

On:

$\tau_{max:k}$ és la força de cisallament mobilitzada aparent i característica a un cert nivell de reforç (z_i), que es defineix com:

$$\tau_{max:k} = \sigma_{v,i} \mu^*_{(z)}$$

On:

$\sigma_{v,i}$ és la tensió vertical a cert nivell de reforç (z_i);

$\mu^*_{(z)}$ és el coeficient aparent d'interacció a certa profunditat (z) o nivell de reforç (z_i), que depèn del tipus de reforç (vegeu la taula 1.4.1).

P_s és el perímetre de la secció transversal;

L_s és la longitud de reforç efectiva a un determinat nivell de reforç (z_i);

$P_s L_s$ correspon al contacte de superfície de reforç on es mobilitza la interacció de fricció;

$\gamma_{M:f}$ és el factor parcial relacionat amb la resistència a la tracció característica: $\gamma_{M:t} = 1.35$ per a l'estabilitat interna.

En cas d'escapes d'acer, es defineix la longitud d'armadura efectiva d'extracció (L_s):

$$L_s = (n_x - 1) s_x$$

On:

- n_x és el nombre de barres transversals situades a un cert nivell de reforç (z_i) dins de la zona resistent ($L_{e,i}$);
- s_x és l'espaiat entre barres transversals.

En cas de reforç tipus escales d'acer, el perímetre de la secció transversal (P_s) es defineix com:

$$P_s = 2N \times b$$

On:

- N és la quantitat d'escapes (barres transversals) per metre;
- b és l'ample de l'escala total, sense tenir en compte sobresalts més grans que $S_y/3$ (en el cas), on S_y correspon a l'espai entre barres longitudinals.

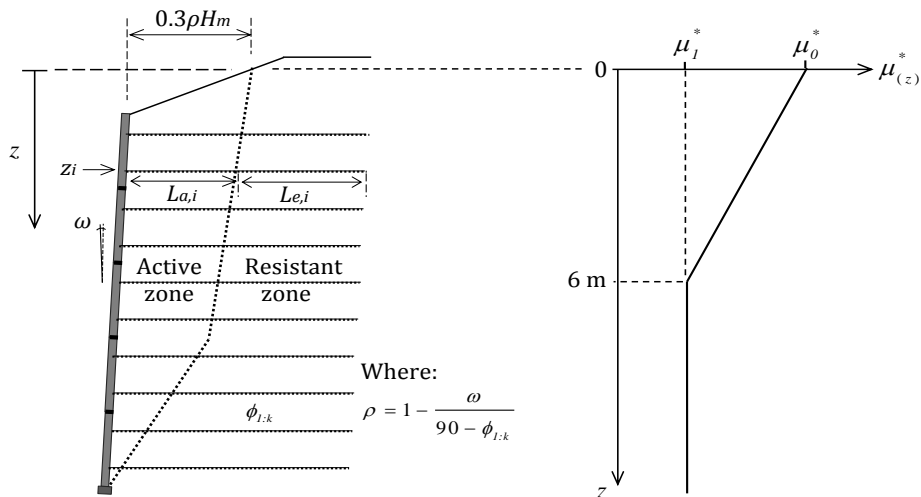


Figura 1.4.4 Ubicació de la superfície màxima de tensió o ruptura potencial i coeficient aparent d'interacció. (Font: Damians 2016)

Taula 1.4.1 Taula del coeficient aparent de la interacció entre el reforç i el sòl (μ^*). (Font: Damians 2016)

Reforç:	Reforç tips escala ^(a)			Reforç Polimèric ^(b)			
Tipus de sòl ^(c) :	1 i 2				1	2	3
Granulometria ^(d) :	C_u	$D_{50} \leq d_x$ ^(e)	$D_{50} > d_x$ ^(e)	C_u	-	$D_{70} > 2 \text{ mm}$	$D_{70} < 2 \text{ mm}$
μ_0^*	> 2	$35 \times (d_x / 2s_x)$	$70 \times (d_x / 2s_x)$	≤ 2	1.1	1.0	$1.0 \times (\tan \phi_{1:k} / \tan 36)$
				> 2	1.3	1.1	$1.1 \times (\tan \phi_{1:k} / \tan 36)$
μ_1^*		$15 \times (d_x / 2s_x)$	$30 \times (d_x / 2s_x)$	-	$0.9 \times \tan \phi_{1:k}$	$0.8 \times \tan \phi_{1:k}$	

Notes: ^(a) sense contacte amb l'aigua;
^(b) l'angle de fricció característic del rebliment ($\phi_{1:k}$)
^(c) Tipus de rebliment. Tipus 1: Material de drenatge; Tipus 2: material granular; Tipus 3: material intermedi;
^(d) C_u correspon al coeficient d'uniformitat: $C_u = (D_{60} / D_{10})$;
^(e) d_x és el diàmetre de les barres transversals;

1.6 Estat de l'art / Actualitat dels assaigs d'extracció

A continuació es desenvoluparà un llistat de l'actualitat en el que comporta els assaigs d'extracció en relació als articles, els autors, i les institucions que han abordat el tema que és objecte d'estudi. Aquest anàlisi, permet resumir el coneixement i les conclusions dels avenços fets fins el present.

- Assaigs d'extracció de reforços tipus malla en sòls tipus sorra.

Referència: Ingold, T. S., "Laboratory Pull-Out Testing of Grid Reinforcements in Sand," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 6, No. 3, Sept. 1983, pp. 101-111.

Es presenten els resultats de 32 proves d'extracció de drenatge consolidat per a tres reforços de tipus malla polimèrica i metàl·lica (observar figura 1.5.1) i un reforç d'acer pla tipus escala. Es cita que existeix una certa ambigüitat en la interpretació dels resultats de les proves d'extracció per al reforços extensibles i que hi ha una clara indicació que les estructures de la xarxa són potencialment més eficients que el reforços senzills en la resistència a l'extracció.

Les interpretacions simplificades dels resultats de les proves d'extracció mostren que les xarxes desenvolupen angles aparents majors que el valor de l'angle intern de resistència al cisallament.

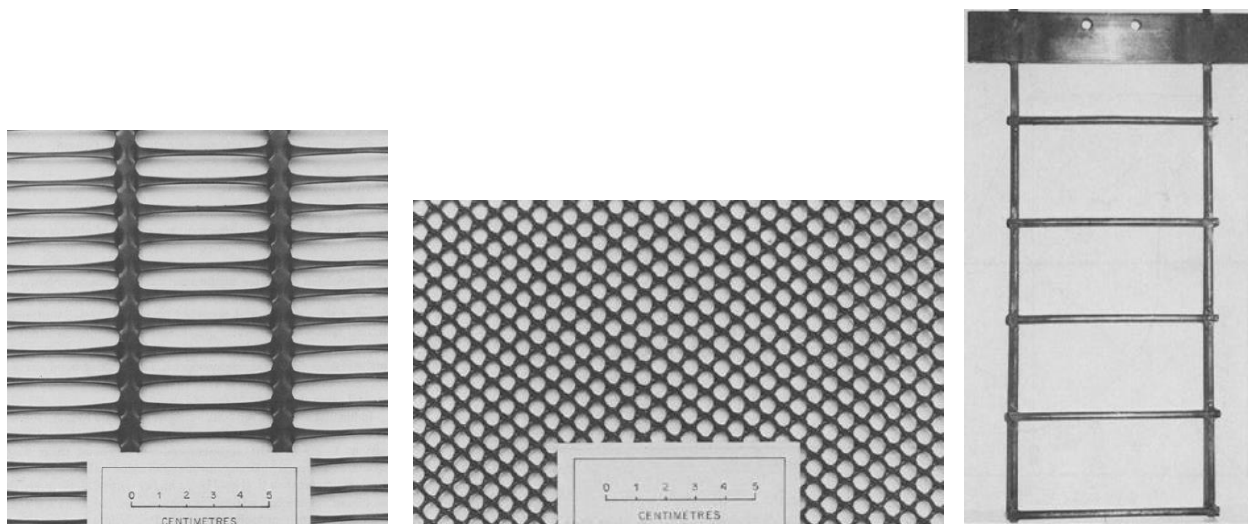


Figura 1.5.1 Reforços assajats en “Laboratory Pull-Out Testing of Grid Reinforcements in Sand” (Font: *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 6, No. 3, Sept. 1983, pp. 101-111*)

- Assaigs d'extracció en reforços nervats de naturalesa metàl·lica.

Pullout Resistance of Mechanically Stabilized Earth Wall Steel Strip Reinforcement in Uniform Aggregate. Autors: Mehari T. Weldu, Jie Han, Ph.D., P.E., Sayed Mustapha Rahmaninezhad, M.S., Robert L. Parsons, Ph.D., P.E., Jamal I. Kakrasul, M.S. The University of Kansas. November 2015.

En aquest estudi es demostra que el factor de fricció d'extracció (F^*) assajat en reforços nervats de naturalesa metàl·lica donen valors més alts dels que recomanava la norma americana AASHTO l'any 2012. Aquesta comparació indica que els valors de F^* recomanats per AASHTO són conservadors per a reforços de cinta acanalada en sòls seleccionats.

Aquest estudi es va realitzar limitant la selecció de sòls amb un coeficient uniforme de $Cu \geq 4$. Basant-se en els resultats de la prova en aquest estudi, l'increment del coeficient d'uniformitat va tenir alguns efectes sobre el valor del factor de fricció d'extracció calculat a una tensió normal més baixa, però deduïnt que el seu efecte es converteix mínim a una tensió normal més alta. Atès que la línia F^* predeterminada d'AASHTO és conservadora pels sòls amb el coeficient d'uniformitat de $1.4 < Cu < 4$ o $Cu > 4$, es pot utilitzar per als reblerts

amb el coeficient uniforme de $C_u > 1.4$, sempre que el reblert satisfaci la gradació estàndard requerida.



Figura 1.5.2 Reforç i caixó utilitzats. (Font: *Pullout Resistance of Mechanically Stabilized Earth Wall Steel Strip Reinforcement in Uniform Aggregate*)

- Assaigs d'extracció de reforços metàl·lics tipus escala ens sòls combinats amb partícules de pneumàtics triturats.

Pullout capacity of ladder-type metal reinforcements in tire shred-sand mixtures. Autors: Varenya Kumar D. Mohan, Hobi Kim, Umashankar Balunaini, Monica Prezzi. Golder Associates Inc., 500 Century Plaza Drive, Suite 190, Houston, TX 77073, USA Fugro Consultants, Inc., 6100 Hillcroft Ave, Houston, TX 77081, USA Department of Civil Engineering, IIT Hyderabad, Yeddumailaram, Telangana 502205, India School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1284, USA.

Aquest article destaca per la innovació al reaprofitament de materials on s'estudia el comportament mitjançant els ja coneguts assaigs d'extracció.

Les proves es van realitzar en barreges compostes per tires de pneumàtics (observar figura 1.5.3) de 50-100 mm de grandària nominal i sorra d'Ottawa. Les proves es van realitzar en proporcions de mescla de 0: 100, 20:80, 25:75 i 35:65 (tires de pneumàtics/pes de terres). A cada ràtio de mescla, es van realitzar proves d'extracció a 40, 65 i 90 kPa de pressió vertical (observar figura 1.5.4). Demostrant així l'augment de la resistència última a l'extracció en

aproximadament un 26-92% en funció de les proporcions de mescla i les tensions normals que es consideren en aquest estudi.

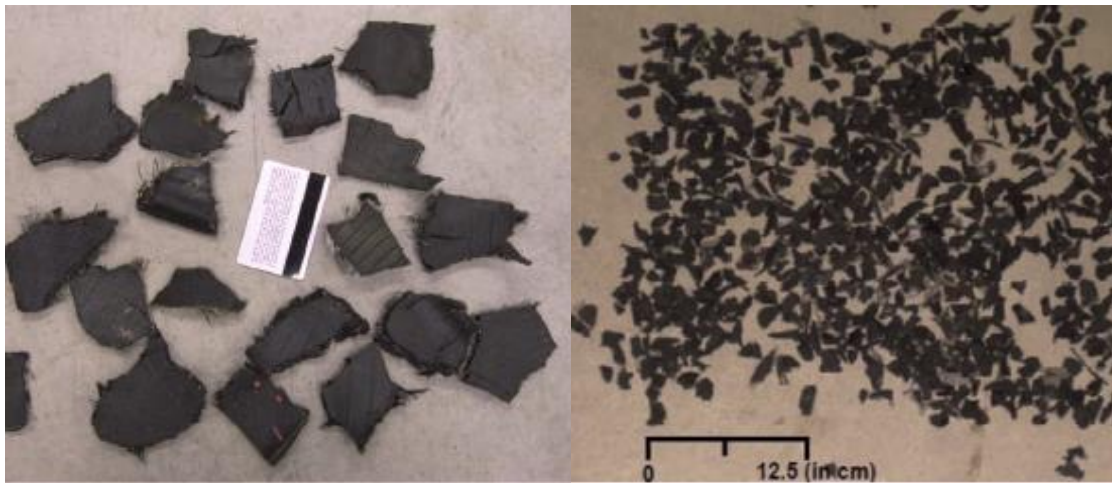


Figura 1.5.3 Tires de pneumàtics utilitzats en les barreges. (Font: *Pullout capacity of ladder-type metal reinforcements in tire shred-sand mixtures*)

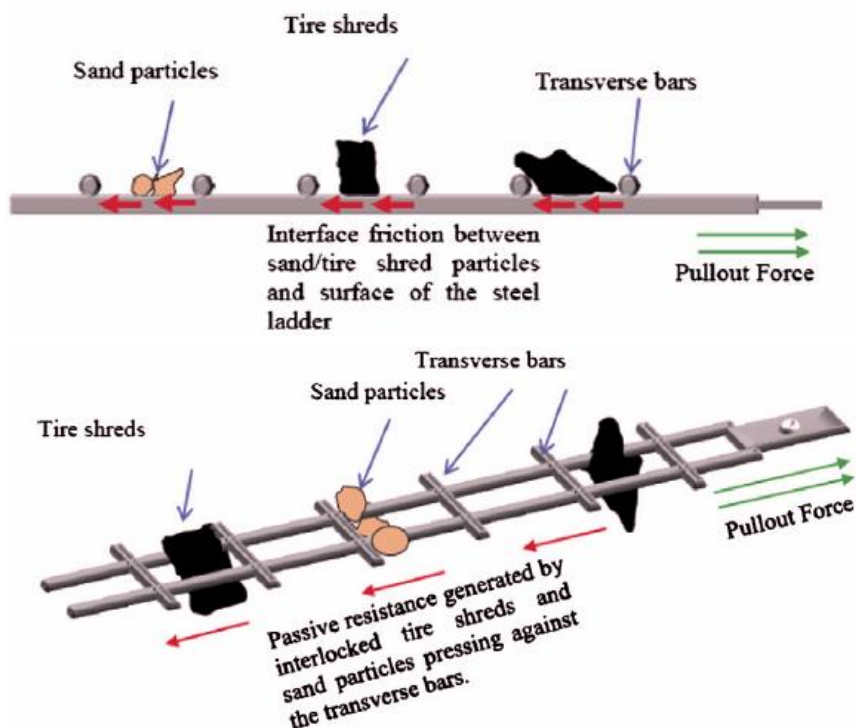


Figura 1.5.4 Il·lustració del mecanisme de desenvolupament de la resistència a l'extracció del reforç: fricció de la interfície i resistència passiva produïda per l'enclavament de les partícules amb el reforç. (Font: *Pullout capacity of ladder-type metal reinforcements in tire shred-sand mixtures*).

2. ASSAIGS D'EXTRACCIÓ DE REFORÇOS EN EL TERRENY

El principal tema d'estudi d'aquesta tesi ha sigut la realització de 10 assaigs d'extracció de reforços metàl·lics en un mateix sòl granular (tot-u) en un caixó de proves on es pot variar les condicions de contorn del reforç, simulant així, diferents situacions d'alçades d'un mur de sòl reforçat.

Els 10 assaigs s'han repartit en 4 nivells de confinament: a $z=1, 3, 5$ i 7 metres de profunditat respecte la coronació (z descendent ↓).

A continuació s'explicarà el material utilitzat en aquesta campanya d'assaigs.

2.1 Instrumentació / Utilitatge

- Caixó de proves d'extracció

La caixa d'extracció és una caixa rígida d'acer oberta a la part superior. Les dimensions del pla són de 1250 mm de llarg, 500 mm d'ample i 850 mm d'alt (observar figura 2.1.1) capaç d'encabir $0,47 \text{ m}^3$. A la part frontal hi ha una obertura a través de la qual passa el reforç i es connecta a la placa d'ancoratge. A la part posterior també hi ha una obertura on es col·loca el sensor de desplaçament per mesurar els moviments del reforç quan es realitzen els assaigs. Les obertures es localitzen al mateix nivell d'alçada, al mig de l'alçada de la caixa, assumint la mateixa profunditat del sòl per sota i per sobre de el reforç.

La caixa disposa de dos braços frontals units per una biga en els quals el gat es troba darrera i actua com una reacció al gat per generar la força d'extracció (observar figura 2.1.2). La força d'extracció la genera un gat unifilar llarg a través de la unió de un cordó de pretesat amb la placa d'ancoratge. La placa d'ancoratge va unida al reforç mitjançant cargols i unida al cordo de pretesat mitjançant una falca.

Per evitar la influència de les condicions de contorn, es va decidir col·locar un plàstic que cobris les parets interiors del caixó per reduir l'efecte del fregament que es produeix entre el terreny i les parets.



Figura 2.1.1 Vista frontal i posterior del caixó de proves d'extracció.

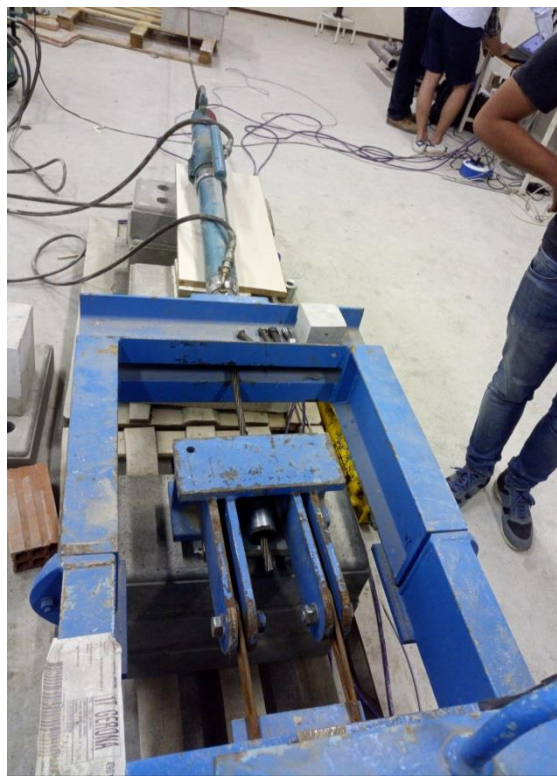


Figura 2.1.2 Vista de la placa d'ancoratge unida al reforç amb cargols i el gat unifilar connectat a la placa d'ancoratge mitjançant el cordó de pretensat unit amb una falca.

- Gat d'extracció del reforç i equip de pressió

El dispositiu de força d'extracció i la bomba de pressió (observar figura 2.1.3), ha de poder assegurar l'extracció de la mostra de tira a la caixa en cada escenari de pressió de

confinament requerit (és a dir, condició de nivell de pressió vertical), i ha de tenir la capacitat per aplicar la força d'extracció a una velocitat constant de desplaçament normalment d'1 mm / min (amb un 10% de desviació de tolerància).

El dispositiu d'extracció utilitzat ha sigut un gat unifilar llarg juntament amb el grup de pressió que acciona el gat. En el grup de pressió s'hi va instal·lar un transmissor de pressió connectat al tub hidràulic de sortida al gat per mesurar en tot moment la pressió del circuit hidràulic. A més, es va utilitzar una galga extenso-mètrica instal·lada al cordo de pretesat per mesurar la força d'extracció (observar figura 2.1.4).

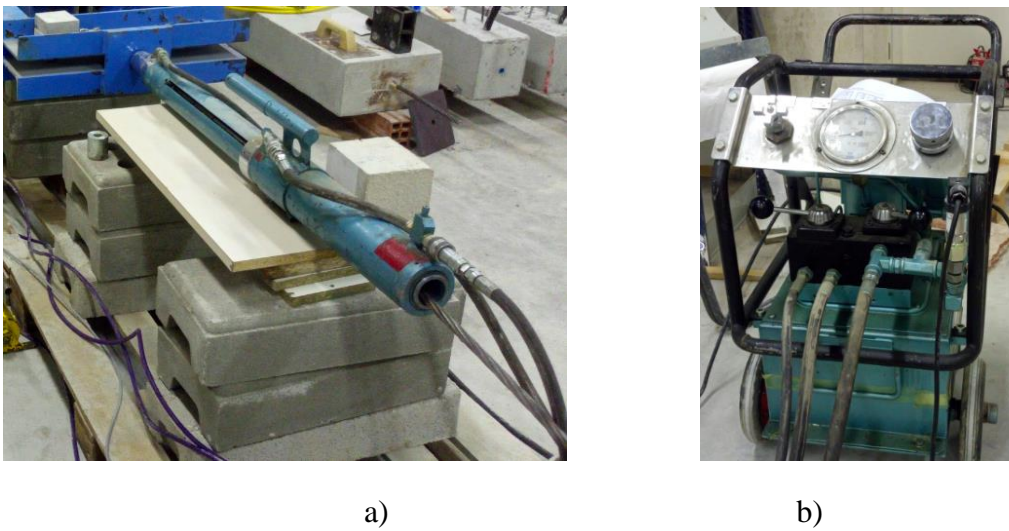


Figura 2.1.3 Gat unifilar (a) connectat al grup de pressió (b).

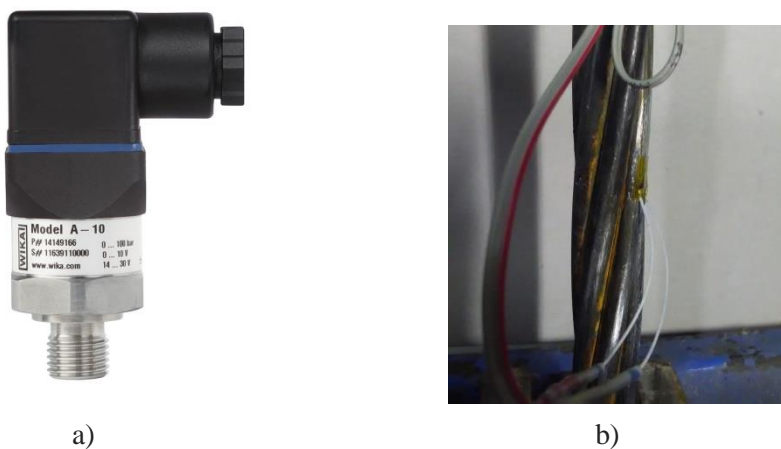


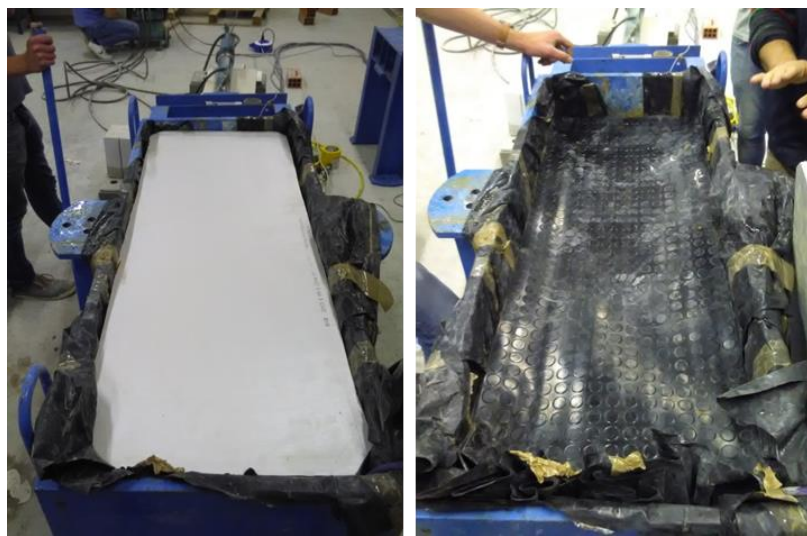
Figura 2.1.4 Lector de pressió hidràulica (a) i galga extenso-mètrica (b) (Font: www.wika.es (a)).

- Dispositiu de càrrega vertical

La pressió vertical aplicada a la capa superior del sòl ha de romandre constant i uniforme durant la prova, a més del dispositiu que aplica la càrrega vertical s'han utilitzat tres plaques de poliestirè expandit i tres làmines de goma amb la mides internes de la caixa d'assaig per cobrir tota la superfície de rebliment superior per assegurar la uniformitat de la càrrega aplicada (observar figura 2.1.5).

En els tres primers assaigs no vàlids es van realitzar amb bosses pneumàtiques però sense èxit ja que es punxaven i perdien pressió d'aire.

El dispositiu de càrrega vertical utilitzat ha sigut un gat de cilindre de baixa alçada (observar figura 2.1.6), juntament amb una cèl·lula de pressió de carrega que s'ha col·locat entre la biga de reacció i el pistó, també s'ha emprat un cilindre metàl·lic col·locat sota del gat hidràulic per adaptar correctament a l'alçada desitjada.



a)

b)

Figura 2.1.5 Il·lustració de les plaques de poliestirè expandit (a) col·locades d'amunt de les làmines de goma (b).

- Indicadors de desplaçament

El sistema de control de desplaçaments horitzontals dels reforços metàl·lics consisteix en un transductor de desplaçament electrònic (amb 0,01 mm de precisió), instal·lat a la cua del reforç, mitjançant un suport ancorat a una de les dues barres longitudinals del reforç (observar figura 2.1.7).

Es important esmentar el correcte ajust del suport, ja que el mínim moviment influiria a la lectura del desplaçament.

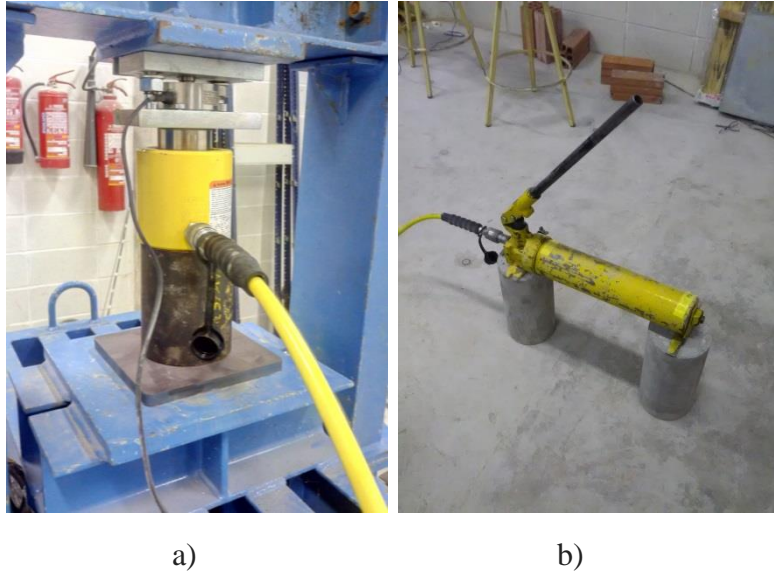


Figura 2.1.6 Dispositiu de càrrega vertical juntament amb la cèl·lula de pressió vertical i el cilindre d'adaptació (a) i la maneta d'accionament del gat (b).



Figura 2.1.7 Transductor de desplaçament electrònic.

- Sensors de pressió de terres.

Els dispositius de control de les pressions que rep el terreny consten en 3 cèl·lules de pressió de terres repartides en:

- Al fons del caixó per sota del reforç on no s'intervé fins finalitzat els assaigs ja que la terra per sota del reforç no s'extreu en repetir assaigs, aquest cèl·lula s'ha anomenat “Fons del caixó” per les pròximes gràfiques (observar figura 2.1.8).
- Una segona cèl·lula anomenada “nivell de reforç” col·locada al lateral i mateixa alçada del reforç (observar figura 2.1.9)
- Tercer i últim sensor anomenat “superfície” instal·lat sota la placa de repartiment i les plaques de poliestirè expandit i lamines de goma (observar figura 2.1.10).



Figura 2.1.8 Cèl·lula “Fons del caixó”.



Figura 2.1.9 Cèl·lula “Nivell de reforç”.



Figura 2.1.10 Cèl·lula “Superfície”.

Tal i com s’observa en la figura 2.1.10 anterior, en tot els assaigs s’ha utilitzat un garbell (N.10 de la sèrie ASTM) per instal·lar totes les cèl·lules, de manera que s’ha evitat el punxonament dels sensors de partícules grosses i la possible ruptura de les cèl·lules.

- Compactació del sòl

En tots els assaigs s’ha utilitzat un compactador de mà (observar figura 2.1.11) per a densificar el reblert del caixó de proves però, es poden utilitzar diverses eines de compactació per compactar el sòl, com a dispositius de compactació lleugera (com ara un compactador de plaques vibratòries portàtils). El material del terra de rebliment ha d’arribar a una densitat representativa i uniforme per a realitzar condicions reals en tota la superfície. Es recomana utilitzar un densímetre nuclear si es possible.

- Adquisició de dades

Per tal de convertir totes les tensions elèctriques mesurades de tots els sensors i cèl·lules i digitalitzar-les, ha fet falta un mòdul d’adquisició de dades (DAQ) que condiciona i adapta les senyals analògiques per poder-les interpretar a posteriori amb un ordinador (observar figura 2.1.13).

- Elevador de carregues

Un aspecte molt important alhora de realitzar els assaigs ha sigut poder disposar d’un carretó elevador (observar figura 2.1.14) cedit per el laboratori.

El toro mecànic utilitzat ha sigut elèctric ja que es troba en un recinte tancat i no ventilat.



Figura 2.1.11 Compactador manual.

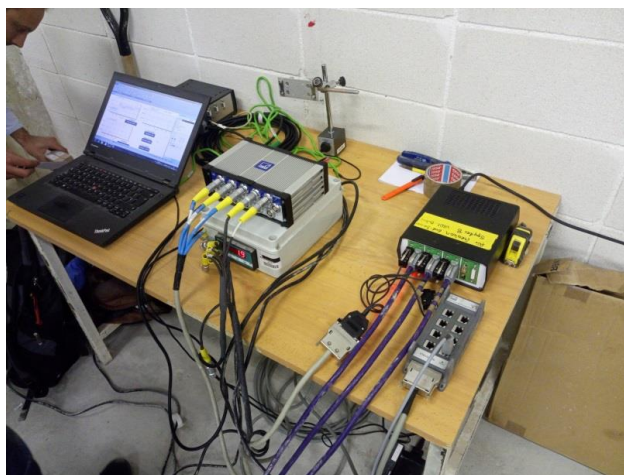


Figura 2.1.13 Conjunt mòduls d'adquisició de dades i ordinador utilitzats.



Figura 2.1.14 Carretó elevador elèctric utilitzat.

I per finalitzar l'apartat d'instrumentació, a continuació es mostra la instal·lació completa dels assaigs (figura 2.1.15). En la imatge es pot apreciar al Dr. Bathurst R.J professor d'Enginyeria Civil de la Royal Military College de Canadà, en un dia que ens va poder concedir la seva presència.



Figura 2.1.15 Imatge de la instal·lació completa dels assaigs amb la presència d'en Dr. Bathurst.

2.2 Metodologia utilitzada

L'assaig té com a objecte l'obtenció de valors reals del factor d'ancoratge (coeficients de fricció amb el sòl), el principi de l'assaig consisteix en l'aplicació d'una força de tracció horitzontal, a un reforç encastat entre dues capes de sòl dins de la caixa d'assaig (observar figura 2.2.1). A més, la metodologia que s'ha adoptat ha vingut determinada per les normes específiques actuals (ASTM 2008) (EN 2004).



Figura 2.2.1 Situació del reforç dins de la caixa d'assaig.

Els passos realitzats van ser els següents:

- Calibració de les cel·lules de pressió de terra esmentades anteriorment. Per aquest pas va ser necessari l'utilització d'una premsa amb control remot (observar figura 2.2.2) on es va poder aplicar una càrrega coneguda sobre les cel·lules i utilitzant el mètode clàssic de calibració per dos punts. És important tenir en compte la càrrega màxima per tal de no excedir i malmetre els sensors. Es va repetir el mateix procediment per totes les cel·lules de pressió de terres i la cel·lula de pressió vertical.
- Muntatge del caixó de proves en una sala ampla i amb capacitat d'espai extra per encabir els equips de monitorització, el gat hidràulic d'extracció horitzontal i respectant un espai de la mida d'un palet de fusta de 100x120cm al lateral del caixó (per a poder realitzar el reblert i l'extracció del sòl en els següents passos).



Figura 2.2.2 Premsa (a) i control remot de la premsa (b)

- Col·locació del primer sensor de pressió de terres (Figura 2.1.8).a nivell de la base del caixó amb especial cura de cobrir-lo envoltat de sorra tamisada per evitar contactes amb partícules mes grans que puguin punxonar el sensor.
- Reblert amb capes de 5-10cm degudament compactades i humidificades per assolir la màxima densitat seca possible.
- Col·locació del segon sensor de pressió de terres a nivell del reforç (Figura 2.1.9).
- Col·locació i ancoratge (a la placa d'extracció) del reforç tipus escala, amb especial atenció de deixar 10 cm de separació entre la barra transversal pròxima a l'orifici de introducció del reforç,
- Reblert de terra fins a 25 cm per sota del nivell del límit del caixó.
- Instal·lació del tercer sensor de pressió de terres (Figura 2.1.10).
- Col·locació de les plaques de poliestirè expandit i les làmines de goma per sota de la placa de repartiment (Figura 2.1.5)
- Col·locació de la tapa metàl·lica de repartiment i muntatge del pont d'ancoratge amb els cargols pertinents
- Instal·lació del transductor de desplaçament al límit del reforç tipus escala (Figura 2.1.7)
- Instal·lació del sensor de mesura de tensió al cordó de pretesat (Figura 2.1.4.b).

- Muntatge de la cèl·lula de carrega i el gat de pressió vertical (Figura 2.1.6.a).
- Connexió i monitorització de tots els sensors (Figura 2.1.13).
- Inici de l'enregistrament de les dades del assaig.
- Aplicació de la càrrega vertical amb el gat depenen del nivell d'estudi
- Un cop la càrrega vertical s'estabilitza es comença l'extracció del reforç. El gat d'extracció utilitzat es de gran potencia i es important ser precís en augmentar la força del grup de pressió i procurar realitzar un desplaçament d'aproximadament 1mm/minut
- En el moment que el reforç ha lliscat uns 4 o 5 cm aproximadament es dona per finalitzat l'assaig
- Es procedeix a realitzar el desmuntatge de la tapa metàl·lica i el pont d'ancoratge, seguidament de l'excavació de la terra fins a nivell del reforç i la retirada dels sensors per a realitzar la inspecció i extracció del reforç assajat.

2.3 Materials a assajar

2.3.1 Malles metàl·liques

Les malles de reforç a assajar estan formades per dues barres longitudinals de 8 mm de diàmetre separades en 15cm i barres transversals separades cada 15cm. A més els reforços disposen en l'extrem exterior de les barres longitudinals una volta soldada que permet la unió amb la placa d'ancoratge. (observar figura 2.3.1).

En aquesta campanya d'assaigs s'han utilitzat els mateixos reforços per cada prova realitzada, el reforços que es col·loquen en obra son d'acer galvanitzat, però en aquests assaigs s'han utilitzat reforços sense el tractament de galvanització, ja que només s'ha estudiat el comportament mecànic i no la seva durabilitat amb l'ambient.



Figura 2.3.1 Separació (15cmx15cm) de les barres que conformen els reforços utilitzats .

2.3.2 Sòl granular

El terreny utilitzat en tots els assaigs realitzats prové d'una cantera d'àrids i per tal de conèixer les propietats s'ha realitzat un assaig granulomètric i un assaig Proctor normal al laboratori del departament de geotècnia de la Universitat Politècnica de Barcelona.

- L'assaig **granulomètric** es va realitzar per via humida. A partir de la corba granulomètrica (observar figura 2.3.2) es va determinar el coeficient d'uniformitat (C_u), que mesura la condició d'uniformitat o distribució de mides i el coeficient de curvatura, que qualifica la distribució de les mides intermèdies s'ha determinat el sòl en una grava llimosa, ja que els valors extrets son: $C_u = 29,4$ i $C_c = 0,75$ (els sòls ben graduats han de complir $C_u > 6$ i $3 > C_c > 1$).

La recomanació en murs de sòl-reforç ve determinat per un àbac que agrupa un ampli conjunt de tipus de sòls (observar figura 2.3.3).

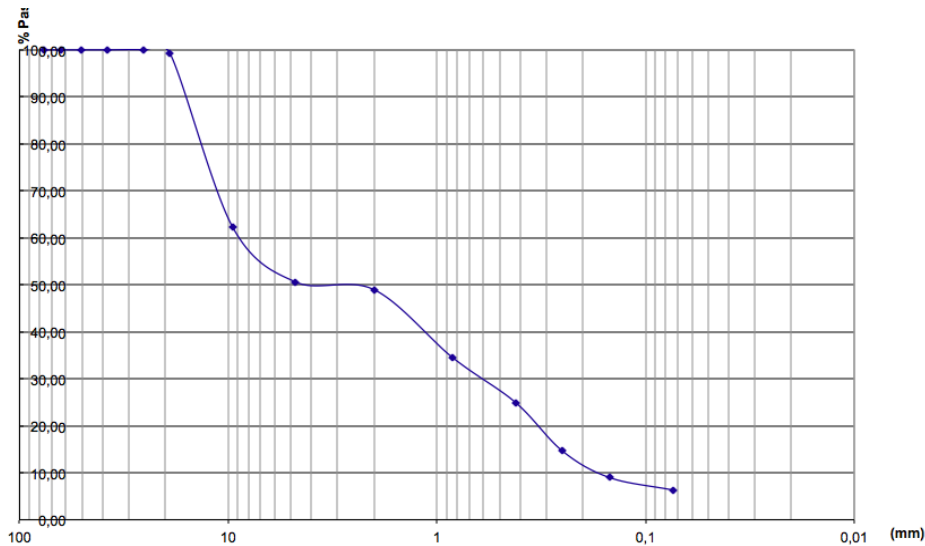
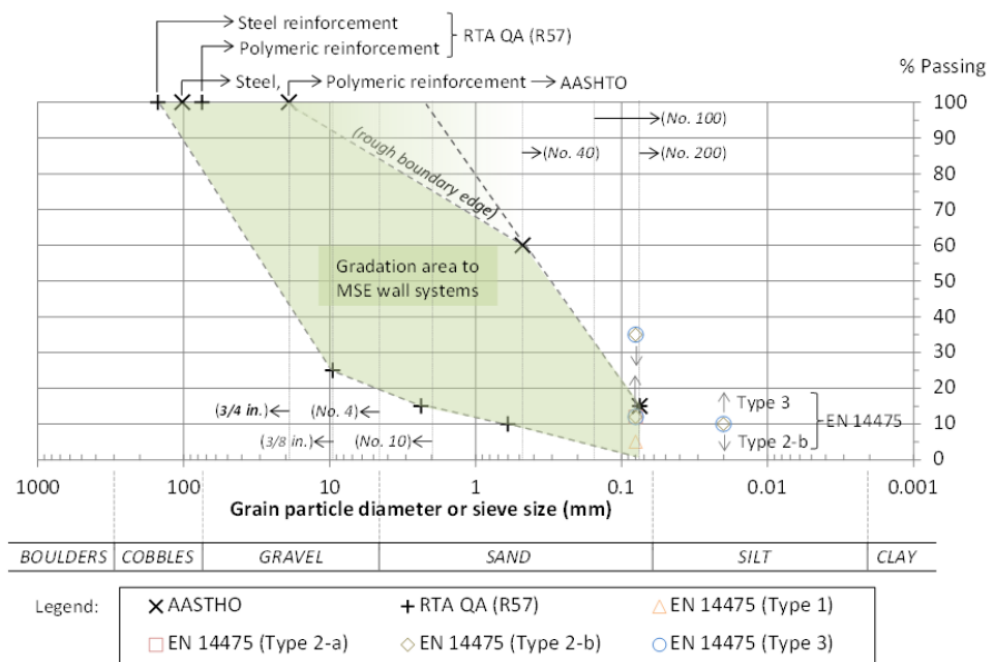


Figura 2.3.2 Corba granulomètrica del sòl utilitzat en la campanya d'assaigs.



Figura

2.3.2 Resum de criteris de gradació per a l'emplenament reforçat seleccionat segons AASHTO (1014), EN 14475 (2011), i RTA QA-R57 (2005), estàndards. (Font: Damians 2016).

- El **Proctor normal** realitzat va donar a conèixer el punt òptim d'humitat per tal d'assolir la màxima densitat seca (observar figura 2.3.3) . Es van fer dos assaigs, ja que el primer no es va poder extreure valors bons, degut a la sensibilitat de l'increment d'aigua al ser un sol granular. Els valors obtinguts van ser: Contingut d'humitat òptim (%): 7,88 % i pes específic sec màxim: 2,19 gr/cm³

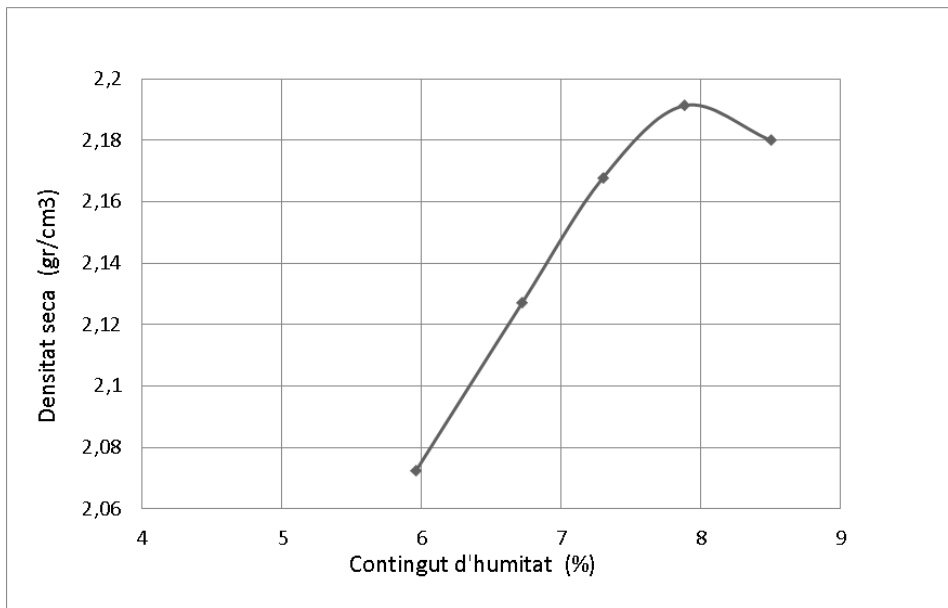


Figura 2.3.2 Gràfica de l'assaig Proctor Normal realitzat.

2.4 Desenvolupament dels assaigs

Com ja s'ha esmentat al inici del capítol, la campanya d'assaigs ha consistit en la realització de 10 assaigs idèntics en materials i preparació però, variant la pressió de confinament en 4 nivells de confinament $z = 1, 3, 5$ i 7 metres de profunditat respecte la coronació (z descendent ↓). La càrrega a aplicar mitjançant el gat de pressió vertical es va determinar mitjançant la resta del pes de les terres i la tapa metàl·lica de repartiment (que reben els reforços) al pes del nivell de terres per cada confinament (observar taula 2.4.1). Cada assaig realitzat s'ha seguit la mateixa metodologia explicada anteriorment i s'ha utilitzat un reforç nou per assaig.

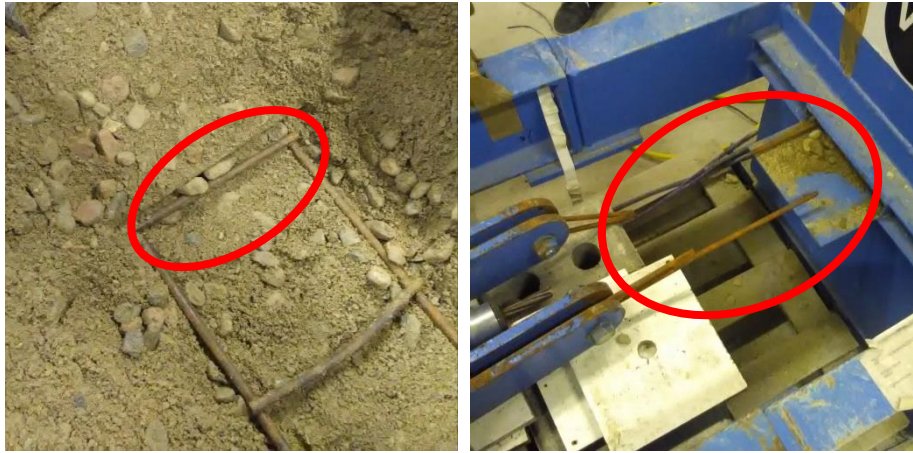
Taula 2.4.1 Càlcul de la carrega en Tn, a aplicar al gat vertical:

z (m)	σ_v (kPa)	Terra per sobre del reforç (0,25m) kN/m ²	Tapa metal·lica de repartiment kN/m ²	kN	Tn	kPa
1	20	5	3,52	5,68	0,57	9,26
3	60	5	3,52	25,48	2,55	48,15
5	100	5	3,52	45,28	4,53	83,33
7	140	5	3,52	65,08	6,51	129,63

2.5 Resolució d'incidències i refinament de la metodologia

Un dels problemes que s'ha trobat en la realització dels assaigs, ha sigut el trencament dels reforços que es produïa a causa del bloqueig amb l'orifici d'introducció dels reforços en el caixó d'assaig. L'obstrucció es donava quan partícules de sòl majors de 15mm aprox. de diàmetre interaccionaven amb la barra transversal pròxima a l'orifici i seguidament causaven un encallament (observar figura 2.2.3.a). Per evitar aquest problema es va adoptar en garantir una separació (observar figura 2.2.4) major a la d'extracció dels reforços en el moment d'assaig (10 cm mínim). Si no es respecta aquesta separació mínima es probable que el reforç trenqui per el punt d'ancoratge com va succeir en la figura 2.2.3.b

Altra incidència que s'ha trobat en la campanya d'assaigs ha sigut alhora d'instal·lar el transductor de mesura de desplaçament al final del reforç. Aquest dispositiu és altament sensible als moviments i vibracions, i per això es va proposar d'adaptar un suport (observar figura 2.2.5.a) als reforços per assegurar-nos poder mesurar el desplaçament que es produeix en el moment d'extracció. Per garantir que el transductor tampoc tingués moviments, es va elaborar un suport per instal·lar el dispositiu de mesura de desplaçament (observar figura 2.2.5.b), aconseguint així una forma estable de poder mesura els desplaçaments.



a)

b)

Figura 2.2.3 Encallament del reforç amb l'orifici d'introducció per causa del bloqueig amb partícules de sòl grosses (a) i conseqüent trencament del reforç (b).



Figura 2.2.4 Separació de 10cm mínima per evitar el bloqueig.



a)

b)

Figura 2.2.5 Suport en el reforç (a) i suport del transductor (b).

3. RESULTATS

3.1 Resistència a l'extracció

A continuació es mostrarà els resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament dels reforços utilitzats (apartat 2.3.1) i per a tots els casos de confinament plantejats: $z = 1, 3, 5$ i 7 metres de profunditat respecte la coronació (z descendent ↓).

En aquesta campanya d'assaigs es van realitzar un total de 8 assaigs malgrat el 8é es va considerar no vàlid ja que va haver un bloqueig del reforç i consegüentment el trencament del propi reforç.

Els gràfics han sigut processats per mostrar desplaçaments fins a 50mm, ja que l'extracció s'ha considerat efectiva als 25mm de desplaçament. D'aquesta forma es pot observar la variació de la força d'extracció (kN) depenent del confinament al que s'ha sotmès cada reforç.

En la figura 3.1.1 següent es pot observar la gràfica d'extracció per un cas de confinament $z=1m$. En la figura 3.1.2 s'han ajuntat tots els casos de confinament en un sol gràfic per tal de poder observar la correlació que mostren entre si.

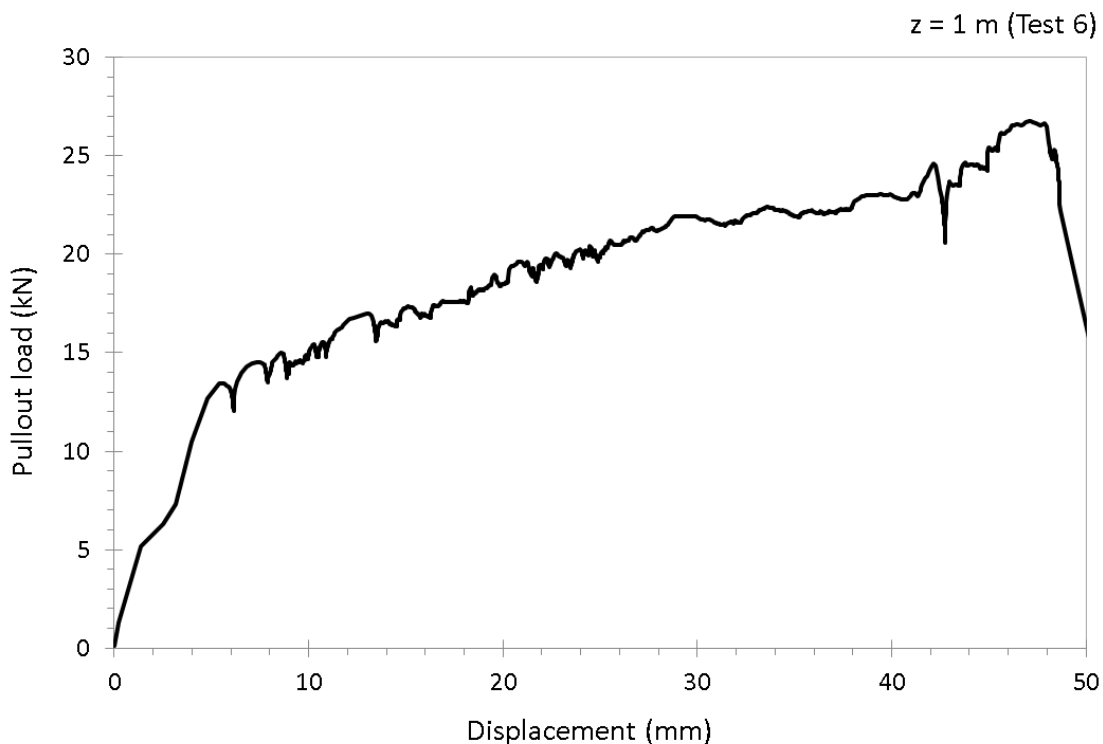


Figura 3.1.1 Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 1$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 19,84 kN

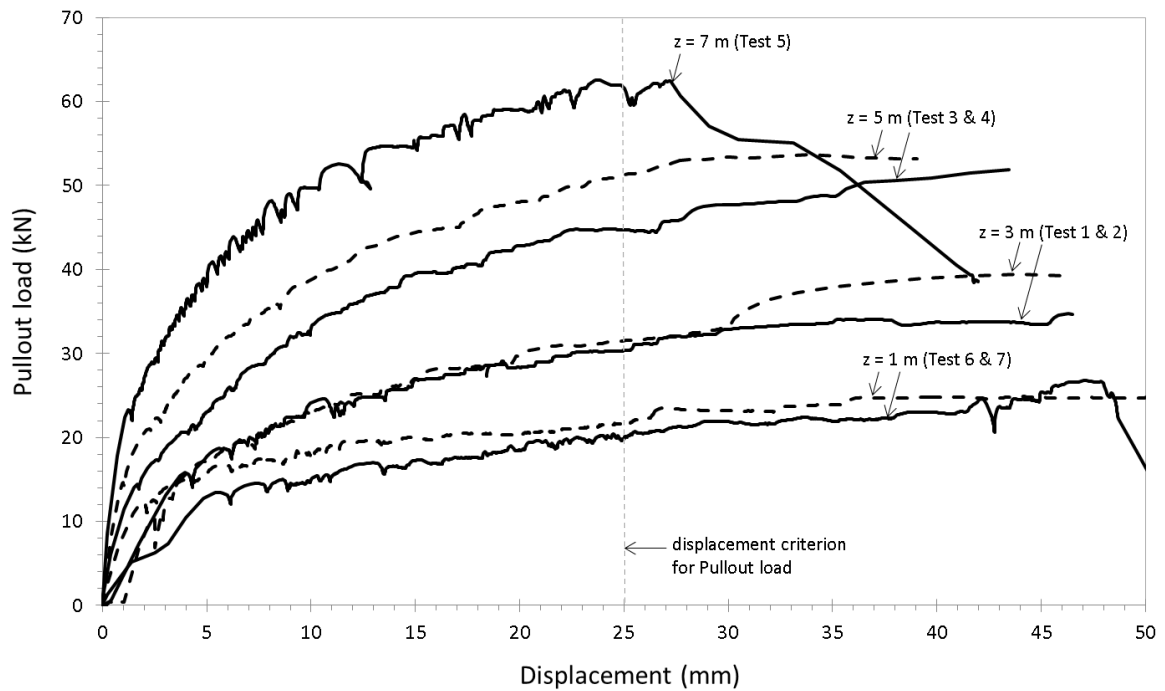


Figura 3.1.2 Resum de resultats de de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament per a tots els casos de confinament del reforç per assajats ($z = 1, 3, 5$ i 7 m).

Tal i com es pot observar en l'anterior figura 3.1.2, els resultats mostren una tendència repetible en quan assaigs d'igual confinament i una linealitat en l'augment de la força d'extracció a mesura que s'incrementa la pressió de confinament.

3.2 Pressió vertical de terres

En aquest apartat s'explicarà la importància d'instrumentar i analitzar l'evolució de les pressions de terres en els assaigs d'extracció realitzats. La cèl·lula de pressió vertical i les 3 cèl·lules de pressions de terres utilitzades, ens han donat a conèixer quina progressió es desenvolupa durant els assaigs.

Es important remarcar que la cèl·lula de pressió utilitzada en el nivell de superfície (Top en les gràfiques) no representa la pressió generada pel gat de pressió vertical, tot i haver-la calibrat al inici dels assaigs. El valor d'aquesta cèl·lula hauria de romandre per sota del valor de la cèl·lula "Nivell de reforç" (Middle en el gràfic) (observar figura 3.2.2).

El fenomen de dilatància (citada en l'apartat d'Estabilitat interna 1.3.2) s'ha pogut observar clarament en tota la campanya d'assaigs realitzats, ja que en tots ells, s'ha pogut observar un augment de pressió de les cèl·lules "Superfície" (Top) i "Fons del caixó" (Bottom) i a una disminució de pressió en la cèl·lula "Nivell de reforç" (Middle).

Aquesta relació fa referència a la figura 1.3.2.5 citada anteriorment i represa a continuació figura 3.2.1:

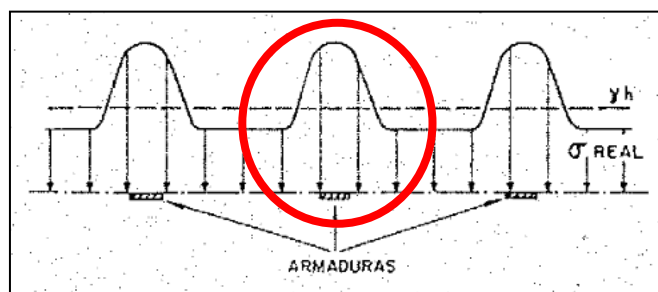


Figura 3.2.1 Variació de la tensió vertical produïda per la dilatació generada pel cisallament dels reforços que influeixen a les cèl·lules Top i Middle (Font: MOPU-DGC 1994).

La cèl·lula “Nivell de reforç” (Middle) disminueix ja que s’ha instal·lat paral·lelament al reforç i per tant percep una disminució de la tensió vertical. Anàlogament succeeix a la inversa en les cèl·lules instal·lades inferior i superiorment al nivell de reforç, aquestes reben l’increment de tensió vertical degut a la dilatació generada pel cisallament del reforç.

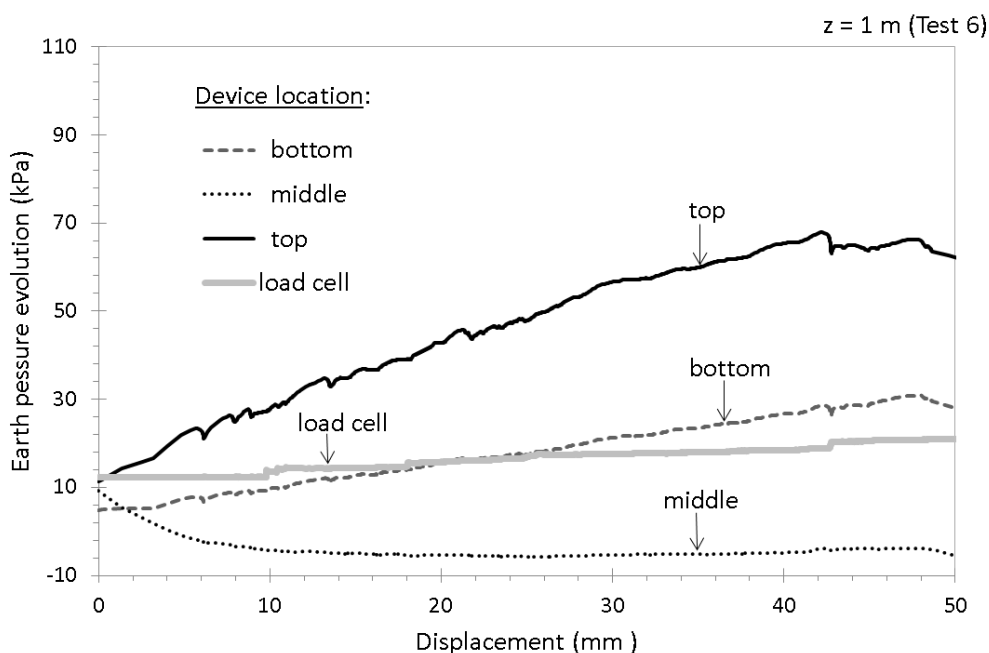


Figura 3.2.2. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 1$ m de confinament.

En les anteriors figures es pot apreciar on la cèl·lula de pressió vertical (Load Cell) roman força constant a la pressió de confinament de $z = 1$ m, això succeeix ja que la cèl·lula esta situada fora del caixó i per tant fora del medi on es propaga l'increment de pressió degut a la dilatància. La placa de reacció que va muntada sobre del terreny impedeix que la cèl·lula pugui captar aquest increment de pressió, ja que la placa de reacció pesa 190 Kg que traduïts a pressió resulten 3448,15 kPa sobre el terreny, i les oscil·lacions de la cèl·lula de pressió vertical (Load Cell) no superen els 100 kPa.

3.3 Factor d'interacció sòl-estructura

La interacció sòl-estructura ve general i conceptualment definida com a funció de la interacció sòl-sòl o resistència al tall del mateix sòl. D'aquesta manera, es defineix C_i com al coeficient d'interacció sòl-reforç, és a dir, $C_i = \tan(\delta_i) / \tan(\phi)$ (que típicament varia de 0.4 a 1.0, és a dir, essent el seu màxim la mateixa interacció sòl-sòl) defineix el comportament que succeeix en lliscar tangencialment el reforç (encastat) en el terreny. Essent δ l'angle d'interacció entre el reforç i el sòl, i ϕ l'angle de fregament intern del sòl.

La resistència a la extracció (P_r) d'un element de reforç encastat al sòl es defineix com:

$$P_r = 2 w L_e \sigma_n f$$

A on:

- $2w$ correspon a les dues superfícies de lliscament d'un element de reforç tipus banda (w és l'ample del reforç o de la banda);
- L_e és la longitud del reforç a hi ha el lliscament o extracció;
- σ_n és al pressió normal al pla de lliscament;
- f és el factor de resistència tangencial de la interacció, definit com a:

$$f = \tan \delta = C_i \tan \phi$$
 equivalent amb el coeficient d'interacció C_i ja comentat.

La relació entre l'angle de fricció de la interacció del reforç i l'angle de fricció del sòl es pot definir com un ràtio que varia en la profunditat a causa del confinament en que està sotmès.

Per a demostrar que els valors d'interacció del reforç son superiors al propi fregament del terreny, ja que la norma AASHTO no contempla la resistència passiva dels elements

transversals dels reforços, s'ha decidit extreure els valors δ dels assaigs realitzats a partir de la relació (observar taula 3.3.1):

$$\delta = \tan^{-1}(F^*)$$

Taula 3.3.1. Valors de F^* i δ per cada nivell d'assaig:

Z (m)	$F^* = Pr/CwLe\sigma v$	δ
1	3,15	72,38
1	3,11	72,18
3	1,60	57,99
3	1,67	59,08
5	1,42	54,84
5	1,63	58,47
7	1,37	53,87

A continuació es suposarà l'angle de fregament del sòl per falta d'un assaig de tall directe que el pugui determinar prenent com a valors 35° i 45° amb motiu de poder contemplar el rang dels valors descrits per la figura 3.3.1, 3.3.2 i 3.3.3

Clasificación	Angulos de fricción							
	Angulo de talud natural		Para la resistencia residual		Para la resistencia máxima			
	i (°)	Talud (vert. a hor.)	ϕ_{or} (°)	tg ϕ_{rv}	Compacidad media		Compacta	
					ϕ (°)	tg ϕ	ϕ (°)	tg ϕ
Limo (no plástico)	26	1: 2	26	0.488	28	0.532	30	0.577
	a		a		a		a	
Arena uniforme fina a media	30	1: 1.75	30	0.577	32	0.625	34	0.675
	26	1: 2	26	0.488	30	0.577	32	0.675
Arena bien graduada	30	1: 1.75	30	0.577	34	0.675	36	0.726
	a		a		a		a	
Arena y grava	30	1: 1.75	30	0.577	34	0.675	38	0.839
	34	1: 1.50	34	0.675	40	0.839	46	1.030
	32	1: 1.60	32	0.625	36	0.726	40	0.900
	a		a		a		a	
	36	1: 1.40	36	0.726	42	0.900	48	1.110

Figura 3.3.1. Resum dels angles de fregament per a la utilització en avant-projectes. (Font: *Basic Soils Engineering [B.K. Hough], 1957*).

Interface Materials	Friction Angle, δ (degrees)	Coefficient of Friction, $\tan \delta$ (dim.)
Mass concrete on the following foundation materials:		
• Clean sound rock	35	0.70
• Clean gravel, gravel-sand mixtures, coarse sand	29 to 31	0.55 to 0.60
• Clean fine to medium sand, silty medium to coarse sand, silty or clayey gravel	24 to 29	0.45 to 0.55
• Clean fine sand, silty or clayey fine to medium sand	19 to 24	0.34 to 0.45
• Fine sandy silt, nonplastic silt	17 to 19	0.31 to 0.34
• Very stiff and hard residual or preconsolidated clay	22 to 26	0.40 to 0.49
• Medium stiff and stiff clay and silty clay	17 to 19	0.31 to 0.34
Masonry on foundation materials has same friction factors.		
Steel sheet piles against the following soils:		
• Clean gravel, gravel-sand mixtures, well-graded rock fill with spalls	22	0.40
• Clean sand, silty sand-gravel mixture, single-size hard rock fill	17	0.31
• Silty sand, gravel or sand mixed with silt or clay	14	0.25
• Fine sandy silt, nonplastic silt	11	0.19
Formed or precast concrete or concrete sheet piling against the following soils:		
• Clean gravel, gravel-sand mixture, well-graded rock fill with spalls	22 to 26	0.40 to 0.49
• Clean sand, silty sand-gravel mixture, single-size hard rock fill	17 to 22	0.31 to 0.40
• Silty sand, gravel or sand mixed with silt or clay	17	0.31
• Fine sandy silt, nonplastic silt	14	0.25
Various structural materials:		
• Masonry on masonry, igneous and metamorphic rocks:		
○ dressed soft rock on dressed soft rock	35	0.70
○ dressed hard rock on dressed soft rock	33	0.65
○ dressed hard rock on dressed hard rock	29	0.55
• Masonry on wood in direction of cross grain	26	0.49
• Steel on steel at sheet pile interlocks	17	0.31

Figura 3.3.2. Llistat d'angles de fregament per a diferents materials. (Font: AASHTO, 2014. *LRFD Bridge Design Specifications (7th edition)*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.)

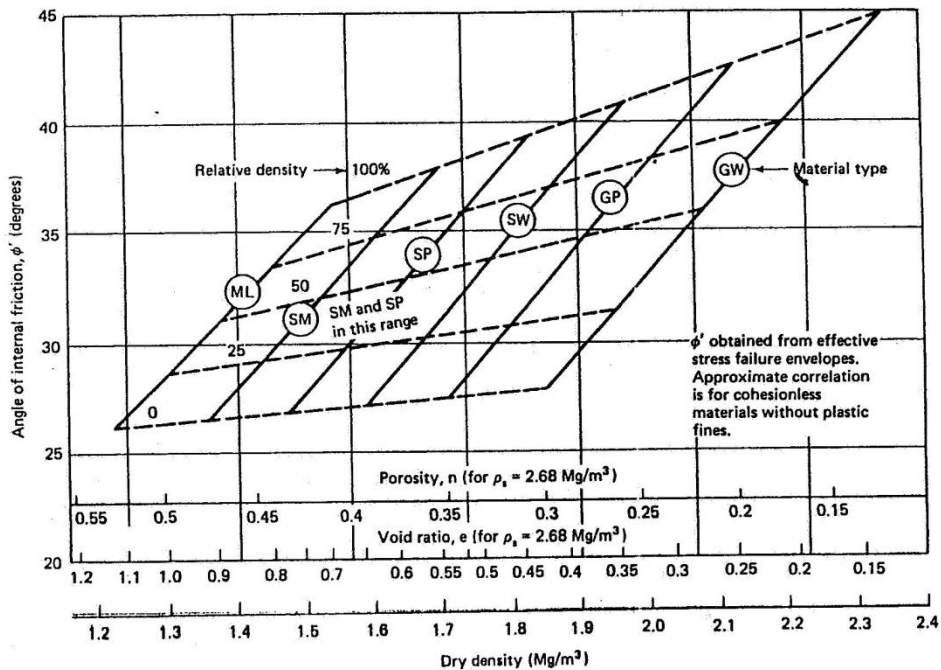


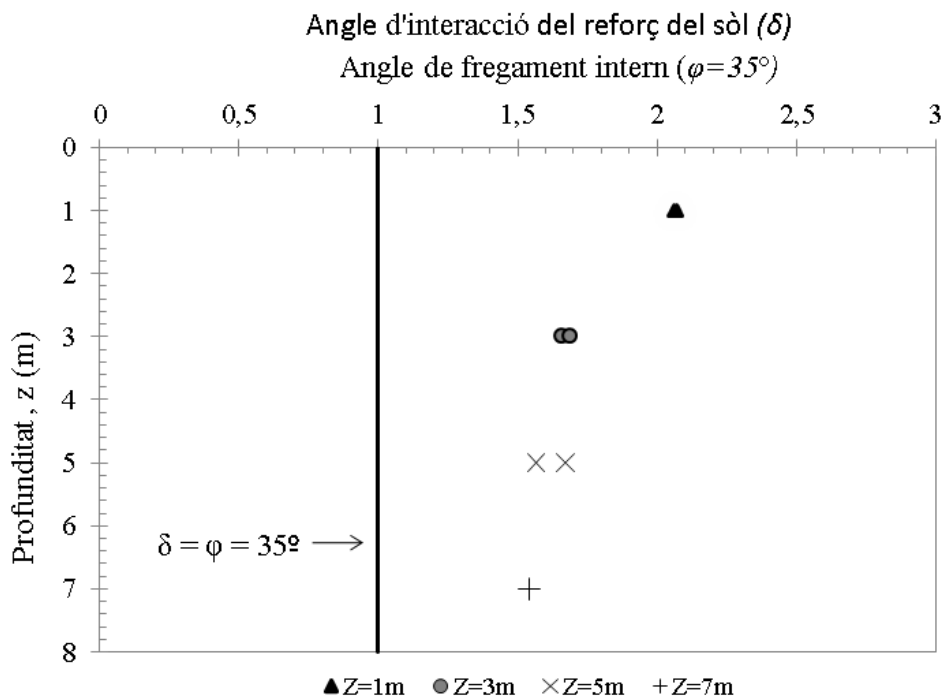
Figura 3.3.3. Gràfic que mostra la correlació de l'angle de fregament intern dels sòls amb porositat, índex de buits i densitat seca. (Font: *Soil Mechanics, Design Manual 7.1*, Department of the Navy, May 1982)

A partir dels dos valors escollits com a mínim i màxim respectivament, s'extreu els ràtios per a cada nivell de confinament (observar taula 3.3.2).

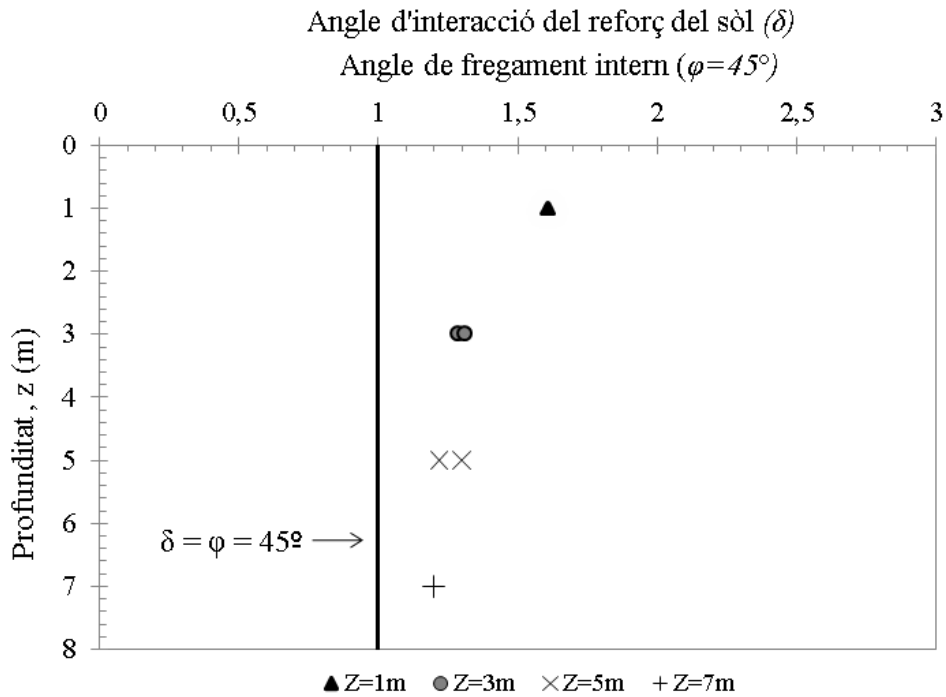
Taula 3.3.2. Valors del ràtio $[\delta / \varphi]$ per a cada nivell de confinament:

Z (m)	$F^* = Pr/CwLe\sigma v$	δ	$\delta / (\varphi = 35^\circ)$	$\delta / (\varphi = 45^\circ)$
1	3,15	72,38	2,07	1,61
1	3,11	72,18	2,06	1,60
3	1,60	57,99	1,66	1,29
3	1,67	59,08	1,69	1,31
5	1,42	54,84	1,57	1,22
5	1,63	58,47	1,67	1,30
7	1,37	53,87	1,54	1,20

Amb els valors dels ràtios δ / φ extrets s' il·lustra el comportament de les malles metàl·liques respecte la profunditat en dues gràfiques 3.3.4 per a $\varphi=35^\circ$, i 3.3.5 per a $\varphi=45^\circ$, demostrant que no es té en compte l'aportació de la resistència passiva en l'avaluació d'interacció dels reforços en el terreny.



Taula 3.3.4 Ràtio entre l'angle de fricció d'interacció del reforç i l'angle de fricció ($\varphi = 35^\circ$) per a cada nivell de confinament.



Taula 3.3.5 Ràtio entre l'angle de fricció d'interacció del reforç i l'angle de fricció ($\varphi = 45^\circ$) per a cada nivell de confinament.

3.4 Comparació amb normes

Per tal de poder valorar els assaigs realitzats a continuació es realitzarà una comparació de les dues normes citades anteriorment en l'apartat 1.4:

- Comparació amb la normativa AASHTO:

Tenint en compte que les mides del reforços utilitzats són : $L_e = 105 \text{ cm}$ i $w = 15 \text{ cm}$ (observar figura 3.4.1) podem treure'n els valors de resistència.

D'aquesta forma s'extreuen a continuació els valors de la resistència a l'extracció (P_r) i el factor de fregament (F^*) per a cada nivell de confinament (observar taula 3.4.1).

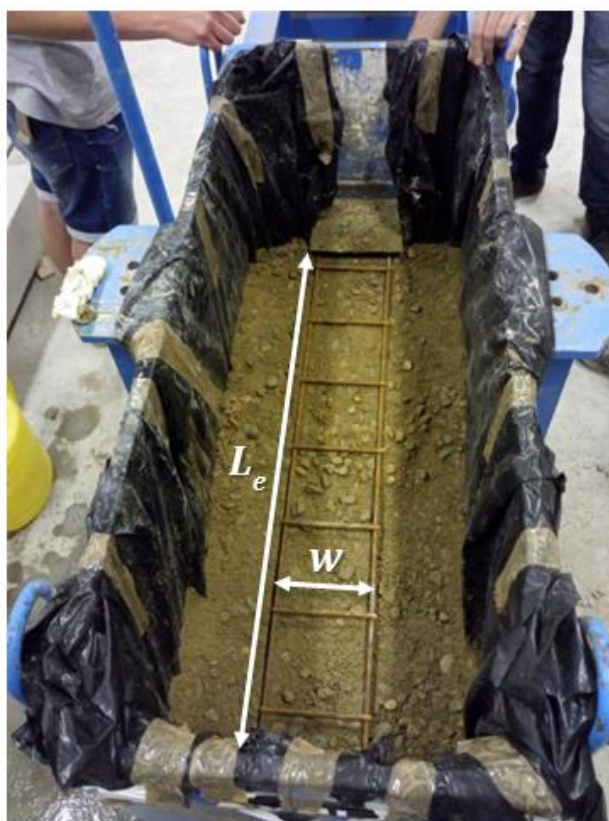


Figura 3.4.1 Dimensions L_e i w dels reforços utilitzats.

Taula 3.4.1 Valors de la resistència a l'extracció (P_r) i el factor de fregament (F^*) per tots els nivells de confinament assajats:

Test	Z (m)	Resistència a l'extracció P_r (kN)	σ_v (kPa)	C	L_e (m)	W (m)	$F^* = \frac{P_r}{C_w L_e \sigma_v}$
6	1	19,84	20	2	1,05	0,15	3,15
7	1	19,62	20	2	1,05	0,15	3,11
1	3	30,33	60	2	1,05	0,15	1,60
2	3	31,5	60	2	1,05	0,15	1,67
3	5	44,7	100	2	1,05	0,15	1,42
4	5	51,2	100	2	1,05	0,15	1,63
5	7	60,5	140	2	1,05	0,15	1,37
8	7	60	140	2	1,05	0,15	1,36

Amb tots els factors de fregament calculats es procedeix a comparar-ho amb el descrit per la normativa AASHTO 2014 en la figura 3.4.2 següent.

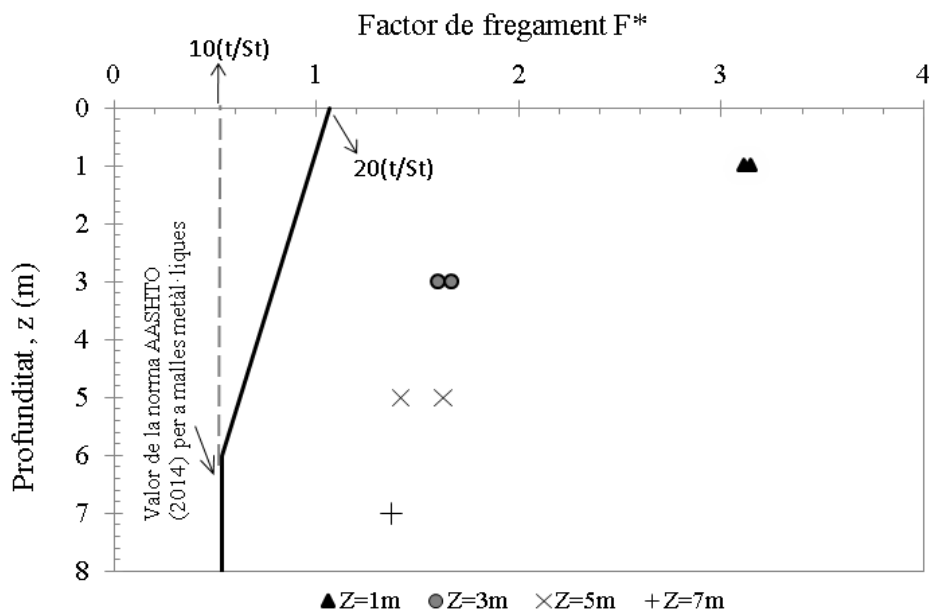


Figura 3.4.2 Comparació dels valors calculats amb el recomanat per la normativa AASHTO.

- Comparació amb la normativa NF:

Per tal de poder comparar els resultats obtinguts, es realitza el mateix procediment que s'ha seguit amb la norma americana:

La capacitat de disseny de la resistència a la interacció de sòl-reforçat de la norma francesa ($R_{f:d}$) es defineix com:

$$R_{f:d} = \frac{\tau_{max:k} P_s L_s}{\gamma_{M:f}}$$

On $\tau_{max:k}$ és la força de cisallament mobilitzada aparent i característica a un cert nivell de reforç (z_i), que es defineix com:

$$\tau_{max:k} = \sigma_{v,i} \mu_{(z)}^*$$

I recordant :

$$L_s = (n_x - 1) s_x$$

$$P_s = 2Nb$$

On n_x és el nombre de barres transversals situades a un cert nivell de reforç (z_i) dins de la zona resistent ($L_{e,i}$) i s_x és l'espaiat entre barres transversals.

I N és la quantitat d'escales (barres transversals) per metre; b l'ample de l'escala total, (sense tenir en compte sobresalts més grans que $s_y/3$ (en el cas)) i S_y correspon a l'espai entre barres longitudinals.

A continuació es mostra els valors del coeficient aparent d'interacció $\mu^*(z)$ calculats per a cada nivell de confinament assajat en la taula 3.4.2 següent i la comparació amb els valors descrits per la norma francès NF en la figura 3.4.3.

Taula 3.4.2 Valors de la resistència a l'extracció ($R_f:d$) i el coeficient aparent d'interacció ($\mu^*(z)$) per tots els nivells de confinament assajats:

Test	Z (m)	Resistència a l'extracció $R_f:d$ (kN)	σ_v (kPa)	$L_s = (n_x - 1) \cdot s_x$	$P_s = 2 \cdot N \cdot b$	$\gamma_{M:f}$	$t_{max:k}$	$\mu^*(z)$
6	1	19,84	20	0,9	1,8	1,35	16,53	0,83
7	1	19,62	20	0,9	1,8	1,35	16,35	0,82
1	3	30,33	60	0,9	1,8	1,35	25,28	0,42
2	3	31,5	60	0,9	1,8	1,35	26,25	0,44
3	5	44,7	100	0,9	1,8	1,35	37,25	0,37
4	5	51,2	100	0,9	1,8	1,35	42,67	0,43
5	7	60,5	140	0,9	1,8	1,35	50,42	0,36
8	7	60	140	0,9	1,8	1,35	50,00	0,36

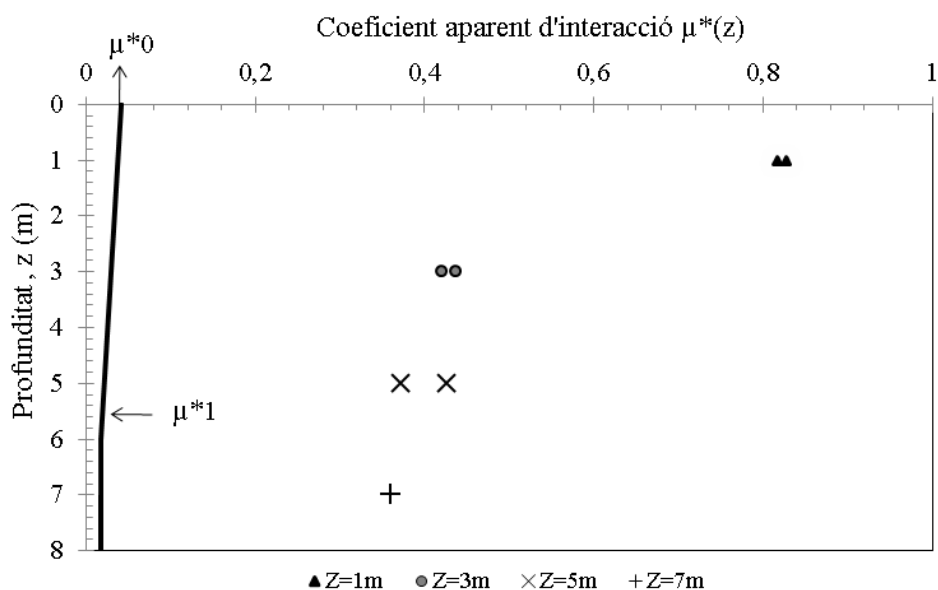


Figura 3.4.3 Comparació dels valors calculats amb el recomanat per la normativa NF.

Tal i com s'ha pogut observar tant pel cas de comparació amb la norma americana AASHTO i la norma francesa NF, es pot apreciar una clara disparitat envers amb el estipulat per norma. Els resultats obtinguts han pogut mostrar la importància de l'efecte que generen els elements transversals en quan resistència passiva, que afavoreixen clarament a contrarestar l'extracció dels reforços.

4. CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS

En aquest estudi s'ha pogut descriure la metodologia usada en la campanya d'assaigs de laboratori d'arrencament de reforços metàl·lics tipus malla, encastats en un sòl de tipus granular, instal·lat dins d'un caixó d'acer, i executats segons les normatives actuals EN 13738 (2004) i ASTM D5321 (2008). Tot i que les normatives internacionals disponibles fan referència a assaigs d'arrencament (*pull-out*) de reforços polimèrics, la metodologia seguida i utilitat emprat han resultat satisfactoris per a reforços inextensibles de naturalesa metàl·lica tipus malla (*steel ladders*).

Els resultats obtinguts han mostrat una tendència repetible per a assaigs d'igual confinament i una linealitat en l'augment de la força d'extracció a mesura que s'incrementa la pressió de confinament.

Els reforços de malla metàl·lica utilitzats han descrit un comportament òptim en la interacció amb el sòl. S'ha pogut confirmar que la tendència resistent a la interacció sòl-reforç és creixent (en termes relatius) per a estats de confinament menors, i que aquesta ve ja degudament definida i bi-linealment simplificada a les normes de referència utilitzades (AASHTO 2014 i NF P 94-270 2009) per a reforços tipus malla. També s'ha pogut comprovar que aquesta resistència ha respòs molt per sobre respecte a l'existent per defecte en aquestes normes, resultant les mateixes extremadament conservadores. Possiblement això sigui degut a que aquestes normes no contempnen adequadament la resistència passiva dels elements transversals, i que s'ha demostrat important en els estats de confinament assajats (resultant angle d'interacció obtingut molt per sobre del angle de fregament del terreny assumit).

Tot i que la resistència a la extracció necessària per a satisfer requeriments d'estabilitat ve completament definida en les normes de disseny (evidentment en funció del tipus de reforç i de sòl, així com dels nivells de confinament), pot ser convenient, en casos particulars, la realització d'assaigs de laboratori per a afinar les propietats resistents o confirmar-ne la resistència suficient. Amb l'estudi fet, sota els condicionants i components particulars assajats, donaria peu a una clara reducció de materials en fase de disseny (per exemple, amb una menor longitud de reforços per a garantir l'estabilitat interna) i, per tant, a una reducció de costos.

De cara a possibles treballs futurs, seria interessant poder realitzar canvis en la geometria dels reforços assajats (per exemple, augmentat la longitud dels elements transversals, o reduint la distància entre els longitudinals) per a intentar comprendre més a fons la resistència passiva desenvolupada i que ha demostrat ser una gran responsable de les diferències trobades respecte les normatives actuals.

5. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Abdelouhab, A, Dias, D. and Freitag, N., 2011. Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips. *Geotextiles and Geomembranes* 29: 116-129.

AASHTO, 2012. LRFD Bridge Design Specifications (6th edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.

AASHTO, 2014. LRFD Bridge Design Specifications (7th edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.

ASTM D5321, 2008. Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by Direct Shear Method. American Society for Testing Materials (ASTM International), West Conshohocken, PA, USA.

BSI, 2010. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soil and Other Fills, British Standards Institution (BSI), Milton Keynes, UK.

Damians, I.P.; 2016. Mechanical performance and sustainability assessment of reinforced soil walls. Ph.D. Thesis. Barcelona School of Civil Engineering (ETSECCPB), Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC – BarcelonaTech). Barcelona, July 2016.

EN 13738, 2004. Geotextiles and geotextile-related products – Determination of pullout resistance in soil. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.

Ingold, T. S., "Laboratory Pull-Out Testing of Grid Reinforcements in Sand," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 6, No. 3, Sept. 1983, pp. 101-111.

Jiménez et al, *Geotecnia y Cimientos II VOL. 2, REIMPR.* 1975-1981

Josa, A.; Sebastià, O.; Suriol, J; Damians, I.P. i Zornoza, JL; 2017. *Geotècnia* (apuntes de l'assignatura). Grau en Enginyeria d'Obres Públiques, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona (ETSECCPB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-BarcelonaTech). https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250230/2017/tema_07_resistencia_y_deformacion_m.pdf

Mohan et al, Pullout capacity of ladder-type metal reinforcements in tire shred-sand mixtures, 24 March 2016.

NF P 94-270, 2009. Calcul géotechnique: Ouvrages de soutènement. Remblais renforcés et massifs en soil cloué. Norme française, Association Française de Normalisation (AFNOR), La Plaine Saint-Denis, France.

Rodríguez Ortiz, J. y Hinojosa Cabrera, J. (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Weldu et al, Pullout Resistance of Mechanically Stabilized Earth Wall Steel Strip Reinforcement in Uniform Aggregate, November 2015

ANNEXES

A.1 Gràfiques de resistència a l'extracció

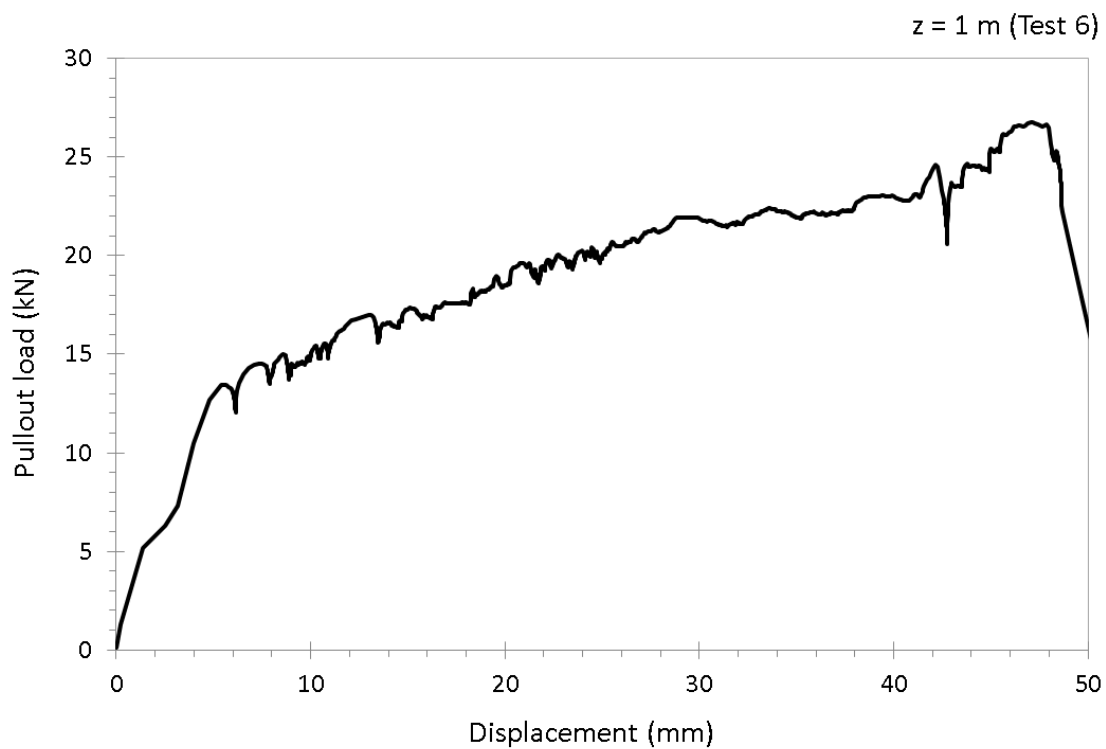


Figura A.1.1 Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 1$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 19,84 kN

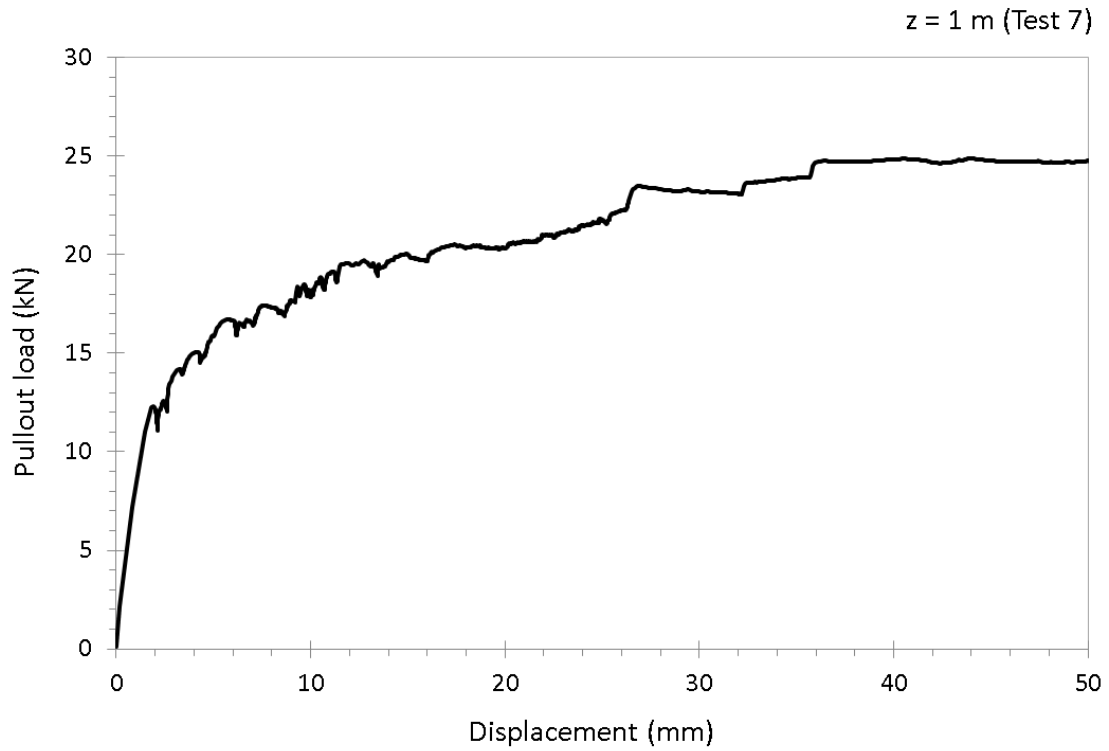


Figura A.1.2 Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 1$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 19,62 kN



Figura A.1.3. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 3$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 30,33 kN

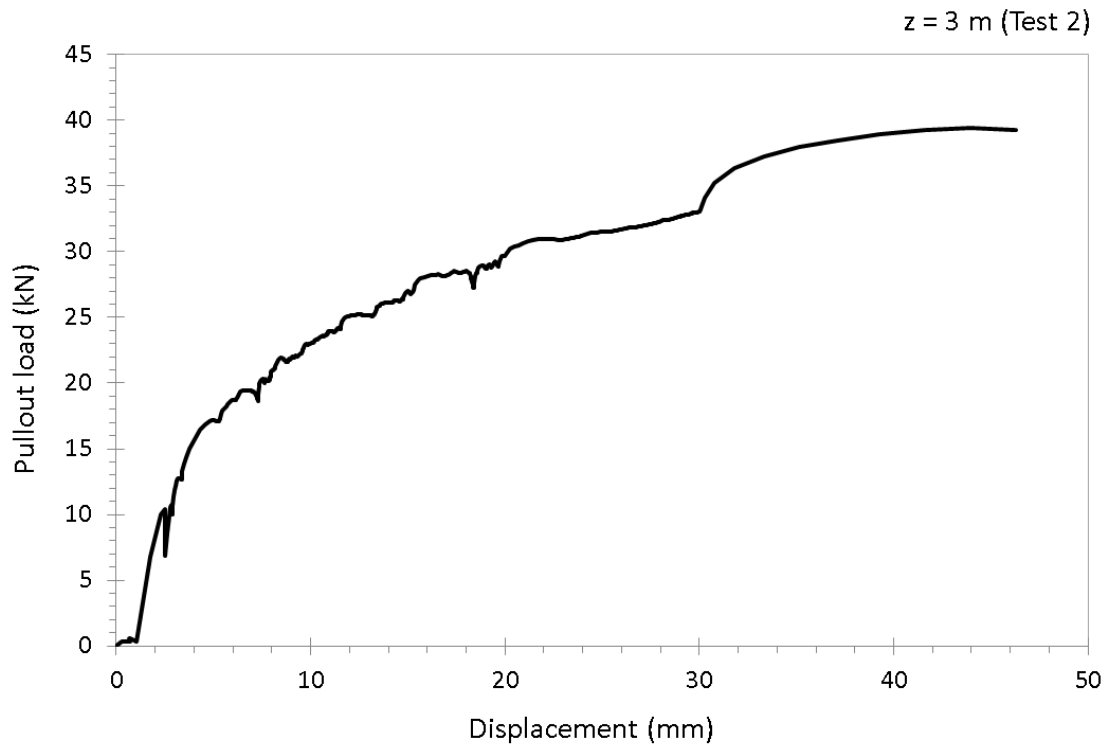


Figura A.1.4. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 3$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 31,50 kN

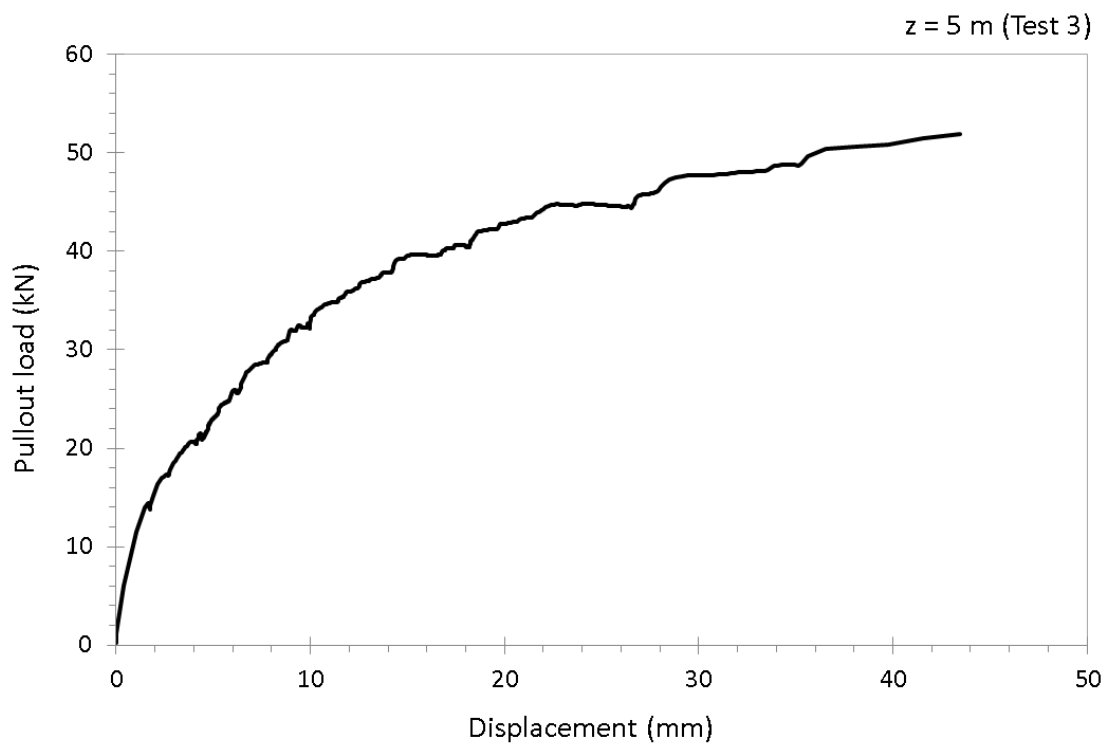


Figura A.1.5. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 5$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 44,70 kN

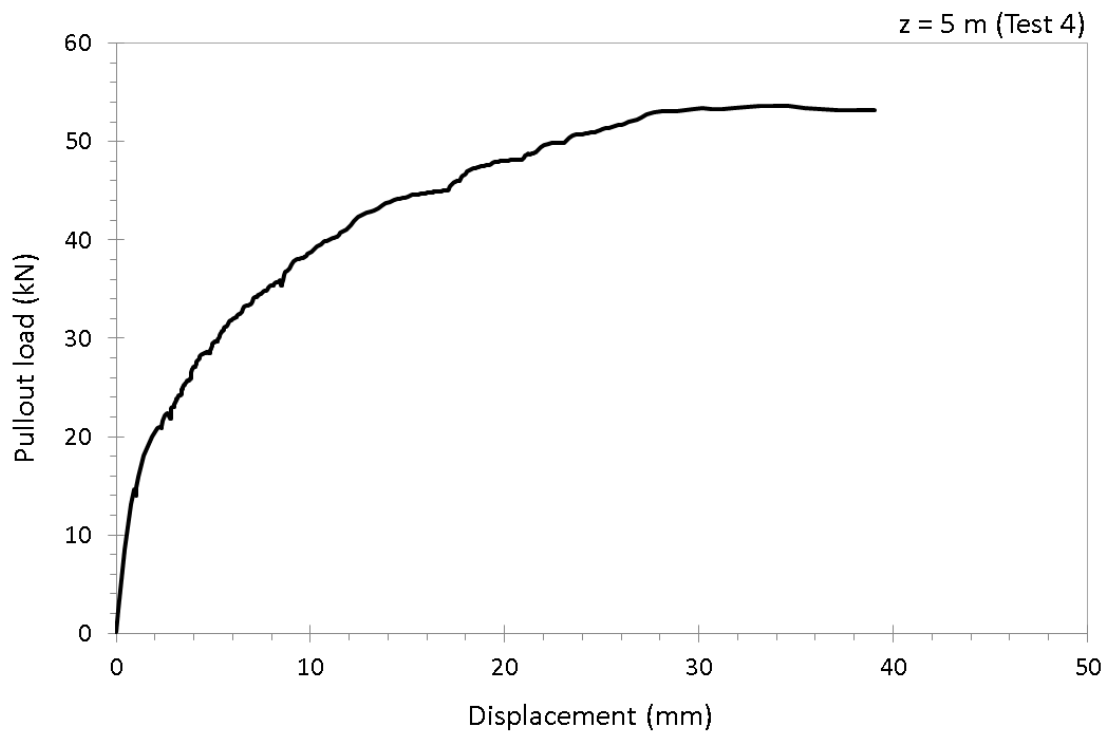


Figura A.1.6. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 5$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 51,20 kN

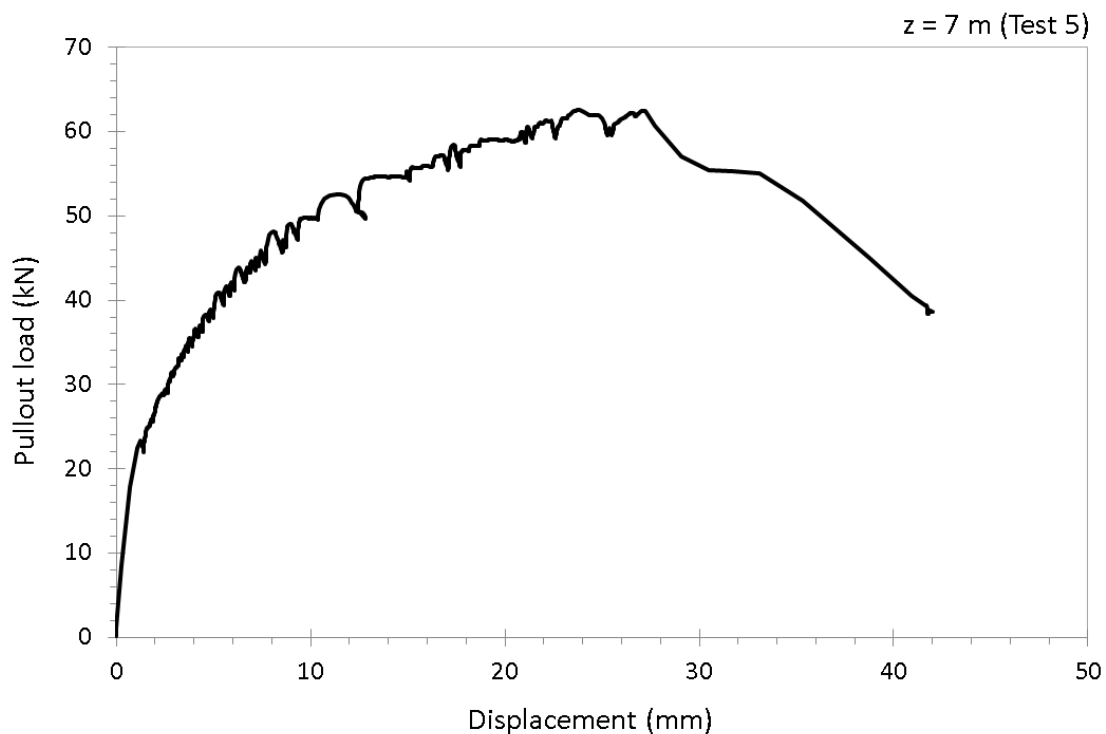


Figura A.1.7. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç per a $z = 7$ m de confinament. Força d'extracció a 25mm = 60,50 kN

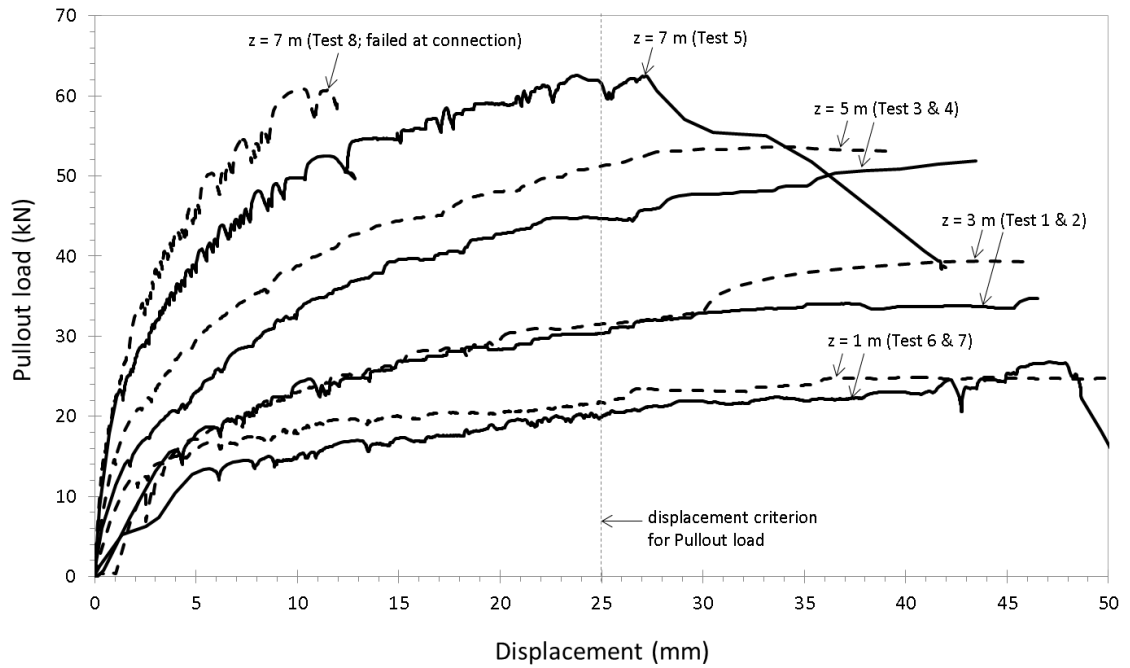


Figura A.1.8. Resultats de l'esforç d'extracció respecte al desplaçament del reforç de tots els nivells de confinament junts. Inclouent el 8é test, no vàlid per causa de ruptura en la connexió.

A.2 Gràfiques de pressions de terres

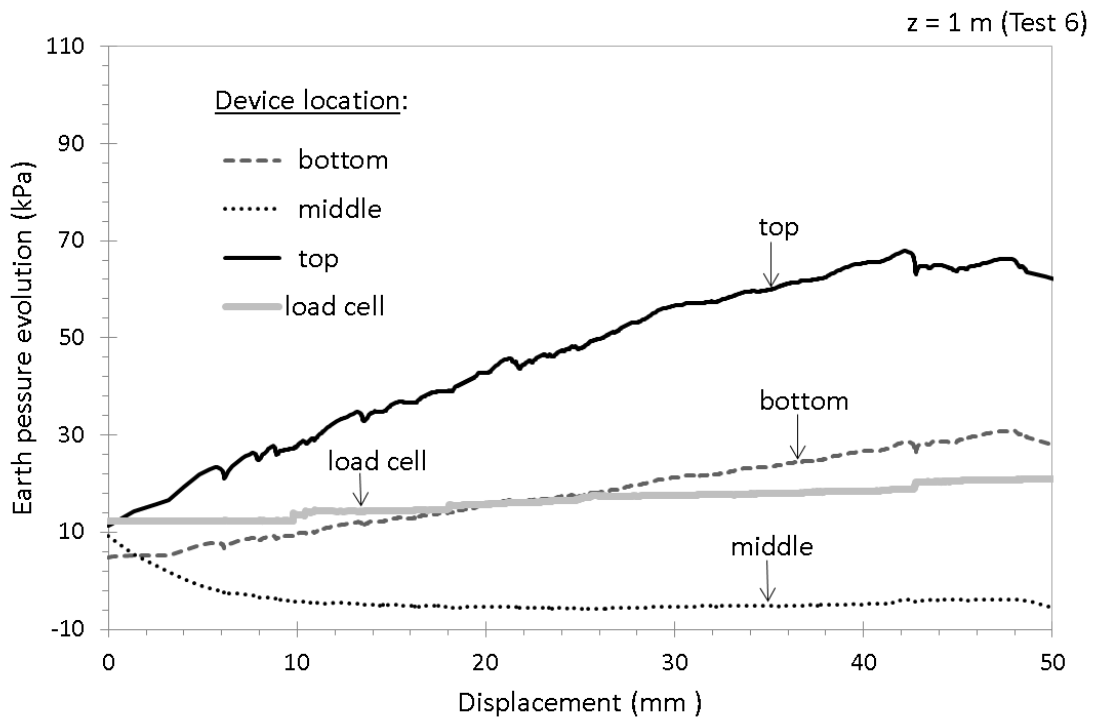


Figura A.2.6. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 1$ m de confinament

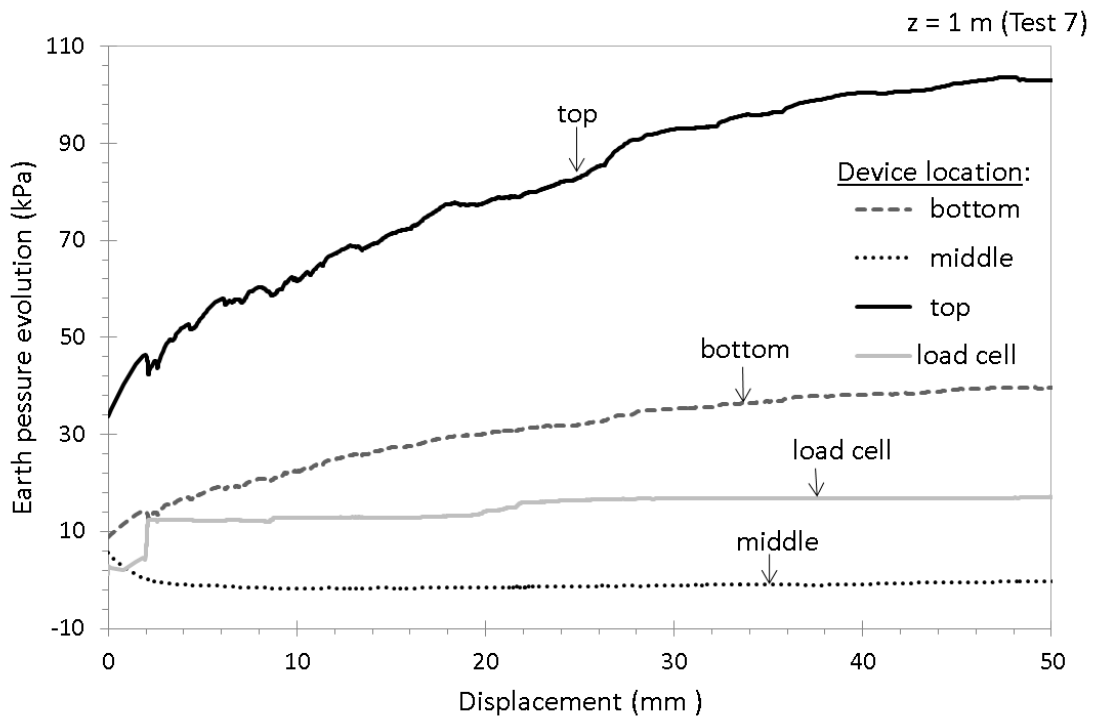


Figura A.2.7. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 1$ m de confinament

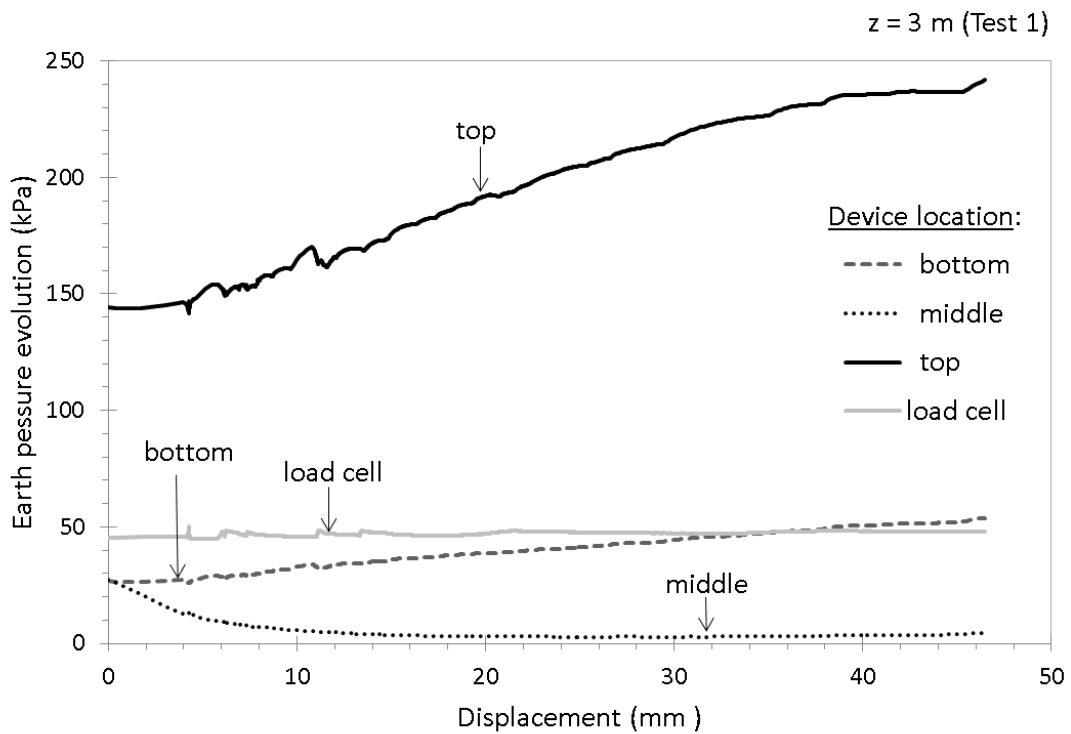


Figura A.2.1. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 3$ m de confinament.

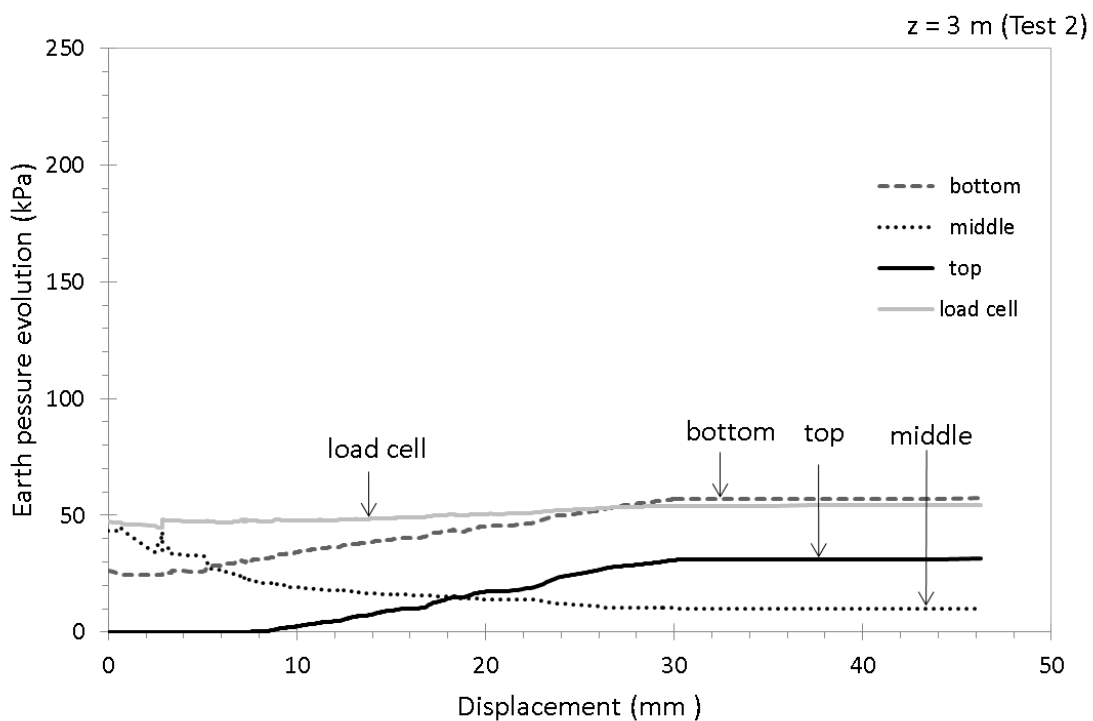


Figura A.2.2. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 3$ m de confinament.

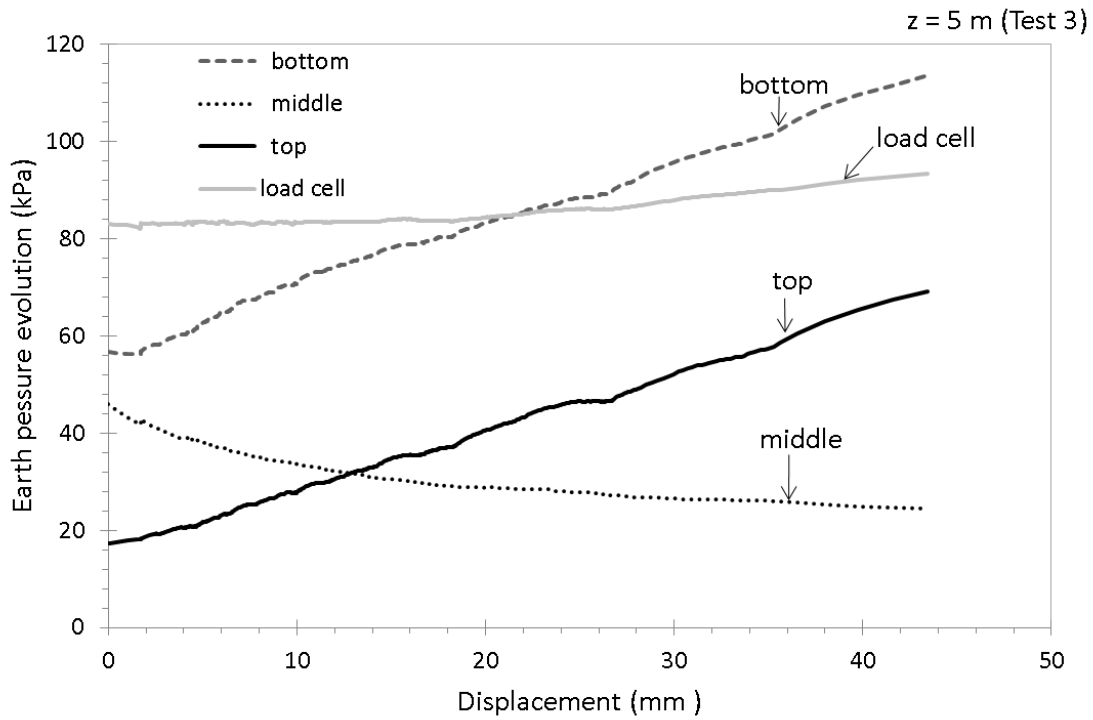


Figura A.2.3. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 5$ m de confinament.

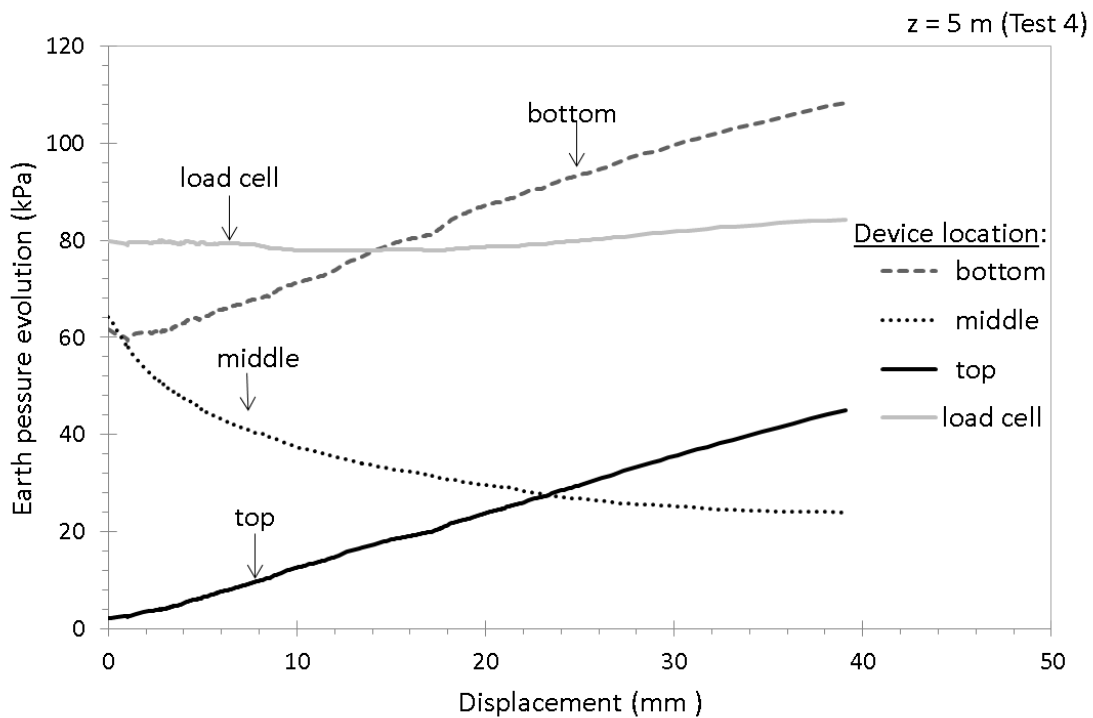


Figura A.2.4. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 5$ m de confinament

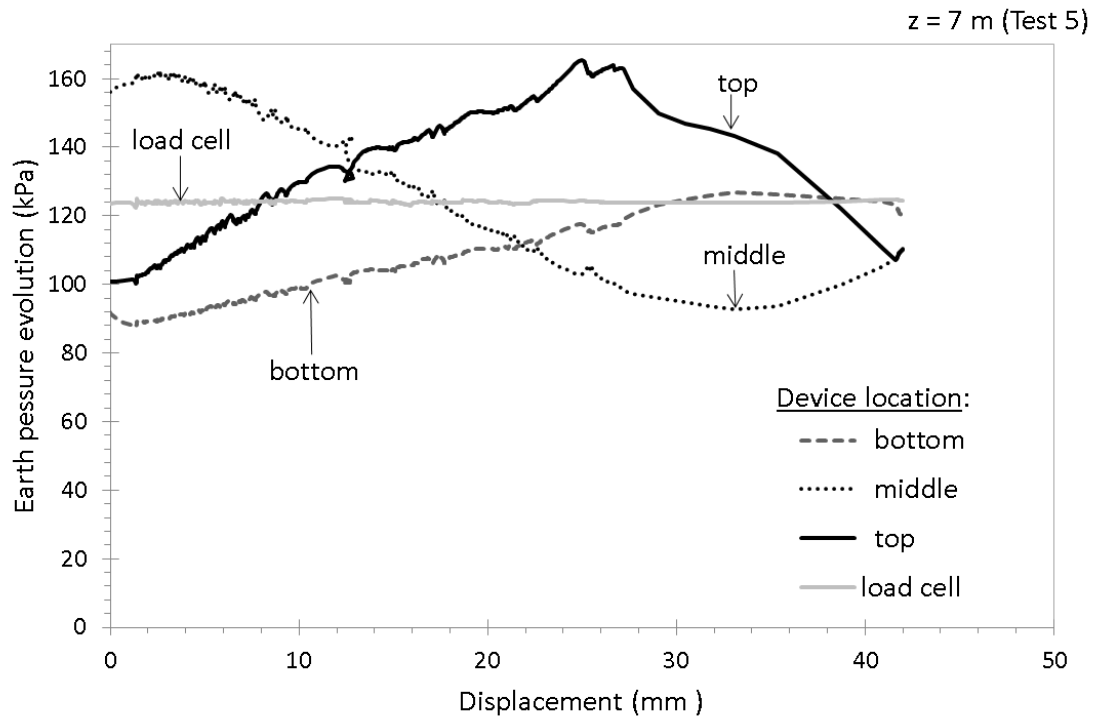


Figura A.2.5. Evolució de la pressió de terres mesurada a diferents localitzacions (altures) del terreny dins el caixó, per a $z = 7$ m de confinament

