



Universidade da Coruña

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE XEOLOXÍA
“ISIDRO PARGA PONDAL”

TESIS DOCTORAL

“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SERRINES
DE GRANITO Y ALGUNAS APLICACIONES EN
INGENIERÍA CIVIL”

por

VICTOR BARRIENTOS RODRÍGUEZ
A Coruña, Septiembre 2007

Directores:

Dr. Jordi Delgado Martín
Dr. Vicente Navarro Gámir



D. **JORDI DELGADO MARTÍN**, Profesor Titular en el Área de Ingeniería del Terreno de la Universidade da Coruña y D. **VICENTE NAVARRO GÁMIR**, Profesor Titular de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Castilla-La Mancha

HACEN CONSTAR QUE:

La memoria “**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SERRINES DE GRANITO Y ALGUNAS APLICACIONES EN INGENIERÍA CIVIL.**” ha sido realizada por D. **VICTOR BARRIENTOS RODRÍGUEZ**, bajo nuestra dirección, en el Instituto Universitario de Xeoloxía “Isidro Parga Pondal”; y constituye la Tesis que presenta para optar al Grado de Doctor en Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente de la Universidade da Coruña.

A Coruña, 16 de junio de 2007

Fdo: *Dr. Jordi Delgado Martín*

Fdo: *Dr. Vicente Navarro Gámir*

Agradecimientos

El trabajo presentado en esta tesis ha podido ser desarrollado gracias a la colaboración de distintas personas, asociaciones, organismos oficiales e instituciones a quienes esta página quiere rendir mi reconocimiento. La financiación del proyecto REN2001-08032-C02 corrió a cargo del Ministerio de Educación y Ciencia (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) y con cargo a los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER).

- Asociación Galega de Graniteiros
- Instituto Universitario de Xeoloxía “*Isidro Parga Pondal*”
- Servicios Xerais de Apoio a Investigación de la Universidade da Coruña
- Dirección Xeral de Calidade e Avaliación Ambiental, Consellería de Medio Ambiente (Xunta de Galicia)
- Dirección Xeral de Industria, Enerxía e Minas, Consellería de Innovación, Industria e Comercio (Xunta de Galicia)
- Dirección General de Industria y Energía, Consejería de Industria y Trabajo (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha)
- D. José Luís Heitzmann Hernández
- D. Jesús Herránz Areal
- D. Gumersindo Alonso Gestoso
- D. José Ángel Lorenzo Ramírez

Agradecimientos Personales

A lo largo de estos años de trabajo he tenido la suerte de encontrarme con personas dispuestas a ayudarme en todo lo posible. El primero de esta lista, como no podría ser de otro modo, es Jordi Delgado Martín, mi director de tesis, y todo un ejemplo de conocimientos, comprensión, honestidad y preocupación por todos y cada uno de los investigadores a su cargo. Es un privilegio poder trabajar y aprender con él. De la misma manera tengo que agradecer al co-director de esta tesis, Vicente Navarro Gámir, su enorme contribución en este trabajo enseñándome a comprender y utilizar los recursos y procedimientos de la Geotecnia y su hospitalidad en cada una de mis necesarias visitas a Ciudad Real.

También dentro del grupo de investigación y del aula de becarios en la que me he alojado estos años he encontrado el ambiente adecuado para poder desarrollar mi labor. Aunque algunos se hayan ido, como Ana Méndez, la mayoría comparten años de despacho conmigo. Tengo que recordar calurosamente a Bruno, Santi o Diego Alvares y a los profesores Javier Eiras y Diego Carro, el artista de la portada, y a las nuevas incorporaciones Himar Falcón y Jacobo Canal, que se han encargado de dejarme tiempo para terminar esta tesis. Aquí merece un hueco Juan Luis Pérez, compañero de ventana y que ha sido el apoyo informático que ha llevado a buen puerto toda esta colección de papeles. Pero desde luego, si alguien ha de recibir un grato y sincero agradecimiento, es mi compañera y amiga a lo largo de todos estos años, la doctora Ana Vázquez, que ha estado conmigo codo con codo en los buenos y en los malos momentos.

No puedo olvidarme de dos personas indispensables en el funcionamiento de esta Escuela, César Añón y María Recarey, cuya amabilidad y disponibilidad permanente para ayudar son dignos de elogio. Asimismo, tengo que agradecer la colaboración de los investigadores del grupo de Ciudad Real, y especialmente a Óscar Merlo, gran conocedor del laboratorio y sin cuyos trucos y consejos no habría finalizado correctamente algunos de los ensayos.

Al Instituto Geológico Universitario “Isidro Parga Pondal” y a los investigadores y profesores del Área de Ingeniería del Terreno que me han guiado y ayudado durante la realización de este doctorado.

A mis amigos, porque tengo la enorme fortuna de haberme encontrado con ellos en este viaje que llamamos vida. Gracias a todos, estéis donde estéis, por regalarme vuestra amistad, y especialmente a mi compañero Óscar que es el que ha aguantado el caos en el que un científico puede convertir una casa.

A María, por apoyarme y estar a mi lado, y por esos besos tan bonitos que nos damos.

A mi familia, a todos, porque realmente somos eso: una familia, que se quiere y se apoya, en los buenos momentos y en las tragedias, y es maravilloso sentir ese calor. Pero especialmente, tengo que dar las gracias a mis padres, a los que dedico esta tesis, por haberme educado con la necesidad de no dejar de aprender y por estar siempre ahí.

A mis padres

A Inés y Alberto

A mi abuelo Antón

ÍNDICE

1	<i>Introducción</i>	15
1.1	Resumen de contenido	15
1.1.1	Resumen	15
1.1.2	Resumo	18
1.1.3	Abstract	22
1.2	Objetivos	25
1.3	Metodología	27
1.4	Entorno socio-económico	31
2	<i>Fundamentos.</i>	35
2.1	Origen de los Serrines de Granito.	35
2.2	Legislación: Los Serrines Como Residuo.	42
2.3	Antecedentes	44
2.4	La Industria Del Granito	49
2.4.1	Granitos Ornamentales.	49
2.4.2	Yacimientos de Granito Ornamental en Galicia	53
2.4.3	Variedades Ornamentales de O Porriño	56
2.5	Entorno Geológico de O Porriño	58
3	<i>Características Hidrogeomecánicas de los Serrines de Granito.</i>	65
3.1	Naturaleza del material	68
3.2	Ensayos de Identificación.	74
3.2.1	Humedad Natural:	74
3.2.2	Densidades	75
3.2.3	Granulometría	79
3.2.4	Plasticidad. Gráfico de Casagrande y Clasificación USCS	85
3.3	Ensayos de compactación. Ensayos Proctor.	92
3.4	Índice C.B.R.	96
3.5	Ensayos Edométricos	98
3.5.1	Consolidación	98

3.5.2	Ensayo K_0	114
3.6	Resistencia al Corte	115
3.7	Otras determinaciones	126
3.7.1	Ensayos penetrométricos	126
3.7.2	Ensayo Lefranc	129
3.8	Recuperación de material magnético.	131
4	<i>Aplicación de los Serrines en Terraplenes, Rellenos y Barreras.</i>	133
4.1	Valoración resistente de los serrines de granito.	134
4.2	Uso de los serrines de granito como terraplén para carreteras. Modelo elástico multicapa.	136
4.3	Uso de los serrines en la construcción de rellenos.	143
4.4	Simulación de la Construcción de un Relleno.	149
4.5	Uso de los Serrines como Barreras Impermeables.	154
5	<i>Conclusiones</i>	159
6	<i>Relación de figuras y tablas</i>	167
6.1	Listado de figuras	167
6.1.1	Introducción	167
6.1.2	Fundamentos.	167
6.1.3	Características Hidrogeomecánicas de los Serrines de Granito.	168
6.1.4	Aplicación de los Serrines en Terraplenes, Rellenos y Barreras.	171
6.2	Listado de tablas	172
6.2.1	Fundamentos.	172
6.2.2	Características Hidrogeomecánicas de los Serrines de Granito.	173
6.2.3	Aplicación de los Serrines en Terraplenes, Rellenos y Barreras.	174
7	<i>Bibliografía</i>	177

1 INTRODUCCIÓN

1.1 RESUMEN DE CONTENIDO

1.1.1 RESUMEN

La industria de la piedra ornamental, y la del granito en particular, constituye uno de los principales sectores económicos de Galicia. En especial destaca la producción granitera del municipio de O Porriño (Pontevedra), que genera la mitad de la producción total de la región y que se ha convertido en la zona granitera más importante de España, complementada con el desarrollo de prósperas industrias de elaboración y transformación de la roca natural. Las canteras porriñesas abarcan una superficie próxima a los cuatro millones de m² de los que actualmente se están explotando, aproximadamente, 1.200.000 m². Esta localidad se encuentra al SO de la provincia enclavada entre granitos prehercínicos y hercínicos y ocupa buena parte del valle del río Louro. Hay que reseñar que las empresas elaboradoras no sólo utilizan el granito que se extrae en las canteras locales sino que también importan materia prima de más de 20 países y además, la definición comercial según la Norma UNE 22-170-85 incluye a determinados granitos ornamentales que petrológicamente no pertenecerían a este grupo de rocas ígneas en un sentido estricto, sino que se clasificarían dentro de otros tipos de rocas.

El serrín de granito es el residuo resultante de los procesos de corte y pulido de los bloques de roca y supone anualmente en la zona una cantidad cercana a los 300.000 m³. Estos bloques son extraídos de las canteras mediante perforación o voladura por barrenos y se trocean en bloques menores usando diversos procedimientos. El corte de los bloques de roca se realiza mediante telares que requieren una importante cantidad de agua, cal y granalla metálica para ser eficaces, no así las operaciones de pulido, que se llevan a cabo con discos de corona de diamante refrigerados por agua. Dadas las buenas expectativas del mercado de la roca ornamental, es interesante hallar una aplicación para el uso de estos materiales, a ser posible en grandes cantidades como pueden ser en obras civiles. Esta idea

se ve reforzada institucionalmente por el *Plan de Xestión de Residuos Industriais e Solos Contaminados de Galicia, PXRISC* (CMA, 2003) en el que se aboga por una actuación encaminada a la reducción de los residuos en origen, a la reutilización y/o reciclaje de los mismos, y, como opción menos deseable, a su vertido controlado.

Para caracterizar estos residuos se pueden usar determinados criterios marcados por las normativas europeas, españolas y autonómicas. Legalmente, según la ITR/01.0/04, de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia, los residuos de serrines son considerados como no peligrosos inertes para determinados usos lo que implica que no se requiera un acondicionamiento especial para realizar su depósito, y además el RD 1481/2001, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, incluiría los serrines como materiales aptos tras ser compactados para las capas de protección y sellado. La problemática ambiental se debe fundamentalmente al control del pH, ya que son materiales de carácter alcalino por el uso de cal en su proceso de formación, control de las concentraciones de diversos elementos, generalmente metálicos como el Cr, y control de los aspectos relacionados con la gestión de una cantidad de residuos tan importante.

Históricamente estos materiales no han sido caracterizados por completo aunque sí se han propuesto para diversos usos como la remineralización de suelos, la producción de materiales vitrocerámicos o como fuente para la extracción de feldespatos. También se han propuesto usos más relacionados con la presente tesis, como material de adición en hormigones y mezclas bituminosas o como materiales de construcción y obras, incluso como fillers minerales. En todo, caso estas aplicaciones no han logrado satisfacer a la industria porriñesa, bien por requerir un volumen bajo de materiales, o bien por suponer la movilización de los mismos, con los costes económicos adicionales que conlleva.

Para realizar el presente estudio se recogieron muestras de serrines en distintas explotaciones de la zona con la colaboración de la Asociación Galega de Graniteiros (A.G.G). Además de las muestras recogidas para analizar y ensayar en el laboratorio, se tuvo la oportunidad de acceder a un vertedero de serrines. El depósito de estos materiales a lo largo de varios años de producción en ese lugar lo ha convertido en un banco de pruebas natural para estudiar el comportamiento real in situ del relleno y obtener muestras del

mismo, mediante sondeos con recuperación de testigo, con las que poder trabajar en el laboratorio.

Con todas estas muestras disponibles se realizaron una serie de ensayos convencionales para caracterizar el material desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeomecánico. En relación con el presente estudio, estos ensayos se complementaron con la caracterización hidro y geoquímica (Vázquez, 2006), en la que se pone de manifiesto la similitud química y mineralógica de los serrines con las rocas graníticas de las que proceden.

Tras los ensayos básicos de identificación (humedad, densidades, plasticidad) se determinó que el serrín de granito es un material de grano fino (silt loam), poco plástico, con una composición mineralógica análoga a la del granito y una composición química enriquecida en compuestos de Fe y cal. La presencia de partículas de acero incrementa la densidad de las partículas sólidas y puede dar lugar, en las condiciones apropiadas, a costras de oxidación que pueden disminuir la infiltración del agua. No presentan tendencia a la expansividad ni a la corrosión de estructuras de hormigón.

Conocidos estos datos se procedió a la realización de los ensayos geotécnicos, consistentes en la verificación del comportamiento frente a la compactación de los serrines de granito y la comparación con lo observado en las muestras del relleno (Proctor), del comportamiento durante la consolidación en edómetro para deducir los parámetros de deformabilidad y del comportamiento frente al esfuerzo cortante para conocer los parámetros de estabilidad. Por otra parte también se realizaron ensayos de capacidad de soporte para conocer su aplicabilidad a firmes y pavimentos.

Se obtuvieron resultados satisfactorios en lo relativo a aplicaciones en la estabilidad de taludes (ángulo de rozamiento), consolidación o impermeabilización (permeabilidad en edómetros). Asimismo los valores del C.B.R. situarían a estos materiales dentro de los suelos tolerables. Su uso en firmes y explanadas de viales también ha sido modelizado. Utilizando técnicas desarrolladas por el equipo análogo de la UCLM situada en Ciudad Real, se simuló el comportamiento de un relleno de serrines como subcapa en un pavimento de una obra lineal y como material de préstamo en obras de tierra, obteniendo

unos resultados esperanzadores de cara al uso masivo de este material. Serían materiales marginales, según el PG-3, que podrían ser mejorados con cementos, geotextiles o una eficiente compactación.

A tenor de los resultados, los serrines de granito son un buen material de préstamo para la construcción de rellenos. También parece razonable usarlos como material de terraplén de obras lineales, ya que pueden ejecutarse terraplenes de altura moderada con asientos reducidos y sin limitaciones en el proceso constructivo. Sin embargo sería necesario utilizar aditivos estabilizantes en la zona final de la explanada para que las deflexiones generadas por cargas en superficie sean pequeñas.

La experiencia en O Porriño con serrines de granito sugiere que pueden ser buenos materiales para estabilizar y mejorar suelos, desde el punto de vista geotécnico. Los ensayos realizados pretenden conocer en profundidad el material de modo que permita idear eficientemente modelos (numéricos, a escala) que simulen los posibles usos en la ingeniería de los serrines para poder aplicarlos en el momento preciso.

Con este propósito se está realizando un modelo de comportamiento de los serrines en condiciones ambientales. Dicho modelo consiste en un recinto de $\sim 4 \text{ m}^2$ y 0.9 m de espesor que se rellenará de serrines compactados sobre los que se simularán distintas condiciones de precipitación y de donde se extraerán periódicamente muestras para evaluar su comportamiento hidrogeoquímico y geomecánico.

1.1.2 RESUMO

A industria da pedra ornamental, e a do granito en particular, constitúe un dos principais sectores económicos de Galicia. En especial destaca a produción de granito do concello do Porriño (Pontevedra), que xera a metade da produción total da rexión e que se converteu na zona graniteira máis importante de España, complementada co desenvolvemento de prósperas industrias de elaboración e transformación da rocha natural. As canteiras porriñesas abarcan unha superficie próxima aos catro millóns de m^2 , dos que, na actualidade, se están explotando, aproximadamente, 1.200.000 m^2 . Esta localidade encóntrase ao suroeste da provincia, situada entre granitos prehercínicos e hercínicos, e

ocupa boa parte do val do río Louro. Hai que salientar que as empresas elaboradoras non só utilizan o granito que se extrae nas canteiras locais, senón que tamén importan materia prima de máis de vinte países e, ademais, a definición comercial segundo a Norma UNE 22-170-85 inclúe determinados granitos ornamentais que, petroxicamente, non pertencerían a este grupo de rocas ígneas nun sentido estrito, senón que se clasificarían dentro doutros tipos de rochas.

A serradura de granito é o residuo resultante dos procesos de corte e pulido dos bloques de rocha e supón anualmente na zona unha cantidade próxima aos 300.000 m³. Estes bloques son extraídos das canteiras mediante perforación ou voadura por barrenos e tróznanse en bloques menores usando diversos procedementos. O corte dos bloques de roca realízase mediante teares que requiren unha importante cantidade de auga, cal e granalla metálica para seren eficaces, non así as operacións de pulido, que se levan a cabo con discos de coroa de diamante refrixerados por auga. Dadas as boas expectativas do mercado da rocha ornamental, é interesante atopar unha aplicación para o uso destes materiais, de ser posible en grandes cantidades, como poden ser en obras civís. Esta idea vese reforzada institucionalmente polo Plan de xestión de residuos industriais e solos contaminados de Galicia, PXRISC (CMA, 2003), no que se avoga por unha actuación encamiñada á redución dos residuos na orixe, á reutilización e/ou reciclaxe destes, e, como opción menos desexable, á súa vertedura controlada.

Para caracterizar estes residuos pódense usar determinados criterios marcados polas normativas europeas, españolas e autonómicas. Legalmente, segundo a ITR/01.0/04, da Consellería de Medio Ambiente da Xunta de Galicia, os residuos de serraduras son considerados como non perigosos, inertes, para determinados usos, o que implica que non se requira un acondicionamento especial para realizar o seu depósito e, ademais, o Real decreto 1481/2001, que regula a eliminación de residuos mediante depósito en vertedoiro, inclúe as serraduras como materiais aptos logo de seren compactados para as capas de protección e selado. A problemática ambiental débese fundamentalmente ao control do pH, xa que son materiais de carácter alcalino polo uso de cal no seu proceso de formación, control das concentracións de diversos elementos, xeralmente metálicos como o Cr, e control dos aspectos relacionados coa xestión dunha cantidade de residuos tan importante.

Historicamente estes materiais non foron caracterizados por completo, aínda que si se propuxeron para diversos usos como a remineralización de solos, a produción de materiais vitrocerámicos ou como fonte para a extracción de feldespatos. Tamén se propuxeron usos máis relacionados coa presente tese, como material de adición en formigóns e mesturas bituminosas ou como materiais de construción e obras, incluso como fillers minerais. En todo caso, estas aplicacións non lograron satisfacer a industria porriñesa, ben por requirir un volume baixo de materiais, ben por supor a súa mobilización, cos custos económicos adicionais que leva consigo.

Para realizar o presente estudo, recolléronse mostras de serraduras en distintas explotacións da zona coa colaboración da Asociación Galega de Graniteiros (AGG). Ademais das mostras recollidas para analizar e ensaiar no laboratorio, tívose a oportunidade de acceder a un vertedoiro de serraduras. O depósito destes materiais ao longo de varios anos de produción nese lugar convertérono nun banco de probas naturais para estudar o comportamento real *in situ* do recheo e obter mostras del, mediante sondaxes coa recuperación do testemuño, coas que poder traballar no laboratorio.

Con todas estas mostras dispoñibles realizáronse unha serie de ensaios convencionais para caracterizar o material dende o punto de vista do seu comportamento hidroxomecánico. En relación co presente estudo, estes ensaios complementáronse coa caracterización hidro e xeoquímica (Vázquez, 2006), na que se pon de manifesto a similitude química e mineralóxica das serraduras coas rochas graníticas das que proceden.

Logo dos ensaios básicos de identificación (humidade, densidades, plasticidade), determinouse que a serradura de granito é un material de grans finos (silt loam), pouco plástico, cunha composición mineralóxica análoga á do granito e unha composición química enriquecida en compostos de Fe e Cal. A presenza de partículas de aceiro incrementa a densidade das partículas sólidas e pode dar lugar, nas condicións apropiadas, a costras de oxidación que poden diminuír a infiltración da auga. Non presentan tendencia á expansividade nin á corrosión de estruturas de formigón.

Coñecidos estes datos, procedeuse á realización dos ensaios xeotécnicos — consistentes na verificación do comportamento fronte á compactación das serraduras de

granito e comparación co observado nas mostras do recheo (Proctor)— do comportamento durante a consolidación no edómetro para deducir os parámetros de deformabilidade e do comportamento fronte ao esforzo cortante para coñecer os parámetros de estabilidade. Por outra parte, tamén se realizaron ensaios de capacidade de soporte para coñecer a súa aplicabilidade a firmes e pavimentos.

Obtivéronse resultados satisfactorios no relativo á aplicacións na estabilidade de noiros (ángulo de rozamento), consolidación ou impermeabilización (permeabilidade en edómetros). Así mesmo, os valores do C.B.R. situarían estes materiais dentro dos solos tolerables. O seu uso en firmes e explanadas viarias tamén foi modelizado. Mediante a utilización de técnicas desenvolvidas na E.T.S. de Enxeñeiros de Camiños, Canais e Portos da Universidade de Castilla-La Mancha, simulouse o comportamento dun recheo de serraduras como subcapa nun pavimento dunha obra lineal e como material de préstamo en obras de terra, e obtivéronse resultados esperanzadores de cara ao uso masivo deste material. Serían materiais marxinais, segundo PG-3, que podían ser mellorados con cementos, xeotéxtiles ou unha eficiente compactación.

A teor dos resultados, as serraduras de granito son un bo material de préstamo para a construción de recheos. Tamén parece razoable usalos como material de terraplén de obras lineais, xa que poden executarse terrapléns de altura moderada cos asentos reducidos e sen limitacións no proceso construtivo. Non obstante, sería necesario utilizar aditivos estabilizantes na zona final da explanada para que as deflexións xeradas por cargas en superficie sexan pequenas.

A experiencia no Porriño con serraduras de granito suxire que poden ser bos materiais para estabilizar e mellorar solos, dende o punto de vista xeotécnico. Os ensaios realizados pretenden coñecer en profundidade o material, de modo que permita idear eficientemente modelos (numéricos, a escala) que simulen os posibles usos na enxeñería das serraduras para poder aplicarlos no momento preciso.

Con este propósito estase realizando un modelo do comportamento das serraduras en condicións ambientais. O dito modelo consiste nun recinto de $\sim 4 \text{ m}^2$ e 0.9 m de espesor que se reenchirá de serraduras compactadas sobre as que se simularán distintas condicións

de precipitación e de onde se extraerán periodicamente mostras para avaliar o seu comportamento hidroxoequímico e xeomecánico.

1.1.3 ABSTRACT

Dimension stone industry and, in particular granite represents one of the main economic sectors of Galicia. Granite production is concentrated around the town of O Porriño (Pontevedra), where it generates half of the total production of the region and it has become the more important granite zone of Spain. This is complemented with the development of prosperous industries of elaboration and transformation of the natural rock. The quarries in O Porriño mean an area of about 4 million of m² of which slightly more than a quarter part of them are in operation at present.

Granite quarries are located in granitic batholiths of pre-Hercynian and Hercynian age and they occupy an important part of the Louro river valley (SW of Pontevedra). It is important to emphasize that the granite workshops do not only work with rocks extracted from the local quarries but also raw material coming from more than 20 countries around the world. Moreover, the commercial definition of granite - according to the Spanish standard UNE 22-170-85- includes some ornamental rocks that, from the petrological point of view would not belong to the igneous rock group in a strict sense, but that would be classified within other types of rocks.

Granite fines are the resulting residue of processes like sawing and polishing of the rock blocks and they suppose an amount of about 300,000 m³ per year. These blocks are extracted of the quarries by means of perforation or blast by large drills. After separation from the massif, they are cut in smaller blocks using diverse procedures.

Cutting of the rock blocks is mainly made by large gang saws that, in order to properly work, require an important amount of water, lime and steel grit. Assuming the good growing perspectives for the dimension rock market, we focused our research in the application of the large quantities of saw dust generated in civil engineering projects. This approach idea is strengthened from the institutional stand point when we consider the Industrial Wastes and Contaminated Soils of Galicia Management Programme, PXRISC

(CMA, 2003) which is intended to conduct to a in origin reduction of wastes, the reusability and/or recycling of such, and, like the less desirable option, the controlled dump in landfills.

The characterization of granite saw dust is not widely covered in the scientific or technical literature. A series of uses have been proposed including the remineralization of soils, the production of vitroc ceramic materials; source for the feldspar extraction and filler for concrete and/or bituminous admixtures. In any case, these applications have not managed to satisfy the local industry, because they require a low volume of materials, or imply high costs of transport.

In order to perform our study, granite fines were sampled in different companies from O Porriño with the collaboration of the Association Galega de Graniteiros (A.G.G). In addition to this laboratory work, we had the opportunity to accede to a controlled saw dust landfill resulting from several years of operation of the largest granite manufacturer. This dump proved to be a natural laboratory where to study its in situ behaviour and where to obtain samples (core drilling with sample recovery) amenable to be characterized in the laboratory.

We performed a series of conventional tests in order to characterize all the material sampled, including their hydrogeomechanic behaviour. In relation to the present study, this geomechanic aspect was completed with the hydrogeochemical characterization (Vázquez, 2006), in which the chemical and mineralogical similarity of fines with granitic rocks is shown.

According to the ITR/01.0/04 issued by the Environmental Department of the Galician Government (Xunta de Galicia), the granite fines can be considered, for certain uses, a non-dangerous, inert waste. That makes possible its utilization in construction.

After the basic identification tests (humidity, densities, consistency limits) we conclude that granite saw dust is a fine grain material (silt loam), with low plasticity, and a mineralogical composition similar to that of granite. However, it is enriched in certain chemical elements, namely Fe and Ca, which are added in along the dressing operations. The presence of steel grit particle increases the density of solid particles and it can produce,

in the appropriate conditions, an oxidation crust that can eventually reduce the infiltration of the water. Granite saw dust do not show any tendency to expansion nor to the corrosion of concrete structures. With this basic data, we proceeded to the geotechnical characterization. Tests can be summarized in the determination of the compaction, consolidation and shear resistance properties and derived parameters. On the other hand, bearing capacity (CBR) tests were also made to ascertain their applicability in earth embankments for road construction. Satisfactory results were obtained in aspects like applications in the stability of slopes (friction angle), consolidation or waterproofing (permeability in oedometer). Also the values of the CBR would locate to these materials within tolerable soils.

According to the PG-3 instruction, granite saw dust would be a marginal material and their performance could be improved with the addition of cement, geotextiles or an efficient compaction. The use of granite saw dust in road surfaces and embankments has been also modelled by simulating a road sub-base course and an earth fill using the fines as borrow material.

According to our results, granite fines are a good borrow material for the construction of earth fills and it is also acceptable their use in road embankments of moderate height due to its limited and fast settlement. This behaviour will not limit the execution of the constructive process, what is adequate from the time and costs optimization point of view. However, it appears necessary to use some ground improver agent (i.e. lime) in the top zones of the embankment so that the deflections generated by surface loads are sufficiently small. The experience in O Porriño with granite fines suggests that these materials can be good, from the geotechnical point of view, to stabilize and to improve grounds. Hence, the results obtained o far point toward a good performance what set the grounds to perform a pilot test assay.

On the other hand, after compaction, granite saw dust would meet the specifications given for materials to be used as cover and/or liners in landfills of urban waste, according to the RD 1481/2001, which regulates the elimination of residues by means of landfilling. To test and model this application, a one-to-one scale pilot test (~4 m² and 0.9 m thickness) is being conducted at the facilities of our laboratory at present.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo básico de este proyecto es analizar la viabilidad técnica del uso de los serrines de granito en aplicaciones de ingeniería civil tales que garanticen un importante consumo de material, contribuyendo, de ese modo a resolver el problema actual del almacenamiento de este residuo y que sean susceptibles de valorizarlos económicamente. En este trabajo se pretende investigar la aplicación de los *serrines de granito* en diversos aspectos de la ingeniería civil (en general obras de tierra)

Hasta el momento, han sido descritas diversas aplicaciones para el potencial uso de los *serrines de granito*: carga de papel o plásticos, remineralización de suelos, usos refractarios y cerámicos, etc. Sin embargo, ninguna de estas aplicaciones ha sido capaz de satisfacer las necesidades del sector granitero gallego

No obstante, como paso previo, es preciso realizar un exhaustivo trabajo de caracterización de sus las propiedades, puesto que ellas condicionarán su eventual aplicación concreta. Asimismo, se estudiará la homogeneidad espacial (naturaleza de los finos generados en los distintos centros de producción) y temporal (eventual variabilidad en la generación dentro de una misma explotación).

La consecución de estos fines exige la consecución de tres objetivos básicos:

- 1) Realizar la caracterización de los serrines de granito, identificando su variabilidad espacial y temporal, producidos en los principales centros de producción de la comarca de O Porriño (Pontevedra)

Debe destacarse que, independientemente de cual sea la solución considerada óptima para el reaprovechamiento de los serrines, la planificación de su puesta en marcha pasa por haber alcanzado el primer objetivo. De ahí que éste pueda considerarse en sí mismo un logro importante.

2) Determinar los parámetros geotécnicos (y físico-químicos) que controlarán el comportamiento y durabilidad de las aplicaciones sugeridas para estos materiales. Esta es la fase experimental más extensa e incluye:

A) Ensayos de laboratorio:

--Caracterización geotécnica básica: Humedad natural, densidades, límites de Atterberg, granulometría.

--Estudio de la compactación, consolidación y deformabilidad. Descripción del comportamiento mecánico y obtención de la permeabilidad saturada en función del índice de poros.

--Estudio de los parámetros resistentes ante rotura y el comportamiento respecto al agotamiento plástico

B) Caracterización in situ de distintos parámetros geotécnicos y de comportamiento de los serrines de granito, empleando para ello el acopio que de ese material dispone una empresa de la Asociación Galega de Graniteiros en las inmediaciones de O Porriño (Pontevedra). Se realizaron ensayos hidrodinámicos, geoquímicos y geotécnicos así como se recuperó parte del testigo para ensayar en laboratorio.

Los resultados obtenidos en los ensayos in situ junto con los realizados en el laboratorio permiten establecer el comportamiento geotécnico de los serrines en relación con los usos propuestos y reunir una documentación de gran interés, no sólo para el sector productor/transformador de granito gallego, sino también para el de la construcción civil.

3) Analizar el posible uso de los serrines como material de préstamo y filler en obras de tierra. Concretamente, se pretende estudiar el comportamiento mecánico resultante de la estabilización resultante de los suelos inadecuados, marginales y tolerables (según PG3) con los serrines de granito, para ver si da como resultado suelos seleccionados o adecuados susceptibles de ser empleados en las coronaciones de los terraplenes. Para alcanzar este objetivo se deben haber completado los dos anteriores y disponer así de una amplia base de conocimiento del material.

En la presente tesis doctoral sólo se recogen aquellos datos que conforman el conocimiento geotécnico y por tanto sólo se indican los objetivos relativos a este campo. A este respecto hay que reseñar la tesis paralela a ésta realizada por D^a. Ana Vázquez González, centrada en los aspectos geoquímicos del estudio, y los análisis realizados en relación con el uso de los serrines como aditivo para mezclas bituminosas y hormigones.

1.3 METODOLOGÍA

Tras conocer los objetivos (*Introducción*), el siguiente paso es describir brevemente el diseño o idea de realización de los ensayos relacionándolos con el objetivo del proyecto. Este proyecto de investigación se inscribe dentro del contexto amplio del análisis del comportamiento de los serrines en aplicaciones identificadas como viables desde el punto de vista técnico y económico. Por ello, las aplicaciones objeto de este proyecto no agotan los potenciales usos de los serrines.

El objetivo básico de este proyecto es analizar la viabilidad técnica del uso de los serrines de granito en aplicaciones de ingeniería civil tales que garanticen un importante consumo de material, contribuyendo, de ese modo a resolver el problema actual del almacenamiento de este residuo y sean susceptibles de valorizarlos económicamente.

En este trabajo se pretende investigar la aplicación de los serrines de granito en diversos aspectos de la ingeniería civil, en general obras de tierra (rellenos y terraplenes de obras lineales).

No obstante, es preciso realizar, como paso previo, un exhaustivo trabajo de caracterización de sus propiedades, puesto que ellas condicionarán su eventual aplicación concreta. Asimismo, se estudiará la homogeneidad espacial (naturaleza de los finos generados en los distintos centros de producción) y temporal (eventual variabilidad en la generación dentro de una misma explotación).

La fase previa al comienzo de la investigación consistió en una búsqueda de documentación relacionada con este material a través de los fondos bibliográficos

disponibles, en la propia Escuela de Ingenieros de Caminos o en la Red de Bibliotecas Universitarias, y de las bases de datos científicas y buscadores existentes en Internet. Esta información se halla en el capítulo de ***Fundamentos***.

Posteriormente se ha de realizar una completa caracterización geotécnica del material mediante los ensayos convencionales en este campo. La tarea inicial fue la obtención de muestras. Gracias a la colaboración de la A.G.G., varias empresas de la zona permitieron conocer sus instalaciones y procesos productivos así como recoger muestra suficiente para realizar los ensayos. Con posterioridad se decidió utilizar la muestra M1, procedente de una de las explotaciones, como muestra de referencia de todo el proyecto. Con el fin de preservar las condiciones iniciales de formación de las tortas de serrines, las muestras procedentes de los filtros-prensa fueron inmediatamente recogidas en bolsas de plástico cerradas. En las ocasiones en las que se necesitaba gran cantidad de muestra, este procedimiento sólo se aplicó en los primeros kilogramos recogidos, ya que suponen una cantidad significativa a la hora de determinar la humedad y densidad de los serrines.

Además de las muestras recogidas para analizar y ensayar en el laboratorio, se tuvo la oportunidad de acceder a un vertedero de serrines. El depósito de estos materiales a lo largo de varios años de producción en ese lugar lo ha convertido en un excelente banco de pruebas natural para estudiar el comportamiento real in situ del relleno y obtener muestras del mismo, mediante sondeos con recuperación de testigo, con las que poder trabajar en el laboratorio.

Tras conseguir una importante cantidad de serrines, se inició el proceso de caracterización. Hay que reseñar que la recogida de muestras se efectuó en varios viajes, en función de las necesidades de material que se nos planteaban y que paralelamente a la caracterización geotécnica se realizaba un completo análisis geoquímico e hidroquímico de los serrines. Los ensayos realizados pretenden conocer en profundidad el material de modo que permita idear eficientemente modelos (numéricos, a escala) que simulen los posibles usos en la ingeniería de los serrines. Son materiales no convencionales de modo que su potencial uso requiere de una clara demostración de su capacidad para cumplir con los requisitos normativamente exigidos.

Los ensayos y determinaciones realizadas, desde ambos puntos de vista, geotécnico y geoquímico, fueron los siguientes:

Análisis químicos. La composición química de los elementos mayores de los finos ha sido determinada mediante FRX. Asimismo, se ha determinado el contenido de carbono (total, orgánico e inorgánico), y sus contenidos en Cl y SO₄.

- Análisis mineralógicos. La caracterización mineralógica se realizó mediante DRX, microscopía electrónica y ATD/TG.
- Ensayos granulométricos. La textura limo-arcillosa de los serrines determina que la clasificación mecánica convencional (tamizado) no sea aplicable. Por ello se empleó la técnica láser-COULTER.
- Determinación de humedad natural, densidad y superficie específica. Las determinaciones de superficie específica BET de los serrines de granito así como las correspondientes densidades natural y del sólido (UNE-EN 103300 y UNE-EN 103302).
- Determinación de Límites de Atterberg. (UNE-EN 103103 y UNE-EN 103104). A partir de ellos se calcularon el índice plástico y fluidez.
- Compactación. Para verificar el comportamiento frente a la compactación de los serrines de granito y comparar con lo observado en las muestras del relleno, hemos realizado distintos ensayos Próctor normal y modificado (UNE-EN 103500).
- Consolidación. Se han realizado diversos ensayos edométricos sobre muestras inalteradas y remoldeadas (UNE-EN 103405). A partir de los mismos se ha podido deducir tanto los parámetros de deformabilidad primaria, como los asociados a procesos diferidos, de gran importancia en la práctica ingenieril.

- Resistencia al corte. Se han ensayado tanto muestras remoldeadas como inalteradas a fin de determinar su resistencia al esfuerzo cortante bajo distintas tensiones verticales (UNE-EN 103401). Además se realizaron ensayos C.B.R. para conocer su aplicabilidad a firmes y pavimentos.
- Determinación de la curva de retención. Mediante ensayos realizados en cámaras con control de la humedad relativa se ha obtenido la curva de retención característica del serrín.
- Ensayos de lixiviación estática. A fin de determinar el potencial contaminante de los serrines de granito respecto de la calidad de las aguas naturales, hemos realizado una serie de ensayos y la exhaustiva determinación de especies en disolución (DIN 38414).
- Determinación del contenido de material magnético. A fin de identificar el contenido en granalla y otros materiales magnéticos (virutas de fleje) se han realizado ensayo de recuperación con imán.
- Sondeo y realización de ensayos in situ. Con el objeto de conocer el comportamiento hidrodinámico y geotécnico de los serrines depositados en un vertedero al aire libre se realizaron ensayos Lefranc, SPT, DPSH y recogida del testigo para caracterizar en el laboratorio.

La fase de caracterización, fue la más prolongada de todo el proyecto al intentar ser lo más completa posible para poder diseñar posibles usos con las mayores garantías de éxito.

Una vez obtenidas las características básicas procedimos a aplicar este conocimiento a un modelo numérico simulando aplicaciones reales. Utilizando técnicas desarrolladas por investigadores de la E.T.S. de Ingeniería de Caminos situada en Ciudad Real, se simuló el comportamiento de un relleno de serrines como subcapa en un pavimento de una obra lineal y como material de préstamo en obras de tierra. Los resultados y conclusiones de este estudio se exponen en el capítulo ***Aplicaciones***.

Por último, la investigación culmina en la elaboración de esta tesis doctoral, si bien hay otras vías de estudio abiertas y en las que se continuará trabajando. Las tesis realizadas corresponden a los dos aspectos del proyecto anteriormente citados: geotécnico y geoquímica. En ellas se recapitula toda la información, análisis, ensayos y resultados obtenidos a lo largo de la investigación y las conclusiones y aplicaciones desarrolladas.

1.4 ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

Los serrines de granito son materiales de granulometría fina (limo-arcilla) resultantes de los procesos de elaboración de rocas ornamentales de génesis ígnea. Desde principios del siglo pasado las canteras gallegas se han desarrollado, alcanzando prestigio internacional por la calidad de sus materiales y de la maquinaria de extracción y procesado de la roca. En su conjunto, la minería de rocas ornamentales de Galicia (granito y pizarra, en sentido amplio) representa el 14 % del conjunto de la actividad minera del Estado, correspondiendo a esta región el 70 % del total de producción nacional de roca ornamental (IGME, 2001). En Galicia el 50% de la producción se sitúa en la comarca pontevedresa de O Porriño. Se ha consolidado como la zona granitera más importante de España, complementada por la implantación de una variada industria de elaboración en su entorno inmediato. En esta localidad se obtuvieron los primeros bloques para su posterior elaboración en 1928 y a partir de la década de los 60-70 se dio el salto a la fama con la exportación a todo el mundo de la denominación '*Rosa Porriño*'.

En la actualidad, O Porriño posee en explotación alrededor de 40 canteras que generan unos 600 empleos directos. Las canteras porriñesas abarcan una superficie próxima a los 4 millones de m² de los que actualmente se están explotando, aproximadamente, 1.200.000 m². Recientemente, la Xunta de Galicia ha creado en esta localidad el *Centro Tecnológico del Granito* y, en un edificio anexo al mismo, estará ubicada en breve la sede de la Federación Gallega del Granito. Esta importante asociación profesional agrupa a la Asociación de Canteiras de Galicia (ACG), la Asociación Galega de Graniteiros (AGG) y la Asociación de Maquinaria para el Trabajo de la Piedra (AMTP). Dicha industria constituye uno de los pilares básicos de la economía gallega y sus perspectivas de crecimiento en el próximo decenio son muy halagüeñas.

En el capítulo de exportaciones, el granito ornamental supone aproximadamente el 7 % del total de exportaciones de Galicia, mientras que su volumen de facturación en 2004 fue de unos 270.000 M€. El número de explotaciones de granito ornamental en Galicia estaba repartido, en 1997, en un total de 352 centros de labor, los cuales dan empleo directo a alrededor de 6.500 personas e inciden indirectamente en la economía de otros 21.000 trabajadores.

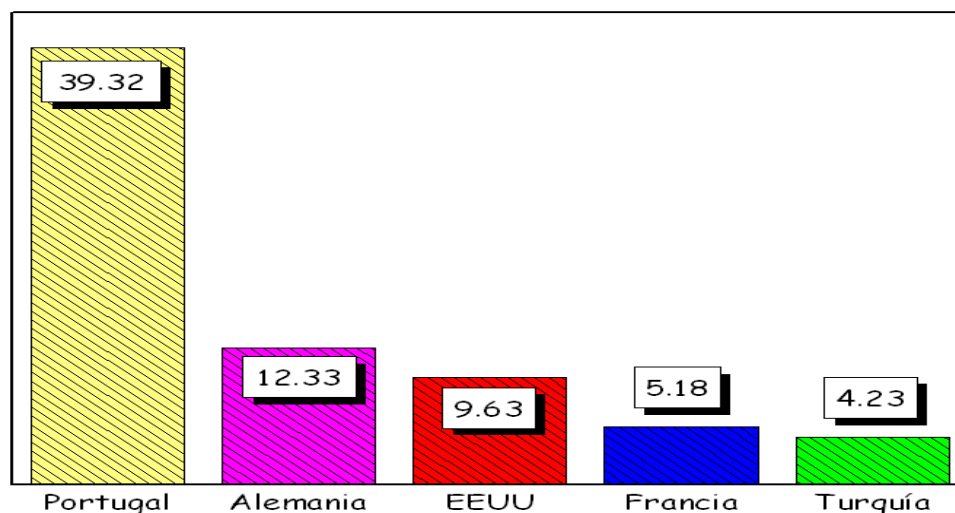


Figura 1.1. Destinos del granito gallego (Fuente A.G.G)

En volumen de exportaciones, el sector de la piedra natural es el 4º en importancia de la Comunidad Autónoma de Galicia (334 M€ en el año 2003). Los ingresos por exportaciones de granito elaborado de la provincia de Pontevedra y, singularmente, la Comarca de O Porriño constituye el 91 % del total gallego. A su vez, del total de los ingresos nacionales por exportación de granito elaborado (123.8 M€), el 60% de los mismos son gallegos (69.2 M€). La proporción de la producción de granito en bruto y elaborado en Galicia es de 0.3 a 0.7, es decir, el 70 % de las exportaciones de granito corresponden a piedra elaborada.

El sector de los productores y transformadores de granito en Galicia se ha organizado en torno a la Asociación Galega de Graniteiros (AGG), que agrupa a las 25 empresas graniteras más importantes de la región, casi todas ellas radicadas en la provincia de Pontevedra. Su actividad principal es la transformación de los bloques de granito en bruto en productos elaborados (pavimentos interiores y exteriores, elementos para fachadas transventiladas, mobiliario urbano...). Las empresas elaboradoras no sólo utilizan

el granito que se extrae en las canteras gallegas sino que también importan materia prima de más de 20 países. De ese modo, en el año 2003 las empresas gallegas importaron más de 400.000 Tm de granito en bruto, en su mayoría procedente de Portugal, Sudáfrica, Brasil, India y Noruega.

En este contexto y a lo largo de los últimos años, el sector del granito ha experimentado un importante giro estratégico a raíz de la aparición de China (y en menor medida India y Turquía) como principal país productor y elaborador de granito. Estos países ofrecen sus productos a unos precios de mercado difíciles de igualar, sobre todo teniendo en cuenta que sus procesos no están constreñidos por los estrictos controles laborales y medioambientales a los que la industria de la UE está obligada. En ese nuevo planteamiento estratégico y en palabras de la Federación Española de la Piedra Natural, FEPN “*la industria de la piedra natural nacional debe abordar el futuro desde la perspectiva de la I+D a fin de que sus productos tengan un valor añadido de calidad que, de momento, no ofrecen esos países*” (FEPN, 2004).

Mantener la situación de primacía pasa por aumentos en la producción y en las exportaciones, circunstancia que se verifica en el análisis de las tendencias de producción de los pasados años (AGG, 2004).

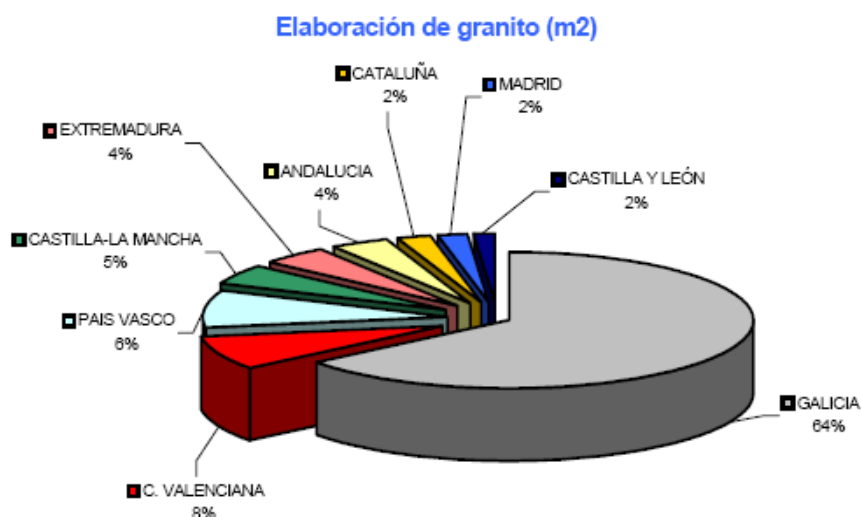


Figura 1.2. Granito elaborado en España (2004) en porcentaje por comunidades. Extraído del Boletín sectorial del FEPN 2004

Así, el ritmo de producción actual determina que, sólo en el área de O Porriño, se generen alrededor de 300.000 m³ anuales de serrines. Esta problemática ha propiciado el establecimiento de una fructífera discusión entre el sector del granito y la Administración a fin de alcanzar un equilibrio sostenible entre esta actividad industrial y las legislaciones medioambientales.



Figura 1.3. Panorámica de las canteras de O Porriño

2 FUNDAMENTOS.

2.1 ORIGEN DE LOS SERRINES DE GRANITO.

Los *serrines de granito* se producen en las operaciones de corte y pulido así como en los distintos tratamientos de los bloques extraídos de las canteras, a fin de prepararlos para su exportación, ya sea como productos finales o como materia prima. La fracción más gruesa de los estériles generados en estos procesos se reutiliza como árido tras su paso por la planta de machaqueo, pero la fracción fina no tiene aplicación concreta y ha de ser gestionada como un residuo. Como estimación, a falta de un inventario real de residuos, el ritmo de producción actual hace que, sólo en el área de O Porriño, se generen más de 300.000 m³ de serrines anuales.

La extracción del bloque de la cantera se realiza mediante perforación o voladura por barrenos y se complementa con el troceado en bloques menores usando diversos métodos: cuñas hidráulicas y metálicas, chorros de agua a alta presión, lanzas térmicas y equipos de corte de hilo de diamante o rozadoras de disco o brazo. Es aquí, en la propia cantera, donde se produce el primer control de calidad y sólo los bloques sin imperfecciones llegan a las fábricas para ser tratados y cortados en planchas para facilitar su manejo y tratamiento.



Figura 2.1. Bloque extraído de cantera antes de ser cortado en telar

Desde un punto de vista descriptivo, los serrines de granito están constituidos por una masa de cristales y, en menor proporción, fragmentos de roca, cuya mineralogía es muy similar a la de la roca a partir de la cual se han generado. Las diferencias respecto de aquella radican en la presencia de elementos metálicos (virutas) resultado del desgaste de los flejes de los telares de corte (Figuras 2.2 y 2.3) o de la granalla metálica utilizada en el proceso de aserrado. Junto con estos materiales metálicos, suele haber un exceso de Ca, dado que durante el proceso de corte se añade hidróxido cálcico que facilita el corte del granito y es añadido a las aguas de refrigeración de los hilos de corte. Cuando el corte o pulido se efectúa con otros métodos, como los discos, no se añade granalla, pero el lodo resultante se mezcla con el resto de serrines, por lo que las posibles diferencias sólo pueden determinarse antes de que esa agua circule por la instalación.



Figura 2.2. Batería de telares

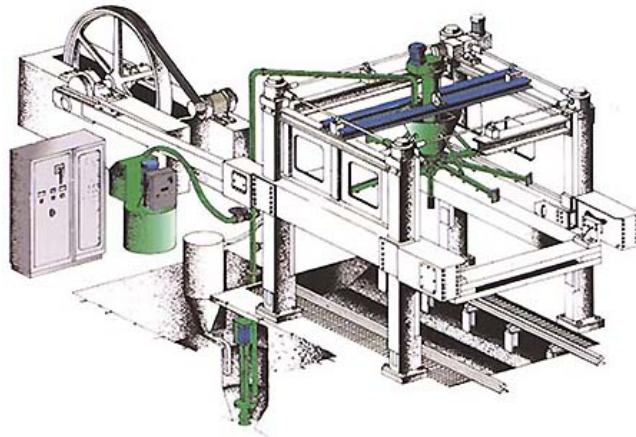


Figura 2.3. Esquema general de un telar de corte de bloques de granito

El proceso de corte de los bloques de granito en planchas suele hacerse mediante el empleo de telares de corte con flejes metálicos refrigerados con agua portadora, a su vez, de granalla metálica. El corte se produce por el movimiento pendular o semirrectilíneo que realiza el marco portacuchillas sobre el bloque, por la presión vertical ejercida y por la acción abrasiva de la granalla. El desgaste del fleje es alto, dependiendo de la dureza de la roca, del abrasivo o la velocidad de penetración en el bloque. Cada telar está conectado a una bomba y depósito de agua de manera que constantemente está refrigerado por agua con cal, granalla y el propio lodo del corte.

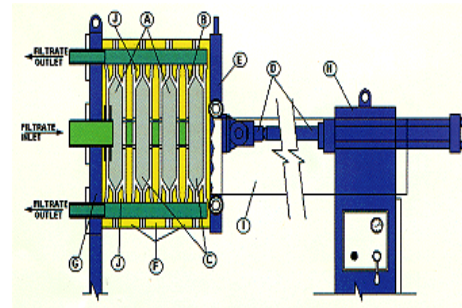


Figura 2.4. Tanque bajo telar para recirculación de lodos

Esta mezcla es controlada por las máquinas y operarios para que conserve la viscosidad deseada, añadiéndose granalla o una lechada de agua y cal cuando las condiciones lo requieren. De este modo se crea un circuito en el que el agua y los lodos con

granalla son reutilizados hasta que las partículas metálicas están demasiado desgastadas. Así el agua que cae sobre el bloque y cuchillas, arrastra los lodos a un depósito bajo el telar mediante unas canaletas, y allí se une a la cal y granalla que han sobrado (Figura 2.4). En ese depósito los fluidos están en movimiento para impedir la caída de los metales al fondo y allí se realiza de nuevo la mezcla para el corte atendiendo a la viscosidad deseada y a los gramos de metal/litro. La mayoría de las empresas de elaboración y/o transformación de la zona poseen circuitos cerrados para la reutilización del agua y lodos. La separación del *serrín* del agua se realiza por varias vías:

- Mediante balsas de decantación. Se trata, en general, de huecos excavados en el terreno en los que no se realiza ningún tipo de acondicionamiento, que aprovechan la baja permeabilidad del terreno sobre el que se asientan.
- Sacos filtrantes (que sólo son prácticos para producciones de *serrín* pequeñas).
- Deshidratación en filtros-prensa. (Figura 2.5). Es el sistema empleado de forma más generalizada. Los filtros-prensa confieren a las tortas de *serrín* un contenido de humedad ligeramente superior a su límite plástico y las compacta, lo cual favorece su manipulación y almacenamiento. (Figura 2.6)



A: Tortas de serrín
 D: Cilindro
 E: Placa de compresión
 G: Placa de reacción
 Filtrate inlet: Entrada de fluidos
 Filtrate outlet. Salida de fluidos

Filtro

Figura 2.5. Esquema de filtro-prensa con sus componentes principales



Figura 2.6. Acopio de serrines a la salida de los filtros-prensa de una explotación de O Porriño



Figura 2.7. Taludes con bermas en un vertedero controlado de serrines.

La gestión posterior de los serrines por parte de las distintas empresas no ha seguido, hasta la fecha unos procedimientos generalmente aceptados. En algunos casos, han utilizado espacios propios (más o menos acondicionados) ubicados en canteras o próximos a los centros de labor si bien no tenemos datos que permitan clarificar más la

situación. En algún caso, las principales productoras de granito transformado han optado por el acondicionamiento de vertederos controlados (Figura 2.7) aprovechando antiguos huecos mineros como el caso del existente en O Cerquido, junto a la autovía A-52, del que se hablará más adelante.

La granalla (Figura 2.8) es la verdadera herramienta de corte y ha evolucionado a lo largo del tiempo conforme lo han hecho los telares. En el granito suele usarse granalla de acero según distintos tratamientos, formas y fabricantes ya que el tipo de granito determina la granalla a utilizar. Los materiales duros y compactos precisan de mezcla abrasiva con una granalla medio-fina que facilite la disgregación y evite el pulido y calentamiento del fleje, sin embargo para materiales blandos se usa granalla gruesa que incrementa el rozamiento entre fleje y bloque. También puede variarse la angulosidad de la partícula metálica en función de la abrasión deseada. La granulometría típica varía entre 0.3 y 1.2 mm, pero lo habitual es usar granalla de entre 0.4 y 1mm. El incremento en la dureza y duración de la granalla permite la construcción de telares mayores y más productivos.



Figura 2.8. Granalla metálica (Cortesía Fabio Murga)

El agua recirculada en los telares resultante del proceso de corte es muy alcalina y lleva en suspensión los finos del proceso de abrasión (el serrín), junto con diversas partículas metálicas resultante del desgaste mecánico de los hilos, los flejes o la propia granalla. Típicamente se trata de una mezcla abrasiva con una densidad que varía entre los 1450 y los 1700 g/l. Es de destacar que, para los telares más modernos, el valor promedio de la viscosidad varía muy poco de un telar a otro (1300 a 1440 centipoise) y lo mismo puede decirse de la cantidad de granalla útil ($\phi > 0.4$ mm), como se expone en la tabla 2.1. Ello proporciona al serrín una homogeneidad destacable y muy conveniente desde el punto de vista de la caracterización de sus propiedades.

Componente	% en peso	g/L	% en volumen
Agua	36.7	640	67.9
Cal	0.45	8	0.4
Granalla	16.3	294	4.2
Lodo mineral	47.1	845	27.6

Tabla 2.1. Proporciones promedio de agua, cal, granalla y polvo mineral presente en los serrines de granito de telares españoles. Fuente: ANGE (2002)

2.2 LEGISLACIÓN: LOS SERRINES COMO RESIDUO.

Para caracterizar estos residuos se pueden usar determinados criterios marcados por las normativas europeas, españolas y autonómicas. La clasificación de los residuos sólidos en la Comunidad Autónoma de Galicia se realiza de acuerdo a su inclusión o no en el ámbito de la **Ley 10/1997**, de 22 de agosto (D.O.G. 180, 18.09.97) sobre residuos sólidos urbanos de Galicia. Los residuos producidos por las actividades relacionadas con la explotación de granito quedarían excluidos de la Ley citada, de acuerdo a lo expuesto en los puntos 4.2.b y 4.2.c. Por otro lado, el **R.D. 154/1998**, de 28 de mayo (D.O.G. 107, 5.06.98), por el que se publica el Catálogo de Residuos de Galicia, (el cual toma como base el Catálogo Europeo de Residuos, CER) establece 20 grupos de residuos, señalando entre estos cuales tienen carácter de peligrosos. De acuerdo con el CER, los residuos ocasionados por las actividades de extracción de granitos pertenecerían al grupo 01 (residuos de prospección, extracción, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras), subgrupos 010102 (residuos de la extracción de minerales no metálicos) y 010406 (residuos de cortado y serrado de la piedra).

Por otro lado, la estrategia relativa a la prevención en la producción de residuos industriales así como a su gestión queda recogida en el *Plan de Xestión de Residuos Industriais e Solos Contaminados de Galicia, PXRISC* (CMA, 2003). Dicho Plan, al amparo de lo dispuesto por la **Ley 10/1998**, de 21 de abril, de residuos y de forma coherente con las políticas del Plan Nacional de Residuos Peligrosos 1995-2000 y de la Unión Europea considera que las líneas de acción prioritarias deben ser:

- reducción en origen de los residuos
- reutilización y reciclaje de los mismos
- el vertido como la opción menos deseable

Según el **R.D. 154/1998** (D.O.G. 107, 5.06.98) se definen como residuos NO PELIGROSOS e INERTES, ‘aquellos que no experimentan transformaciones físicas,

químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a una contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana’.

Por otro lado el **R.D. 1481/2001**, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE 29/1/2002) establece explícitamente en su artículo 2b que los residuos inertes *“no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas”*. No obstante, con arreglo a la Directiva 75/442/CEE, *“el aprovechamiento de residuos inertes o no peligrosos apropiados mediante su utilización en obras de restauración/acondicionamiento y colmatación o con fines de construcción no necesariamente constituye una actividad de vertido”*.

En relación con el carácter inerte o no de los residuos, las autoridades competentes en materias de medio ambiente nacionales y autonómicas tienen atribuidas competencias reguladoras y, de ese modo, el **R.D.1481/2001** determina que *“de conformidad con lo que establezca la normativa comunitaria, el Ministerio de Medio Ambiente o, en su caso, las Comunidades Autónomas, en sus respectivos ámbitos de competencia, podrá exceptuar del cumplimiento de los requisitos exigidos (...) el depósito de residuos no peligrosos distintos de los inertes, resultantes de la prospección, extracción, tratamiento y almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras”*.

La atribución del carácter inerte a un residuo requiere la realización de una serie de pruebas de conformidad y de verificación in situ, las cuales han sido establecidas de acuerdo con la Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y el anexo II de la **Directiva 199/31/CEE** (DOCE 16/1/2003). La recalificación de estos residuos como inertes ha quedado recogida en una reciente Instrucción Técnica de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia (**ITR/01.0/04**), lo que tiene una importante repercusión económica dado que, de no ser así, su eventual valorización quedaría gravemente comprometida y su gestión como residuo no inerte comportaría instalaciones para su vertido especialmente acondicionadas.

La problemática ambiental se debe fundamentalmente al control del pH, ya que son materiales de carácter alcalino por el uso de cal en su proceso de formación, control de las concentraciones de diversos elementos, generalmente metálicos como el Cr, y control de los aspectos relacionados con la gestión de una cantidad de residuos tan importante. La gran producción de serrines requiere una estrategia de actuación en diversos frentes:

- Caracterización del material en vistas a su catalogación como tipo de residuo
- Estudios de viabilidad sobre sus potenciales usos.
- Caracterización del material de acuerdo con sus posibles usos.

Uno de los objetivos de este estudio es la inclusión de estos materiales dentro de las normativas referentes a residuos y su almacenamiento en vertederos. La ley europea al respecto es la **Directiva 1999/31/CE** (Art.16, Anexo II), que establece los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos y cuyo planteamiento y desarrollo conformará el planteamiento y desarrollo de este estudio. Los serrines de granito se situarían en el grupo de residuos de producción regular en un mismo proceso.

2.3 ANTECEDENTES

En este apartado se resume la información bibliográfica más relevante relativa a los serrines de granito, en especial la relacionada con usos y aplicaciones, y las principales líneas de investigación que se desarrollan en otras partes del mundo relacionadas con este tema. Es necesario comentar que existe poca información sobre estos residuos, hay poca experiencia previa y actualmente pocos grupos se dedican a investigar en este campo. Hasta el momento se han propuesto los siguientes usos documentados para estos materiales y relacionados con nuestra línea de investigación:

- a) Remineralización de suelos agrícolas y forestales.

Esta es una de las aplicaciones mejor conocidas y documentadas, aunque se aleja de la línea de trabajo del presente proyecto. Sin embargo, resulta interesante desde el punto de vista de la caracterización físicoquímica de los lodos de granito. En la Universidad de Santiago de Compostela el Departamento de Edafología y Química Agrícola realizó un completo estudio sobre este tema descrito en el *informe "Evaluación del uso de lodos graníticos como enmienda y fertilizante de suelos ácidos"*. Este informe tiene un especial interés porque se desarrolla con serrines de granito iguales a los usados en nuestro proyecto, recogidos en la misma zona y con una composición similar; si bien el enfoque del estudio y sus objetivos son distintos. Otros estudios similares han sido acometidos por Coroneos et al. (1996), Bakken et al. (1997, 2000), Bolland y Baker (2000), Harley y Gilkes (2000), Hildebrand y Shack-Kirchner (2000) y Leonardos et al. (2000), investigando el empleo de los serrines en la remineralización de suelos agrícolas o forestales.

b) Producción de materiales vitrocerámicos.

Los componentes principales del granito (cuarzo, feldespato y micas) se han usado para la formación de pastas cerámicas. Esta línea de investigación ha sido desarrollada por científicos del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción perteneciente al CSIC desde hace varios años. Además existen algunos proyectos de la UE relacionados con este campo, para dar una salida a estos residuos (Programa Brite/Euram). Otros autores, Menezes et al. (2002), han investigado el potencial uso de los serrines graníticos como materia prima para la industria cerámica. Sus conclusiones indican que las características de estos materiales poseen una composición análoga a la de las materias primas cerámicas convencionales y que las piezas elaboradas a partir de los mismos cumplen con las prescripciones técnicas de rigor. Por otra parte, Albarrán-Liso et al. (2006) han caracterizado los serrines de granito extremeño desde un punto de vista geoquímico aunque sin concluir ningún uso concreto.

Otra aplicación relacionada con este apartado es el posible uso de los serrines de granito como fuente para obtener feldespatos. Éstos se utilizarían para cerámicas y vidrios, en función de sus características. Para separar los feldespatos suelen usarse técnicas de flotación (froth flotation) complementadas con molienda, concentración granulométrica o separación magnética. En el caso de los serrines la molienda no es necesaria, aunque sí la

separación magnética debido a la presencia de granalla metálica. Sin embargo el problema radica en las limitaciones por el tamaño de las partículas ya que los serrines son demasiado finos para poder separar los feldespatos con efectividad. En todo caso ésta puede ser una importante salida para estos materiales, si se logran separar sus componentes; y más si cabe al considerar que España importa este tipo de minerales y la demanda aumenta cada año pese a que la producción nacional también se incrementa. Las importaciones son mayoritariamente de feldespato sódico para la industria de pavimentos y los revestimientos cerámicos de pasta blanca, y proceden fundamentalmente de Turquía y Alemania. España también exporta, pero no lo suficiente como para compensar la balanza comercial. Las exportaciones de feldespatos potásicos y cuarzo-albíticos se destinan a Italia, Portugal y Marruecos. Los recursos nacionales de feldespatos de todo tipo podrían evaluarse en 600Mt en 1996 (IGME).

c) Adiciones en hormigones y mezclas bituminosas.

Esta es una de las aplicaciones de la que es posible hallar más información, ya que es una de las salidas más estudiadas en la actualidad. Destaca el grupo de la Universidad Federal de Río Grande do Sul (Brasil) con la tesis “Utilización del residuo de corte de granito como aditivo para la producción de hormigones“ realizada por Jardel Pereira (2000). En este trabajo se realiza una detallada caracterización de los serrines y de los productos resultantes de las mezclas con cementos y hormigones. Es interesante resaltar que en este estudio también se considera que estos residuos son inertes y no peligrosos después de realizar análisis de solubilidad y lixiviados, que es uno de los aspectos a estudiar por nuestro proyecto. Sus resultados indican discretas mejoras en el comportamiento resistente. Silva (1998) investigó la aplicación de los serrines de granito para su mezcla con cemento en la fabricación de losetas para pavimento doméstico. Los resultados de los ensayos de laboratorio fueron positivos y dieron lugar a una línea de investigación que aún continúa. Por su parte Osunade (2002) conjuga en su trabajo algunos de los posibles usos descritos anteriormente: aditivo para hormigones y como material de construcción y relleno.

d) Materiales de construcción y obras.

Éste es el aspecto más importante de nuestro proyecto y la viabilidad de esta aplicación se determinará en función de los resultados obtenidos. El uso principal de estos residuos sería de material de relleno dado su comportamiento frente a la consolidación y permeabilidad. Es difícil hallar documentación en este campo, no obstante existen varios artículos relacionados con esto como los de Fraser y McBride (2000) estudiando la utilidad de los finos del procesado de rocas dolomíticas en la rehabilitación de antiguas canteras y para rellenos y que presenta unos resultados coherentes pese a tratarse de materiales de distinta composición química, y que avalan el uso de los finos de corte en rellenos y terraplenes, o los trabajos realizados por el Dpto. de Ingeniería Civil del Colegio de Ingeniería de Vellore (India) caracterizando serrines usados como relleno de zonas bajas y valorando los cambios en la fertilidad del suelo y la posible contaminación de las aguas subterráneas y del medio adyacente (Satish Kumar et al.1997).

Hay que reseñar en este apartado la labor de algunos grupos de investigación entre los que destaca ICAR (2000), con sede en Austin (Texas). El *International Center for Aggregates Research* mantiene un grupo de trabajo, el ICAR-101, cuyo objetivo es promover la investigación y aplicación de los finos de granito, entendidos éstos como un subproducto con valor económico de la industria de la roca ornamental. Las conclusiones de dicho grupo de trabajo han quedado plasmadas en un informe en el que se indica que, en la actualidad y solo en los Estados Unidos, existen unos 600 millones de toneladas de materiales clasificables como finos, sugiriendo uso tales como su empleo como filler minerales (para hormigones y mezclas bituminosas), capas de sellado para la clausura de vertederos, enmienda de suelos, terraplenes, etc. Dentro de la Unión Europea vale la pena indicar que, en la base de datos ERGO (<http://www.cordis.lu/ergo>), se puede constatar la existencia de algunos proyectos financiados por fondos de programas I+D de la UE (BRITE/EURAM 2 y 3, CRAFT) centrados en la generación de finos como resultado del corte de granito. De forma genérica, los proyectos identificados pueden clasificarse en dos categorías: 1) La mejora de los procesos industriales (p. Ej. EU44833: “*Development of advanced tools for ecological and economic sawing of granite*” y 2) La búsqueda de aplicaciones para los residuos de corte (p. Ej. EU30996: “*Construction Recycling Technologies for High Quality Cement and Concrete*” EU22586: “*Recycling of waste originated in the process of cutting natural stone*”; EU5852: “*Reduction of environmental impact of slag heaps from granite quarries exploitation*”;

EU23148: “*Recycling of jarosite wastes in combination with granite scraps for producing glass and glass ceramic materials?*”).

Hasta la fecha, los estudios realizados sobre los posibles usos y aplicaciones de los serrines no han satisfecho las necesidades del sector granitero gallego, ya que, en unos casos, el consumo de dicho material es mínimo en comparación con la producción anual, en otros los costes de transporte ahogan cualquier posible beneficio de comercialización. No obstante, la AGG ha promovido la investigación en el contexto de diversas aplicaciones prácticas. Una de estas líneas se ha dirigido en el aprovechamiento del serrín como material con propiedades porcelánico/refractarias, para lo cual ha requerido la colaboración del Instituto Eduardo Torroja-CSIC. En el año 2001, la AGG y el *Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente* de la Universidade da Coruña, en colaboración con el Grupo de Geotecnia Ambiental de la UCLM, impulsaron el estudio del empleo del serrín granítico como material de préstamo en obra civil. Fruto de esta colaboración ha sido la realización del proyecto sobre el que tratan esta tesis y otra tesis ya defendida centrada en el comportamiento geoquímico de este material (Vázquez, 2006). Por último se muestra una relación de los proyectos que han englobado esta investigación:

“Estudio de las aplicaciones prácticas de los residuos de corte de granito en Ingeniería Civil” (2001-2003) financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y por la Xunta de Galicia.

“Valorización de los serrines de granito: Comportamiento geotécnico de los finos de corte de granito en relación con su aplicación en construcciones de Ingeniería Civil” (2003-2004) financiado por la Xunta de Galicia.

“Almacenamiento de los residuos de fuel y su reciclaje como elemento de construcción” (2004-2005) financiado por la Fundación Arao.

“Aplicación de los residuos de corte de granito en ingeniería civil: Barreras para la impermeabilización de vertederos, rellenos y terraplenes.” (2005-2008) financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología

2.4 LA INDUSTRIA DEL GRANITO

2.4.1 GRANITOS ORNAMENTALES.

La Norma UNE 22-170-85 define el Granito ornamental como ‘aquel conjunto de rocas ígneas, de mineralogía diversa, que se explota generalmente en forma de bloques de naturaleza coherente y que se utilizan para decoración’ aprovechando sus cualidades estéticas una vez que han sido elaborados con procedimientos tales como el aserrado, pulido, labrado, tallado, esculpido, abujardado, flameado, etc. De este modo la definición “comercial” es menos restrictiva que la “petrológica”, así que determinados granitos ornamentales no pertenecerían a este grupo de rocas ígneas en un sentido estricto, sino que se clasificarían como gneises (metamórfica), pegmatitas o basaltos. Para la Petrología las rocas granitoides son aquellas rocas ígneas plutónicas que contienen más del 5% de cuarzo modal.

Las rocas ígneas más importantes como rocas ornamentales son las siguientes:

- a) **Granitos y granodioritas.** Es el grupo más abundante no sólo por su abundancia, sino también por las condiciones de afloramiento que suelen permitir el desarrollo de grandes explotaciones. Gran variedad de tonos, texturas y composiciones.
- b) **Sienitas.** El contenido en cuarzo es menor del 5% presentando un alto contenido en feldespatos alcalinos. Dada su composición presentan coloraciones rojas y azules, a veces con irisaciones, que hace valiosas a determinadas variedades (sienitas sodalíticas).
- c) **Tonalitas, monzonitas y cuarzodioritas.** Se clasifican como granitoides con un contenido alto de plagioclasas y minerales ferromagnesianos de color oscuro (máficos). Las variedades más apreciadas suelen tener color negro, gris oscuro o azul.

- d) **Dioritas y gabros.** Su bajo contenido en cuarzo impide calificarlos de granitoides, lo más característico es que tienen un importante porcentaje de minerales máficos, que confiere a la roca tonos oscuros o negros.

El conocimiento de las características de las rocas ornamentales es fundamental para dar a cada una de ellas el uso más adecuado. Es preciso conocer su comportamiento una vez colocada en obra y su respuesta a factores como los agentes atmosféricos, la actividad humana, los esfuerzos o el paso del tiempo. La evaluación de estas características se realiza mediante la realización de una serie de ensayos relacionados con la resistencia mecánica y estabilidad de la construcción y se realizan atendiendo a un punto de vista mineralógico, físico, mecánico y constructivo. Dada la heterogeneidad de estos materiales y de sus orígenes, se hace necesario un criterio de comparación de las características de las rocas. Este criterio está determinado por la normativa UNE de rocas ornamentales publicada en 1985 y se completa con otras normas europeas donde no existe todavía la norma nacional. Además se está realizando esfuerzos para unificar criterios y normas a nivel europeo para facilitar el intercambio de bienes y servicios y mejorar la competitividad de los productos de la UE. Estos son algunos de los ensayos que se utilizan para la caracterización de los granitos ornamentales:

-Norma UNE 22-172-85: Absorción y Peso específico aparente.

La absorción es la capacidad del granito para absorber agua por capilaridad a través de su red de poros, expresada en % en peso. El peso específico es el peso por unidad de volumen. Los granitos se consideran rocas pesadas, con valores de peso específico entre 2500 y 3000 Kp/m³ y con un coeficiente de absorción muy bajo, entre el 0.07% y el 0.4%. Por encima de este valor de absorción los granitos no son usados en ambientes exteriores.

-Norma UNE 22-173-85: Resistencia al desgaste por rozamiento.

Es la resistencia de una roca a dejarse rayar y perder masa por las fricción de otros materiales y es un parámetro necesario para el estudio de pavimentos. El granito, por su alto contenido en cuarzo, posee un grado alto de resistencia al rozamiento.

-Norma UNE 22-174-85: Resistencia a las heladas.

Se expresa en % en peso perdido por la muestra tras los ciclos de hielo-deshielo marcados por la norma. Los materiales que absorben agua pueden disgregarse al bajar la temperatura por debajo de 0°C si la disposición y forma de sus poros no permite absorber el aumento de volumen del hielo que se forma en su interior. Los granitos se califican como no heladizos debido a su baja porosidad y su textura.

-Norma UNE 22-175-85: Resistencia a la compresión simple.

Es un valor a conocer siempre que la roca tenga que soportar cargas elevadas durante su utilización, transporte o almacenamiento. El granito presenta una resistencia alta al aplastamiento, variando entre 750 y 2000 Kp/cm³.

-Norma UNE 22-176-85: Resistencia a la flexión.

Esta característica se determina en granitos cortados en placas para ser usados como dinteles, peldaños o revestimientos exteriores, especialmente en edificios elevados. El valor de este parámetro resistente es aproximadamente 1/10 del de la compresión.

-Norma UNE 22-177-85: Módulo elástico.

Es la relación entre la carga aplicada y la deformación unitaria dentro del rango elástico y es importante conocerlo cuando la piedra se emplea en sillería o mampostería. Las rocas compactas y de grano fino tienen módulos elásticos mayores que las rocas porosas y poco coherentes.

-Norma UNE 22-178-85: Microdureza Knoop.

Mide la resistencia que opone la roca a ser penetrada por un punzón de diamante en forma piramidal y muy obtusa. Evalúa la resistencia superficial ante los agentes destructores influyendo en las labores de tallado y pulido. Para los granitos es una medida poco representativa dada la heterogeneidad de las microdurezas de los minerales que lo componen.

-Norma UNE 22-179-85: Resistencia al choque.

Es un valor importante para rocas que se empleen en peldaños, solados, zócalos o encimeras ya que mide la resistencia ante el impacto de objetos. Se determina dejando caer una masa conocida sobre distintas probetas variando la altura de caída. El granito posee un valor alto de resistencia al impacto (tenacidad) que se corresponde no sólo con la resistencia a compresión sino con el menor tamaño de grano.

-Norma UNE 22-197-85: Resistencia al choque térmico.

Es la capacidad de una roca para mantener su integridad tras haber sido sometida durante cierto tiempo a altas temperaturas y a continuación ser enfriado rápidamente por agua. Sólo algunos granitos meteorizados presentan escamaciones y disgregaciones tras someterse al ensayo.

-Norma DIN 52.206: Resistencia al SO₂:

Es un dato básico para evaluar el comportamiento de una roca que va a ser utilizada en el exterior, como en fachadas o cubiertas, en ambientes urbanos e industriales contaminados caracterizados por la presencia en la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno. No existe norma U.N.E., por lo que se usa esta norma alemana para pizarras. Se expresa en % de pérdida de peso.

-Documento CEN/TC 246/ WG2: Resistencia al anclaje:

El valor de la carga de rotura que una placa de roca puede soportar en los agujeros de anclaje condiciona el espesor mínimo que ha de tener y, por tanto, el peso de los elementos de la fachada. En este caso tampoco existe norma U.N.E. por lo que se recurre a este documento del Comité Europeo de Normalización.

En la Tabla 2.2 se pueden observar los valores medios de estas características para algunas de las variedades de granito explotadas en Galicia.

	Negro Galicia	Pedra Vella de Cangas	Gris Perla	Albero	Silvestre	Gris Mondariz	Rosa Dante	Rosa Porriño
Absorción(%)	0,16	0,31	0,25	0,4	0,15	0,3	0,32	0,3
Gravedad específica	2,88	2,65	2,65	2,65	2,66	2,63	2,64	2,61
Dgte.rozamiento (mm)	0,8	1,02	1,53	1,75	1,6	1,1	1,1	1,1
Resist.Heladas (%)	0,01	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,06	0,04
R.compresión (MPa)	157,2	136,2	108,9	79,2	81,3	108,9	105,6	113,8
Res.Flexión (Mpa)	12,3	10,7	10,9	9,9	7,92	15,3	12,5	11,8
Res. Choque (cm)	75	70	50	50	50	55	55	55
Mód. Elástico (MPa)	67340	45203	43230	32130	39510	47230	n.d	56130
Dureza Knoop (MPa)	3425	3115	2915	2510	2837	3115	n.d	2973
Resist. SO2 (%)	0,04	0,09	0,01	0,02	0,03	0,06	n.d	0,06
Resist. Anclaje(N)	3215	2915	2530	2221	3013	2515	n.d	3015

Tabla 2.2. Valores caracterización de algunas variedades gallegas. (Fuente: A.G.G.)

2.4.2 YACIMIENTOS DE GRANITO ORNAMENTAL EN GALICIA

Galicia es, como se ha comentado, la primera región española en la obtención y producción de granitos, generando el 60% del total de ingresos por exportación de granito elaborado en España en 2003 (AGG, 2004). Desde un punto de vista geológico, las explotaciones se hallan en la Zona Centroibérica, dentro de la subzona Galicia media Tras-os-Montes (Figura 2.9) y corresponden, generalmente, a granitos y granodioritas de grano grueso y tonos grises, blanquecinos o rosados, aunque también se explotan monzonitas negras. Dentro de cada provincia se producen distintas variedades comerciales en función de la roca explotada.

- A Coruña es la provincia con menor producción de la comunidad en cuanto a granito ornamental, aunque sí se explotan estas rocas para la producción de áridos. Se comercializa un granito rosáceo (Austral Red) rico en granates con rellenos de minerales verdosos (epidota) en pequeños afloramientos en el municipio de Sta. Eugenia de Ribeira y, más al Sur, hay algunas explotaciones que producen las variedades Silvestre y Albero, extraídas también en Pontevedra.

- Lugo proporciona varios tipos de granitos, la mayoría procedentes de afloramientos plutónicos que rodean la capital. Estas variedades son granitos biotíticos (Perla Kaxigal, Marrón Estrella) o adamellíticos de color rosáceo (Rosa Delta, Rosa Lugo). Son importantes también los afloramientos del Macizo de Friol-Parga de los que proceden los granitos Parga y San Román, clasificados como granitos de dos micas.
- Ourense posee unos importantes yacimientos en la zona central de la provincia, en una banda de afloramientos plutónicos en dirección N-S con distintas facies que diferencian las variedades comerciales. Así se distinguen Silvestre Claro y Silvestre Moreno, granitos equigranulares de dos micas, de Grissal, granito ada-mellítico, de Rosavel, que es una granodiorita con grandes cristales de feldespatos rosáceos, o de Gris Morrazo, granito biotítico de grano medio.
- Pontevedra es la provincia con mayor producción de la comunidad. Las explotaciones se sitúan en afloramientos plutónicos situados en dirección N-S, como los de Ourense, ya que se trata de dos conjuntos semiparalelos separados geológicamente por el Dominio Esquistoso de Galicia Tras-os-Montes. Además de O Porriño, que se tratara aparte, hay varias localidades con canteras. En el batolito de Cangas-Vilagarcía de Arousa se explota el Gris Perla, granito biotítico con hornblenda de la serie precoz y afinidad calcoalcalina. En esa zona se produce el Pedra Vella de Cangas, que es un granito de dos micas perteneciente al complejo migmatítico y de las rocas graníticas. Algo más al Norte, en el mismo complejo rocoso se extraen las variedades Negro Galicia y Negro Esmeralda, que son unas microdioritas de grano fino, muy oscuras y con biotita y anfíbol monoclinico como minerales principales.

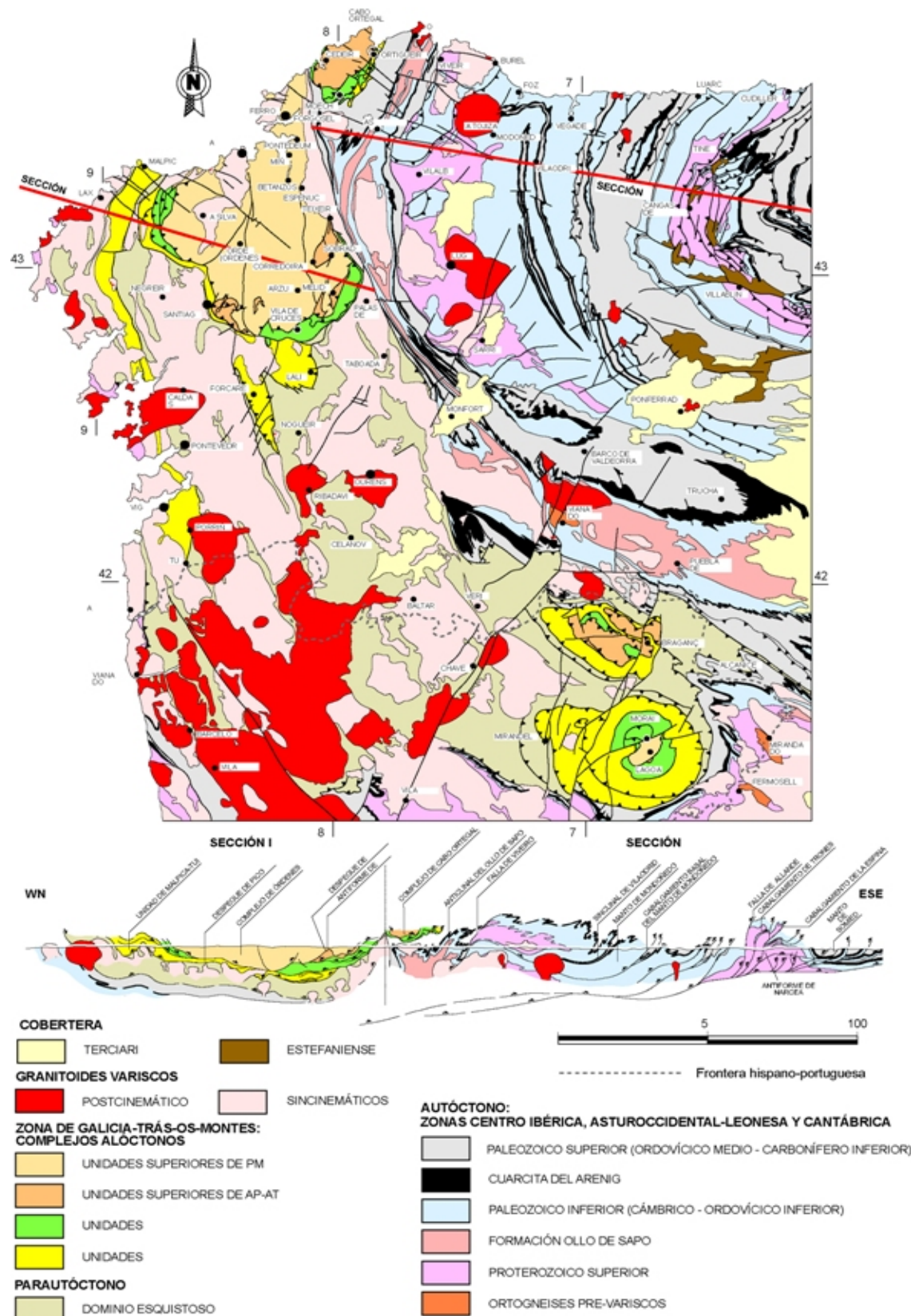


Figura 2.9. Mapa geológico del NO del Macizo Ibérico, con los afloramientos de los distintos plutones. Tomado del CD-Rom de anexos de Geología de España, 2003

2.4.3 VARIEDADES ORNAMENTALES DE O PORRIÑO

Dentro de la provincia de Pontevedra merece un apartado propio la zona de O Porriño, donde se sitúan las explotaciones más importantes de España y de las más importantes del mundo. La mayoría están situadas en el Macizo de Porriño o en plutones adyacentes.

Geológicamente se trata de un granito tardío, biotítico, de grano medio a grueso y que presenta varias facies de las que se obtienen las distintas variedades. Así *Rosa Dante* y *Rosa Porriño*, se diferencian por el tamaño de los cristales aunque ambas presenten cristales rosáceos de feldespatos como aspecto característico. Otra variedad de la zona es *Gris Mondariz*, que es una granodiorita con megacristales rosados de feldespatos, lo que le da cierto parecido a las anteriores. Cerca de la frontera con Portugal, en Tuy, se comercializa el *Albero*, que es un granito de dos micas, aunque muy rico en moscovita, muy deformado y que se ha usado mucho en la construcción tradicional gallega. Por último la variedad *Silvestre*, del Macizo de Minor, que es un granito de afinidad calcoalcalina, adamellítico y muy alterado. En la tabla 2.3 se puede observar el aspecto de algunas variedades y sus composiciones pueden verse en la tabla 2.4 y figura 2.10.



Tabla 2.3. Aspecto macroscópico de algunas variedades de granito explotados en O Porriño (A.G.G.)

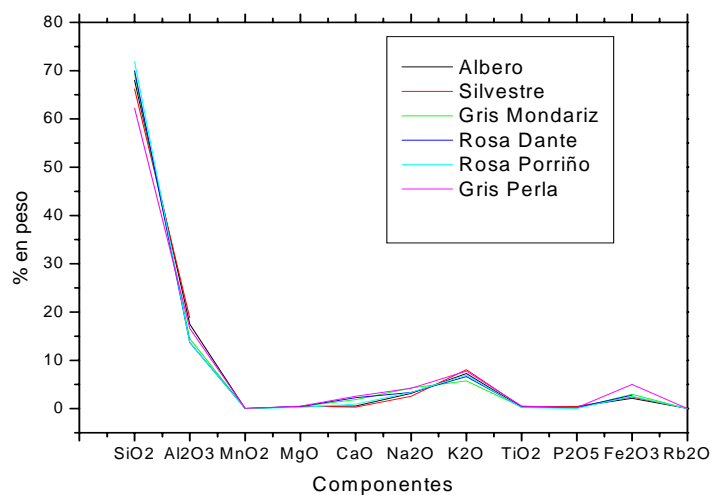


Figura 2.10. Composición química de algunas variedades

	Albero	Silvestre	Gris Mondariz	Rosa Dante	Rosa Porriño	Gris Perla
SiO₂	68	66,2	69,4	70	71,9	62,2
Al₂O₃	17,5	18,8	14,5	13,7	13,7	16,6
MnO₃	0,0272	n.d	0,0432	0,0405	0,025	0,0687
MgO	0,467	0,481	0,437	0,465	0,247	0,513
CaO	0,553	0,319	1,89	2,25	0,942	2,54
Na₂O	3,17	2,58	4,27	3,37	3,34	4,22
K₂O	7,3	8,06	5,77	6,66	6,94	7,79
TiO₂	0,31	0,392	0,345	0,344	0,201	0,558
P₂O₅	0,394	0,453	0,118	0,208	0,0529	0,207
Fe₂O₃	2,1	2,4	2,96	2,82	2,55	5,01
Rb₂O	0,0454	0,0538	0,0298	n.d	0,0304	0,0302
Cr₂O₃	0,038	0,0501	0,0449	0,0641	0,0496	0,0338
BaO	n.d	0,0367	0,0551	0,0492	0,0304	0,143
Au	0,0176	0,0144	0,0123	0,0177	0,014	0,016
ZnO	0,0163	0,0191	0,0101	n.d	0,0098	0,0157
ZrO₂	0,012	0,0249	0,0284	n.d	n.d	0,0739
CuO	0,0113	n.d	0,0104	0,0137	0,011	0,0132
SrO	0,0063	0,0103	0,012	0,168	0,0058	n.d
Y₂O₃	0,0059	0,0061	0,0104	0,01	0,0066	0,0089
Nb₂O₅	n.d	n.d	0,0039	n.d	0,0042	0,0045
SO₃	n.d	0,0675	0,0343	n.d	n.d	0,0638
Pt	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ni	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PbO₂	n.d	0,0113	n.d	n.d	n.d	n.d
MoO₃	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
As	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
ThO₂	n.d	n.d	n.d	n.d	0,0071	n.d
Cl	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tabla 2.4. Composición química de las principales variedades de O Porriño (Enciclopedia de Galicia, 2002)

2.5 ENTORNO GEOLÓGICO DE O PORRIÑO

Pese a que el serrín de granito no se genera solamente a partir de las rocas de la zona, es interesante conocer la geología de O Porriño ya que ha condicionado la industrialización del municipio, bien desde la explotación del granito o la de diversas arcillas. De hecho, uno de los recursos usados tradicionalmente para almacenar estos residuos, es aprovechar los espacios creados por antiguas canteras de granito y de explotaciones de arcillas. Es impactante observar el frente de explotación abierto durante casi 2 Km que domina el paisaje de la localidad. Una de las litologías más características de la industria granitera de O Porriño es la variedad conocida como Rosa Porriño, extraída de canteras situadas en el municipio y conocida a nivel internacional. La producción de las distintas variedades, tanto locales como importadas, varía en función de las necesidades del mercado de la roca. En este apartado describiremos brevemente la geología de la comarca a fin de encuadrar las distintas litologías en su contexto geológico correspondiente.

La geología de la provincia de Pontevedra (Figura 2.11) consta fundamentalmente de rocas graníticas, con gran variedad de intrusiones magmáticas, y en menor proporción, rocas metamórficas como gneises, anfibolitas, migmatitas, micacitas o cuarcitas, y rocas básicas. Los materiales fueron afectados fundamentalmente por la orogenia Hercínica durante la que se produjeron la mayor parte de las intrusiones graníticas.

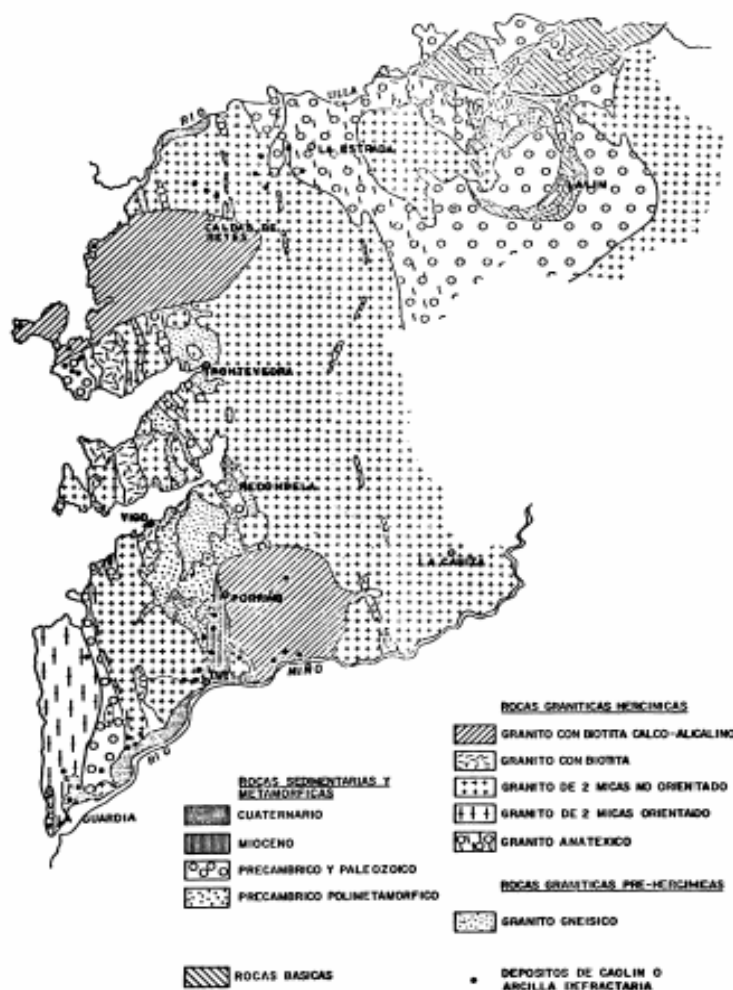


Figura 2.11. Mapa geológico de la provincia de Pontevedra. (Fuente: Carames, 1983)

La localidad de O Porriño se halla en la cuenca de Porriño-Tuy, individualizada en el Mioceno Superior (Medus, 1965) y se dispone según la dirección N-S a lo largo del valle del río Louro (Figura 2.12). El zócalo consiste en rocas ígneas y metamórficas que presentan un grado alto de alteración generando un importante relleno detrítico. Parece que las condiciones climáticas eran favorables para la meteorización química de las rocas, como indican los minerales arcillosos encontrados y la presencia de lechos detríticos endurecidos por cemento ferruginoso, y hay indicios de actividad hidrotermal que justifica la profundidad de la alteración. Los depósitos terciarios están constituidos por arenas y gravas arcillosas con mayor presencia de finos en los márgenes de la cuenca, apareciendo una sucesión de arcillas rojas, amarillas e incluso grises, blancas y lignitos. Este grupo de sedimentos finos detríticos han sido denominados Formación Tuy (Brell, 1972) y en ella

aparece los yacimientos caoliníferos explotados en la zona. Sobre estos materiales se sitúa una serie fluvial de arenas y gravas de edad cuaternaria.

Las rocas ígneas que se explotan en los alrededores de O Porriño pueden agruparse en dos grandes grupos: granitos prehercánicos y granitos hercánicos. Los emplazamientos de ambos se observan en la figura 2.13. Los primeros han sufrido al menos un proceso metamórfico y dos deformaciones lo que ha variado el aspecto y facies original de la roca. En cuanto a los granitos hercánicos se pueden considerar dos series distintas: calcoalcalina y alcalina (Capdevila, 1966)

1. Serie calcoalcalina:

Se clasifican según la facies y el momento de emplazamiento en:

a) Granodiorita precoz:

Se trata de granodioritas afectadas por una intensa deformación cataclástica lo que confiere a la roca un marcado aspecto gneísico. Los afloramientos tienen escasa entidad y presentan intrusiones de diques de granitos de dos micas. Son rocas porfídicas de grano grueso, inequigranulares y con grandes cristales de microclina además de cuarzo, plagioclasa, biotita y, menos frecuentemente, moscovita. Los minerales accesorios más importantes son la clorita, el apatito, circón y la turmalina.

b) Granitos adamelíticos:

Son granitoides sin deformación cataclástica, aparecen en afloramientos mayores que los de la granodiorita precoz y su emplazamiento es posterior a ésta. Son granitos de grano medio a grueso con grandes cristales de plagioclasa, cuarzo, microclina, biotita y moscovita. Los minerales accesorios más frecuentes son el apatito, circón, sillimanita, clorita y epidota.

c) Granodiorita tardía (granitos de Porriño):

Engloba los granitoides posthercánicos del macizo circunscrito de Porriño, cuyas facies han sido denominadas de forma global como “granitos de Porriño” (Floor, 1966). Presenta contornos redondeados y contactos netos con las rocas encajantes, aunque ocasionalmente hay bordes de enfriamiento de escaso desarrollo. Según la foliación de flujo el plutón habría intruido como un cuerpo cilíndrico culminado por una cúpula expansiva (estructura en coliflor) y el emplazamiento sería posterior a la segunda fase de deformación (postcinemático) con una edad estimada de 260 a 280 millones de años. Se distinguen tres facies graníticas principales:

1-. Facies de granodiorita biotítica-anfibólica de grano grueso.

Se trata de la facies más abundante. Es una roca clara, ligeramente rosada, de grano grueso a medio, de textura porfídica con fenocristales de feldespato, principalmente plagioclasa. La biotita es la mica principal y suele presentar inclusiones de rutilo, circón y alanita. También aparece hornblenda dentro de los cristales de plagioclasa y otros minerales accesorios son la esfena y el apatito.

2-. Facies de granito inequigranular rosado de grano grueso.

Se diferencia de la facies anterior en una mayor presencia de K y una textura que pasa de ser porfídica a inequigranular panxenomórfica con intercrecimientos en los cristales más gruesos. Esta transición es gradual. El feldespato potásico es por lo menos tan abundante como la plagioclasa y ambos suponen los cristales de mayor tamaño. La biotita es abundante y en ella se sitúan los accesorios como el circón, apatito, esfena, alanita y titanita. En esta facies no hay anfíboles. De esta facies se extrae el Rosa Porriño.

3.- Facies de granodiorita biotítica-anfibolítica de grano fino-medio con fenocristales dispersos.

Desde un punto de vista mineralógico es similar a la facies común pero presenta una granulometría más homogénea, mayor presencia de hornblenda y una transición entre ambas bastante marcada. Su composición mineral consta de cuarzo, microclina, plagioclasas, biotita y anfíbol.

2. Serie alcalina:

Podemos distinguir dos tipos de granitoides:

d) Granitos cataclásticos:

Granitos afectados por una intensa deformación cataclástica que origina una marcada foliación en la roca, con las micas paralelas a la misma. Se corresponde con la segunda fase de la orogenia Hercínico. Son rocas de grano medio, equigranulares los minerales leucocráticos y las micas, biotita y moscovita, se presentan en cristales de menor tamaño. Los minerales accesorios son rutilo, circón, apatito, clorita y turmalina.

e) Granitos de dos micas poco deformados:

Aparecen en un gran afloramiento al O de Porriño. Presentan una foliación menos marcada que los anteriores, por lo que se cree que son ligeramente más antiguos que los cataclásticos. Se observan cuatro facies:

1.- Granitos equigranulares de grano medio a grueso:

Se puede considerar como la facies común al ser la más abundante. Sus componentes son cuarzo, microclina, plagioclasas, moscovita y biotita, siendo la primera la más frecuente de las micas. Los minerales accesorios son apatito, circón, rutilo, clorita y sillimanita.

2- Granitos porfiroides:

Presenta las mismas características minerales que la facies común pero el feldespato potásico se presenta en cristales de mayor tamaño.

3.- Granitos inequigranulares de grano medio a fino:

Se diferencian de la facies común en una mayor presencia de moscovita y un emplazamiento posterior a la facies común como se ve en las intrusiones en las que aflora.

4.- Granitos moscovíticos:

También corresponden a emplazamientos más tardíos que la facies común, apareciendo en diques en los bordes del macizo de la facies común. Lo más destacado de su mineralogía es la presencia de cristales de granate y de moscovita como mica principal, relegando a la biotita a la condición de accesorio.

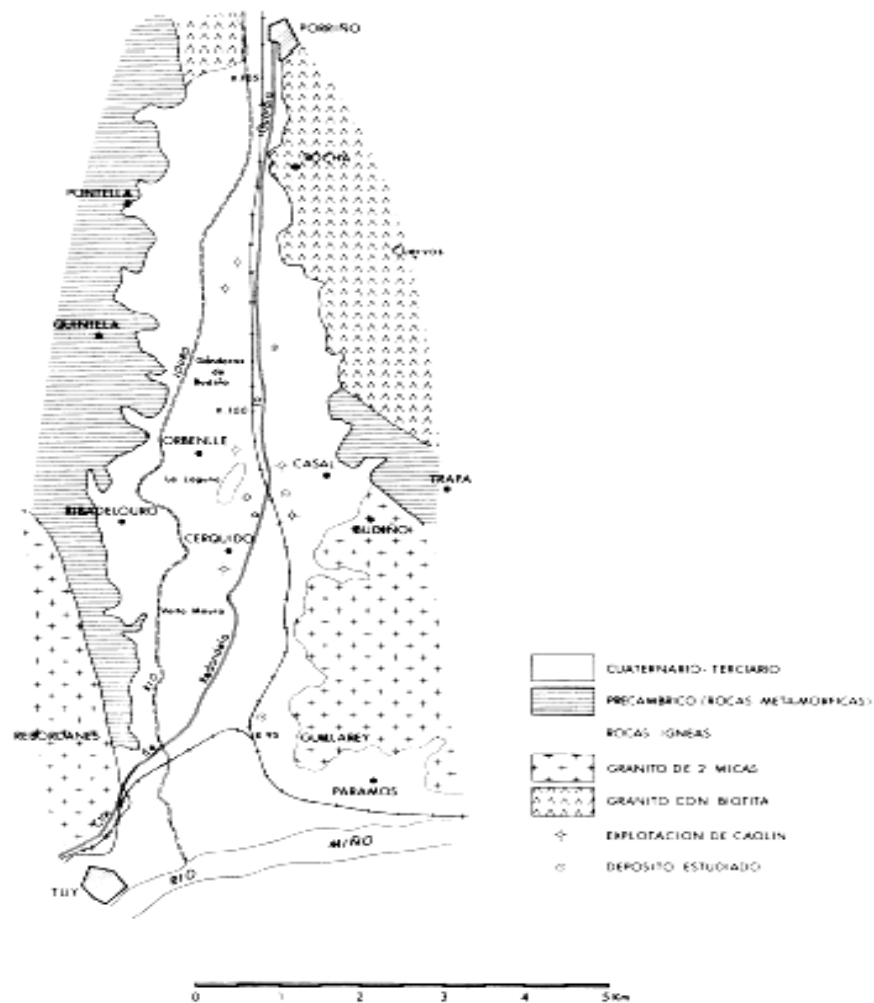


Figura 2.12. Esquema geológico de la zona de O Porriño a lo largo del cauce del río Louro. (Fuente: Carames, 1983)

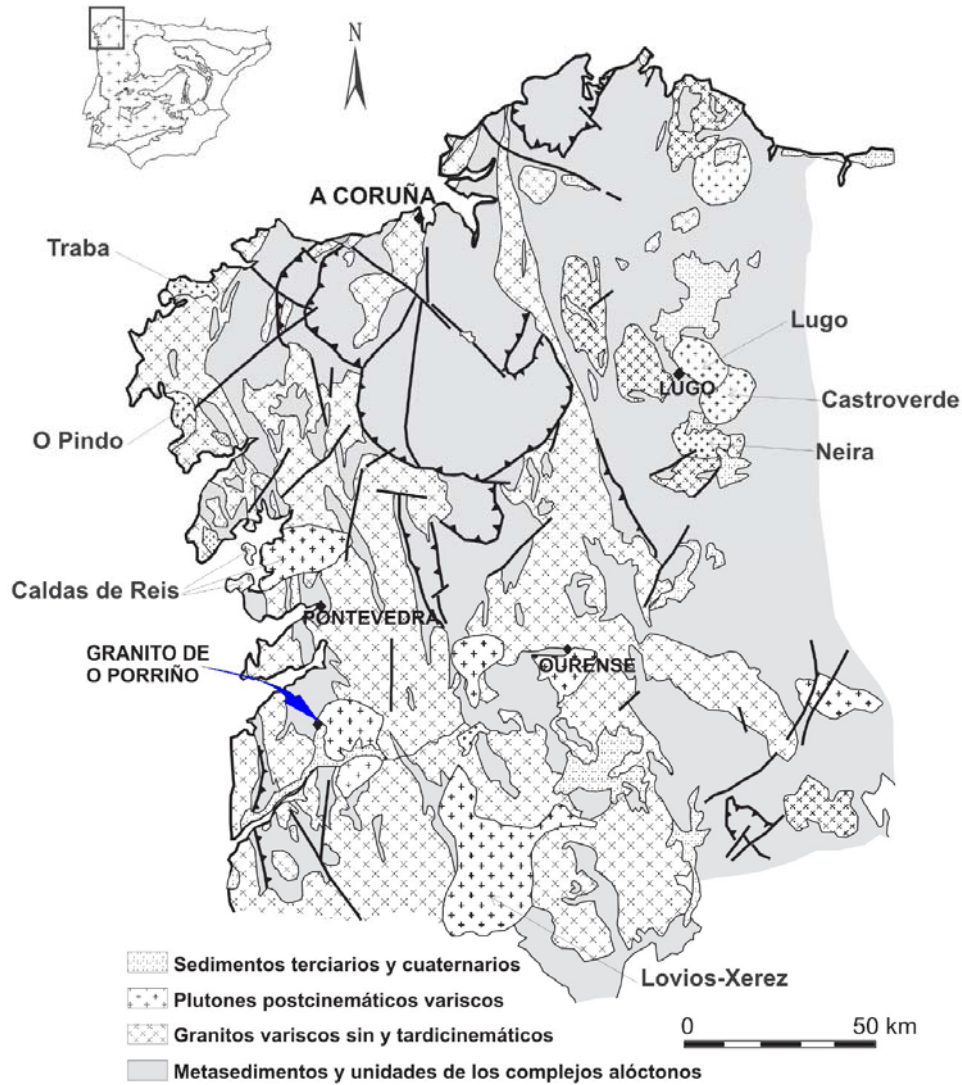


Figura 2.13. Mapa de emplazamiento de plutones en Galicia. (Fuente: Bellido, 2005)

3 CARACTERÍSTICAS HIDROGEO MECÁNICAS DE LOS SERRINES DE GRANITO.

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos tras la caracterización hidrogeomecánica efectuada, así como se describen brevemente algunas características geoquímicas. Los ensayos se refieren tanto a las muestras recogidas en las explotaciones como a las muestras procedentes del sondeo y que, en cada caso serán identificadas según su origen. Los criterios de muestreo y selección de muestras tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales: La representatividad de los materiales desde el punto de vista de la caracterización de su homogeneidad y de la disponibilidad y facilidad de acceso para la realización del muestreo.

En relación con la representatividad de las muestras tomadas, de acuerdo con la AGG, se seleccionaron tres de los centros de labor en los que la producción de serrines de granito generado por el aserrado con telares es más importante. Además, en uno de dichos centros se muestrearon también serrines de granito generados mediante corte con disco (Tabla 3.1).

Muestra	Tipo	Denominación alternativa
M1	Serrín de telar	GRA
M2	Serrín de telar	GRE
M3	Serrín de telar	GGR
M4	Serrín de disco	GSIG
FM	Granalla de acero	-
HC	Hidrato de Cal	-
RP	Granito “Rosa Porriño”	-
AT-1	Agua de abastecimiento (pozo)	-
AR-1	Agua de recirculación (lodos)	-

Tabla 3.1. Resumen de las muestras empleadas en los distintos ensayos y determinaciones del presente estudio. M1 es la muestra de referencia.

A lo largo del estudio se identificó la necesidad de no circunscribir el estudio al ámbito específico de los serrines puesto que, en la medida que existen diversos elementos ejerciendo un control en sus propiedades, su caracterización es también importante. De acuerdo con ello se tomaron muestras de granalla de acero y de la cal empleada en el proceso de corte así como del agua de abastecimiento del circuito de telares y del propio sistema de recirculación y resuspensión de fangos. Todas estas muestras fueron seleccionadas de un único centro de labor: el relacionado con la producción de la muestra denominada M1 y que, dentro del contexto de la Comarca de O Porriño, es la principal productora de serrines. Asimismo se consideró de interés el realizar análisis químicos de la litología tipo de la comarca, el granito “*Rosa Porriño*”

Las determinaciones efectuadas con las muestras procedentes de las explotaciones se resumen en la Tabla 3.2:

Elementos mayores-FRX	
Elementos traza-ICP	Granulometría
Mineralogía-DRX	Densidad del Sólido
ATD/TG + IR	Humedad Natural
SEM/EDS	Límites de Atterberg
Contenido en CO ₃	Próctor normal
Contenido en Cl y SO ₄	Próctor modificado
Lixiviación DIN 38414	CBR
Superficie específica BET	Consolidación
Recuperación material magnético	Corte Directo

Tabla 3.2. Resumen de los ensayos y determinaciones realizadas en el contexto del presente estudio (en negrita) y de la tesis de Ana Vázquez (2006)

El instrumental y equipo utilizados a lo largo del estudio se encuentran ubicados en el Laboratorio de Ingeniería del Terreno “*Gonzalo Vabamondé*” (ETSICCP) así como en los Servicios Xerais de Apoio a Investigación (SXAIN) de la UDC. La determinación de las alcalinidades se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ETSICCP) de la UDC. También se realizaron dos ensayos C.B.R. en el laboratorio de Ingeniería del Terreno de la Escuela de Ingeniería de la UCLM en Ciudad Real.

Además se ha realizado un sondeo con la finalidad de conocer el comportamiento de los serrines una vez que son depositados y se produce la potencial oxidación de la granalla.. La realización de este ensayo es posible porque existe un gran depósito de serrines que rellenan una antigua cantera de arcillas, constituyendo un laboratorio, a escala real, sobre el cual estudiar el comportamiento geotécnico de los serrines, bajo unas condiciones parecidas a las que eventualmente se darían obras civiles de relleno. El relleno de O Cerquido, junto a la autovía A-52, representa el producto de la transformación de roca ornamental de una única empresa a lo largo de unos 7 años. Pese a este dato no es posible precisar las edades de las muestras del sondeo ya que los depósitos no han sido periódicos ni homogéneos. En el relleno se han recogido en torno a 350.000 m³ de finos ocupando el hueco dejado por una antigua explotación de arcillas para refractarios. De acuerdo con la información disponible, el volumen mayor de los serrines depositados en el relleno de O Cerquido es producto de los telares de corte. Asimismo, la tipología más significativa de granito cortado es el *Rosa Porriño*, cuya composición servirá de referencia a la hora de comparar con los datos obtenidos a partir de las muestras del relleno.

Las técnicas empleadas en el campo han consistido en sondeos mecánicos a rotación (con recuperación de testigo y diámetro 101 mm y sin recuperación de testigo, con diámetro 113 mm), así como distintos tipos de ensayos penetrométricos (Dynamic Penetration Super Heavy - DPSH y Standard Penetration Test - SPT). Uno de los sondeos mecánicos fue empleado, además, para la realización de un ensayo hidráulico tipo Lefranc. Las distintas técnicas desarrolladas fueron ejecutadas por personal especializado de la empresa Laboratorios del Noroeste, S.A bajo la supervisión de los investigadores del proyecto. Durante la realización del sondeo con recuperación de testigo se tomaron 3 muestras inalteradas a profundidades de 5.5, 10.0 y 15m, y se realizaron 5 DPSH. La densidad de muestreo en el testigo recuperado fue de 1 toma cada 50 cm y estas muestras han sido caracterizadas con los mismos métodos y procedimientos que el resto de muestras procedentes de las explotaciones. Los ensayos propios del sondeo se detallan en la tabla 3.3.

Tipo	Nº de ensayos	UNE	Comentarios
Sondeo	2	N/A	con/sin recuperación de testigo ($\phi=101$ y 113 mm)
DPSH	5	103801-94	-
SPT	3	103800-92	-
Muestra inalterada	3	7371-75	MI-1, MI-2, MI-3
Lefranc	1	N/A	-

Tabla 3.3. Resumen de los ensayos de campo realizados en el relleno de O Cerquido (Porriño)

3.1 NATURALEZA DEL MATERIAL

Los serrines de granito presentan un aspecto homogéneo limo-arcilloso de color gris (Figura 3.1) en el que no se observan grumos ni irregularidades. Como se verá más adelante, a la salida de los filtros-prensa las tortas de serrines presentan una humedad cercana al óptimo Proctor normal.

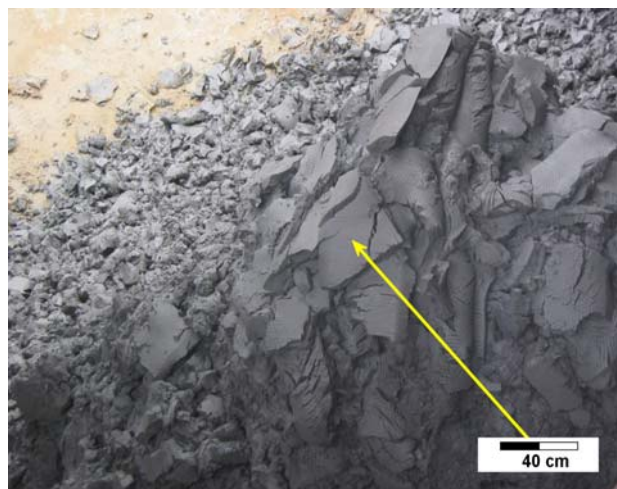


Figura 3.1. Vista general de los serrines de granito a la salida de los filtros-prensa (M3). Las tortas que se observan en primer plano tienen unas dimensiones aproximadas de 40x40 cm. Empresa de transformación de Atios (Pontevedra)

Cuando los serrines pierden agua por exposición al ambiente en un medio de humedad moderada (45-60%), en el que es posible la circulación de aire, se perciben los efectos de la pérdida de agua en la formación de grumos o agregados fácilmente disgregables con la mano, generándose un polvillo de partículas de grano fino. Por otra parte, si los serrines sufren la exposición a un medio que permite la aireación pero dificulta la evaporación (como confinados en una bolsa de plástico con poca superficie expuesta), el

comportamiento es muy distinto ya que se forman costras y concreciones de oxihidróxidos de Fe. Estas formaciones también se observan en la parte superficial (**hardpans**) de los depósitos de serrín realizados en el exterior de las explotaciones o en vertederos controlados. En las figuras 3.2 y 3.3 se observa el aspecto de estas costras al natural y mediante microscopía electrónica.



Figura 3.2. Costra de óxihidróxidos de Fe formada a partir de la oxidación de la granalla presente en los serrines cuando estos son expuestos a la atmósfera., manteniendo altos contenidos de humedad.

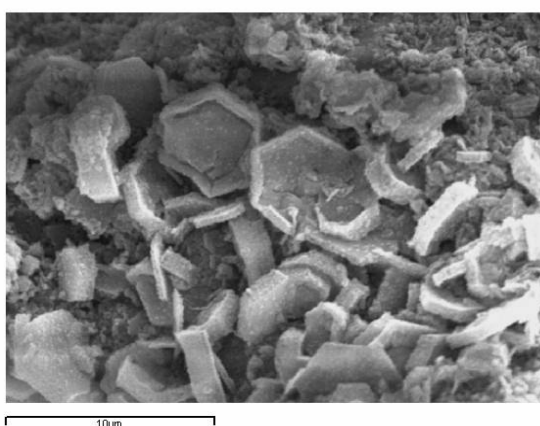


Figura 3.3. Aspecto al microscopio de las costras, formadas por minerales de neoformación en cristales con aspecto tabular o hexagonal correspondientes a óxidos e hidróxidos de Fe. (McGill et al., 1976; Roh et al., 2000; Legrand et al., 2001; Géhin et al., 2002; Peulon et al., 2003) .

Estas costras pueden ser importantes ya que son susceptibles de modificar determinadas propiedades de los serrines, como la resistencia, (que se incrementa al ser mayor la cohesión), o la capacidad de infiltración y erosionabilidad del agua, (que disminuye al formarse costras superficiales que impermeabilizan el terreno). Además, por sí mismos, pueden inmovilizar metales y otros contaminantes.

La composición química y mineralógica de los serrines se realizó mediante fluorescencia y difracción de rayos X, como se explica en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos son un reflejo de la composición de la roca ígnea de la que proceden. Si se compara la composición química de cada muestra con la de la variedad más común de la zona, *Rosa Porriño* (RP), y la del hidrato de cal (HC), usado en el proceso de corte se obtiene la tabla 3.4 con los elementos mayores y traza:

Muestra	M1	M2	M3	M4	RP	HC
SiO ₂	66,1	66	67,5	69,7	71,9	4
Al ₂ O ₃	13	14,4	13,6	15,8	13,7	1,2
Fe ₂ O ₃	6,6	6	5,3	1,59	2,55	0,58
CaO	5,4	4,2	3,6	1,8	0,94	54,2
K ₂ O	4,7	4,8	5	4,5	6,94	0,4
Na ₂ O	3,01	3,22	3,00	4,00	3,34	0,7
MgO	0,52	0,5	0,39	0,5	0,25	0,4
TiO ₂	0,23	0,25	0,26	0,18	0,2	0,05
P ₂ O ₅	0,13	0,37	0,23	0,2	0,05	0,02
MnO	0,08	0,071	0,07	0,03	0,02	0,01
Cl	0,05	0,08	0,10	0,02	n.d.	n.d.
SO ₃	0,06	0,047	0,03	0,02	n.d.	0,85
BaO	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	n.d.
Rb ₂ O	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,002
ZrO ₂	0,02	0,02	0,02	0,01	n.d.	n.d.
CuO	0,01	0,01	0,09	0,06	0,01	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,013	n.d.	0,05	n.d.
SrO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,006	0,02
ZnO	0,01	0,01	0,013	0,01	0,01	0,02
NiO	0,01	0,01	0,006	0,01	n.d.	0,004
PbO	0,005	0,004	n.d.	0,01	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	0,004	0,003	0,006	0,002	0,007	n.d.
Ga ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	0,003	n.d.	n.d.
CoO	n.d.	n.d.	n.d.	0,022	n.d.	n.d.
PPC	augment o	augment o	0,67	1	n.d.	381

Tabla 3.4. Composición química (% en peso) de los elementos mayores y algunos elementos traza de los serrines de granito determinados mediante fluorescencia de rayos X. Cinorg: carbono inorgánico; PPC: pérdida por calcinación; n.d: no determinado; M1, M2, M3: serrines de telar; M4: serrines de disco; RP: Rosa Porriño; HC: Hidrato de cal

La composición química (Figura 3.4) se sitúa en el entorno de los valores normales para rocas graníticas, con valores mayores de lo normal en Fe_2O_3 atribuible a la granalla metálica. Según Krauskopf y Bird (1995), la composición estaría próxima a la composición media característica de la granodiorita, datos que coinciden con Nockolds (1954) y Le Maitre (1976) aunque para Sánchez Delgado et al (2004) la variedad *Rosa Porriño* sería un monzogranito. A primera vista, la comparación entre las cuatro muestras revela que el contenido de SiO_2 y Al_2O_3 es más alto en la muestra M4 mientras que los contenidos de Fe_2O_3 , CaO y C inorgánico (en menor medida también MnO) son más bajos que los de las muestras procedentes de los telares (M1, M2 y M3). La explicación de tales diferencias podría estar ligada a dos hechos distintos: a las variaciones en la litología de las rocas a partir de las cuales se generan los serrines y a la ausencia de granalla y cal en las muestras cortadas con disco.

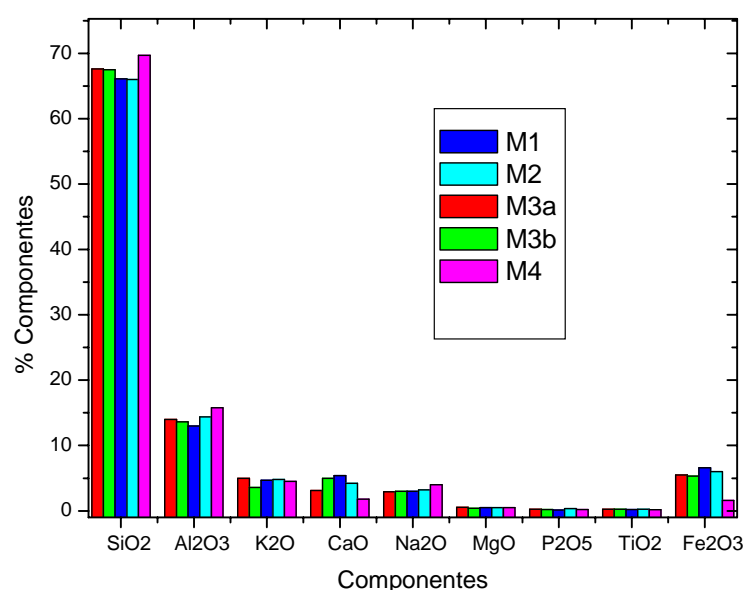


Figura 3.4. Comparación entre componentes principales de las muestras. La muestra M3a tiene el mismo origen que M3b pero con más tiempo de exposición al aire. Datos tomados de Krauskopf y Bird.

La mineralogía presente en los serrines (Figura 3.5) también refleja su origen, siendo mayoritariamente la típica de los granitoides (principalmente cuarzo, microclina, plagioclasa, biotita, moscovita y clorita) así como otros minerales secundarios, formados durante el secado y carbonatación de los serrines (calcita) o bien como producto de la oxidación de la granalla y virutas de fleje (green rust y otros oxihidróxidos de Fe). Si bien la

técnica aplicada no es lo suficientemente sensible como para poder identificar pequeñas variaciones en la proporción de los distintos minerales que componen los lodos, si es posible observar la escasa cantidad de calcita presente en la muestra M4, lo cual es indicativo de la ausencia de cal durante el proceso de corte con disco. En la Figura 2, donde se comparan las muestras estudiadas con otras rocas graníticas típicas, se observa que las diferencias sustanciales en las composiciones se dan en el Fe y el Ca, precisamente los elementos en los que se marcan las diferencias, a nivel geoquímico, de los distintos métodos de corte.

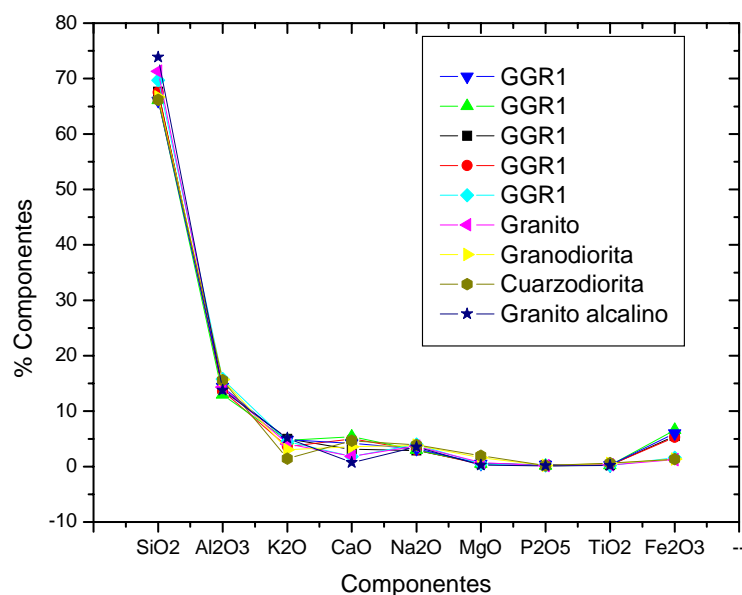


Figura 3.5. Comparativa entre las composiciones de las muestras y rocas ígneas graníticas. La muestra M3a tiene el mismo origen que M3b pero con más tiempo de exposición al aire. Datos extraídos de Krauskopf y Bird.

Las técnicas de caracterización geoquímica aplicadas a las muestras del sondeo, descritas por Vázquez (2006), permiten establecer que el vertedero está constituido por dos paquetes de serrines cuya separación física se produce a unos 7 metros de profundidad (Figuras 3.6 y 3.7). El origen de esa diferenciación cabe atribuirlo al cambio en las técnicas de producción y una consiguiente optimización en los consumos de granalla e hidrato de cal.

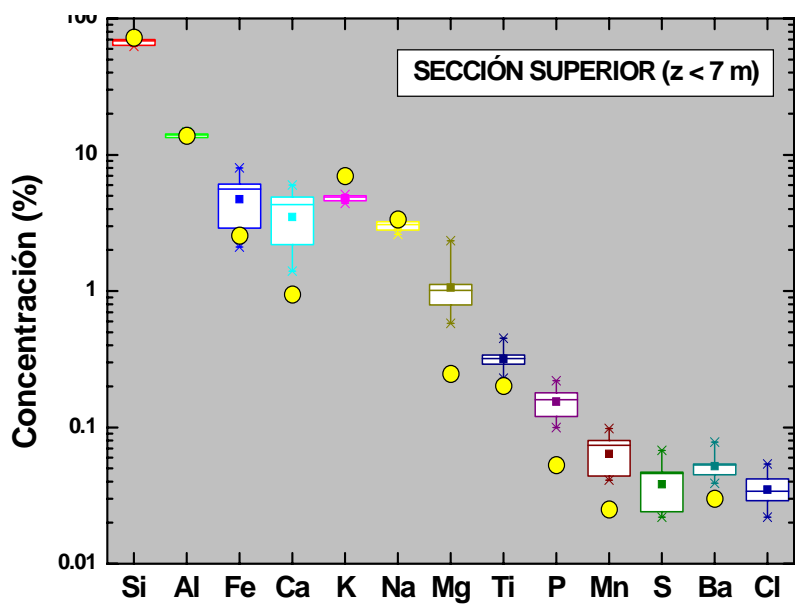


Figura 3.6. Concentración de los elementos mayoritarios en los serrines de la parte superior del sondeo. (Vázquez, 2006)

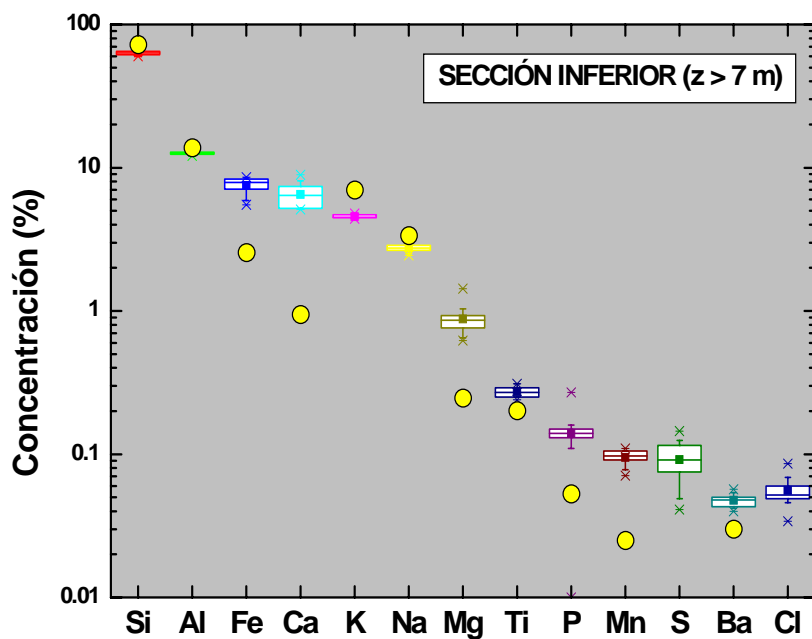


Figura 3.7. Concentración de los elementos mayoritarios en los serrines de la parte inferior del sondeo. (Vázquez, 2006)

3.2 ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN.

3.2.1 HUMEDAD NATURAL:

La humedad natural se define como la masa de agua respecto a la masa de sólido del suelo. La determinación se realizó siguiendo el método del secado en la estufa descrito en la norma UNE-EN 103-300-93.

Para determinar esta propiedad se han elegido muestras (M1) recogidas a la salida de los filtros-prensa con el fin de tener una medida lo más cercana posible a los valores con los que se originan las "tortas" de este material. Para minimizar las pérdidas de humedad durante el traslado, las muestras se colocaron en bolsas de plástico cerradas. La humedad natural de las muestras presenta una cierta variabilidad que puede ser atribuida al rendimiento de los filtros-prensa en las distintas explotaciones o a la pérdida de humedad de las tortas de serrín al ser expuestas al aire. En las tablas 3.5 y 3.6 se exponen los valores obtenidos, cuya distribución estadística se representa en la figura 3.8.

Muestras	Humedad (%)
Muestra 1	37,9
Muestra 2	36,4
Muestra 3	38,9
Muestra 4	37,7
Muestra 5	39,1
Muestra 6	36,9
Muestra 7	37,8
Muestra 8	38,2
Muestra 9	39,5

Tabla 3. 5. Determinación de humedad en muestra tipo

Valor medio de humedad:	38,08
Varianza:	1,34
Desviación estándar:	1,16

Tabla 3.6. Resultados estadísticos de las determinaciones de humedad

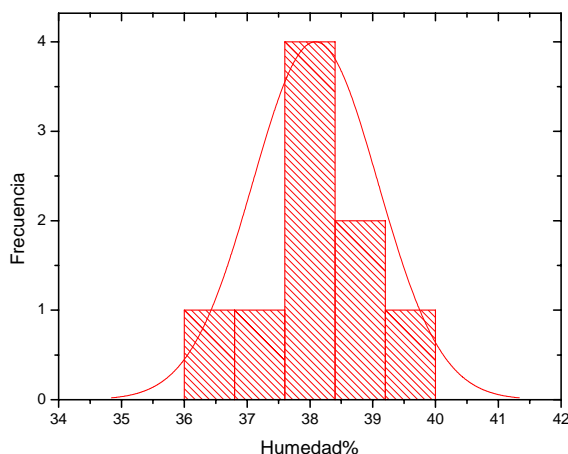


Figura 3.8. Histograma de humedades

3.2.2 DENSIDADES

Se ha determinado la densidad de las partículas sólidas (ρ_s) y la densidad seca (ρ_d) y cuyas relaciones con la masa y volumen se definen como sigue:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad \rho_a = \frac{M_T}{V_T} \quad \rho_d = \frac{M_s}{V_T}$$

donde M_s , M_T , V_s y V_T son la masa del sólido, la masa total, el volumen ocupado por el sólido y el volumen total, respectivamente.

La densidad específica o relativa de las partículas de serrines se ha determinado mediante el método del picnómetro (UNE 103-302-94). Se realizaron un total de 35 ensayos de este tipo con los resultados consignados en la Tabla 3.7.

Parámetro	M1	M2	M3	M4
ρ_s	3,120	3,225	3,233	2,515
σ	0,115	0,113	0,104	0,159
n	9	8	9	9

Tabla 3.7. Resumen de densidades de las partículas sólidas en g/cm³

Las muestras M1, M2 y M3 corresponden a serrines procedentes de telares mientras que la muestra M4 procede de serrines de corte con disco. La diferencia de valores se debe al distinto origen de las muestras ya que las que proceden de telares incorporan las partículas metálicas usadas como abrasivo en este método de corte.

Al representar las muestras de telar en un histograma se observa que los valores se ajustan a una curva de distribución normal en todos los casos. (Figura 3.9)

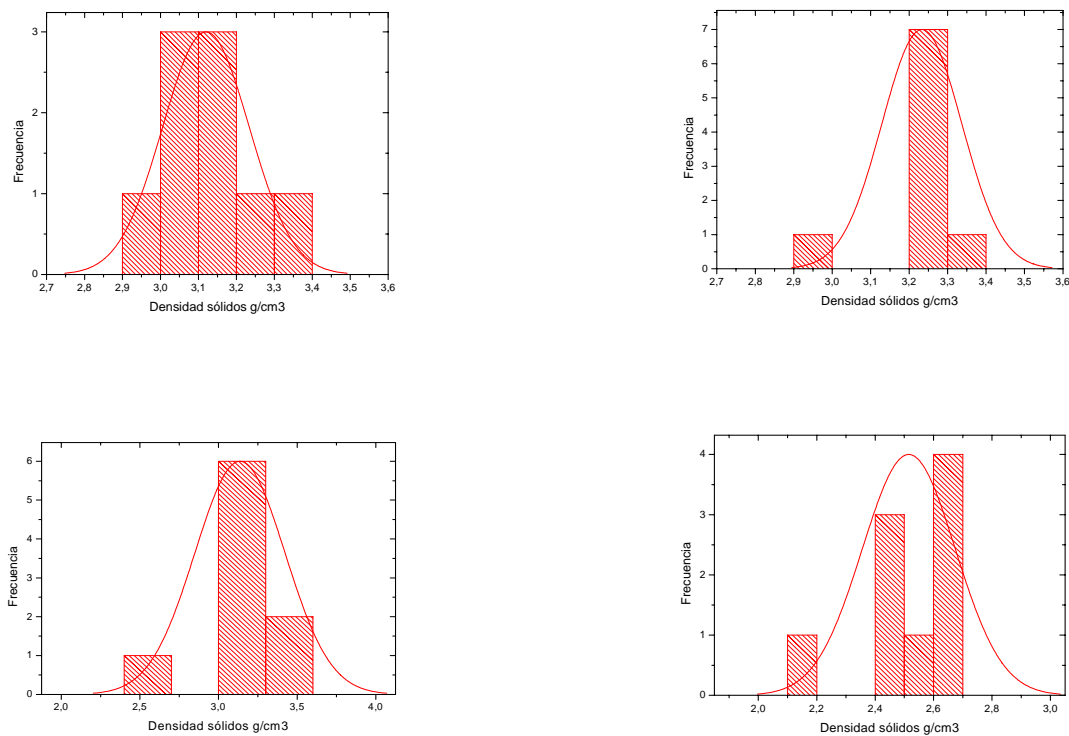


Figura 3.9 . Histogramas de las densidades. De izquierda a derecha en la parte superior, M1 y M2. En la parte inferior, M3 y M4.

La densidad media de las partículas sólidas de las muestras procedentes de corte por telares es de 3,191 g/cm³.

Si se procede de la misma manera con los valores de la muestra M4 se obtiene un histograma distinto, ya que no se ajusta tan bien como el caso de las muestras anteriores a una curva de distribución normal. La media está próxima a 2,5 g/cm³.

Al comparar estos valores de densidad específica de sólidos con asociados a las rocas granitoides se observan diferencias. Según distintos autores como Birch (1966),

Clark (1966), Davis y De Weist (1966), Belikov (1967) o Goodman (1980), la densidad media de las rocas intrusivas ácidas, (granitoides), se sitúa entre los 2,5 y los 2,7 g/cm³. Estos valores están dentro de un rango coherente con nuestros resultados para los serrines de corte por disco (M4), sin embargo los valores obtenidos para las muestras que proceden del corte en telares son mayores que todos ellos. Las diferencias son debidas a la presencia de granalla metálica durante el proceso de corte en telares y cuyas partículas, que se incorporan a los serrines, poseen una densidad específica más elevada ($\rho_s \approx 7,87$ g/cm³), lo que confiere una densidad mayor al conjunto del serrín.

En cuanto a la densidad seca, los datos se obtuvieron a partir de los edómetros y para compensar las diferencias de humedad se representó la densidad seca (Tabla 3.8) de cada muestra en un histograma (Figura 3.10):

Parámetro	M1	M2	M3	M4
ρ_d	1,19	1,11	1,55	1,27
σ	0,07	0,11	0,05	0,03
n	5	5	4	4

Tabla 3.8. Densidad seca de las muestras

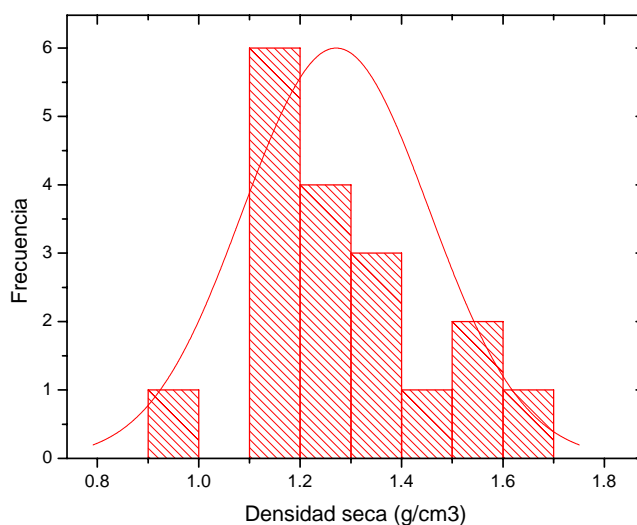


Figura 3.10. Distribución de las densidades secas de las muestras

La distribución de estos valores de ρ_d no se ajusta a una curva normal. Presenta cierta asimetría hacia los valores menores de densidad, que podría explicarse por la distinta eficiencia de los filtros-prensa de las diferentes explotaciones. Podemos observar que la densidad seca de las tortas de serrín de telar se situaría en torno a $1,2 \text{ g/cm}^3$, un valor bajo en comparación con el obtenido en nuestros ensayos de compactación (Ver Apartado 5.3).

También se ha determinado la densidad de las partículas que conforman los serrines de granito del relleno de O Cerquido en función de la profundidad. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.11.

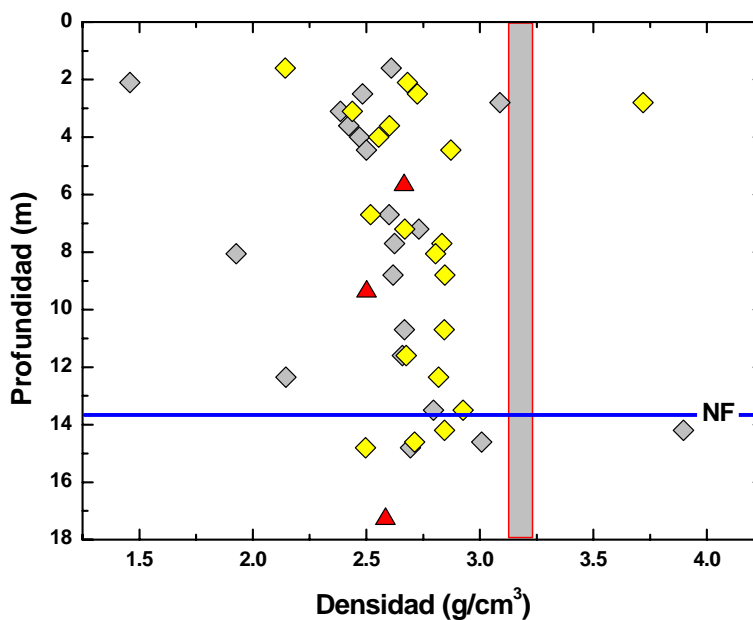


Figura 3.11. Variación de la densidad de las partículas sólidas respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea horizontal (NF) indica la posición del nivel freático en el momento de realizar los sondeos descritos en este estudio. La banda tramada en color gris se corresponde con el valor medio de la densidad de las partículas sólidas de los serrines de telar, a su salida de los filtros-prensa. Los rombos corresponden a muestras del sondeo y los triángulos a las muestras inalteradas.

Por otro lado, la figura 3.12 muestra los valores de densidad seca de las muestras del relleno de O Cerquido en función de la profundidad, y se las compara con los valores obtenidos para los óptimos de compactación en los ensayos Próctor, normal y modificado.

Se puede observar que la mayor parte de las muestras presentan densidades secas en el entorno del óptimo Próctor normal.

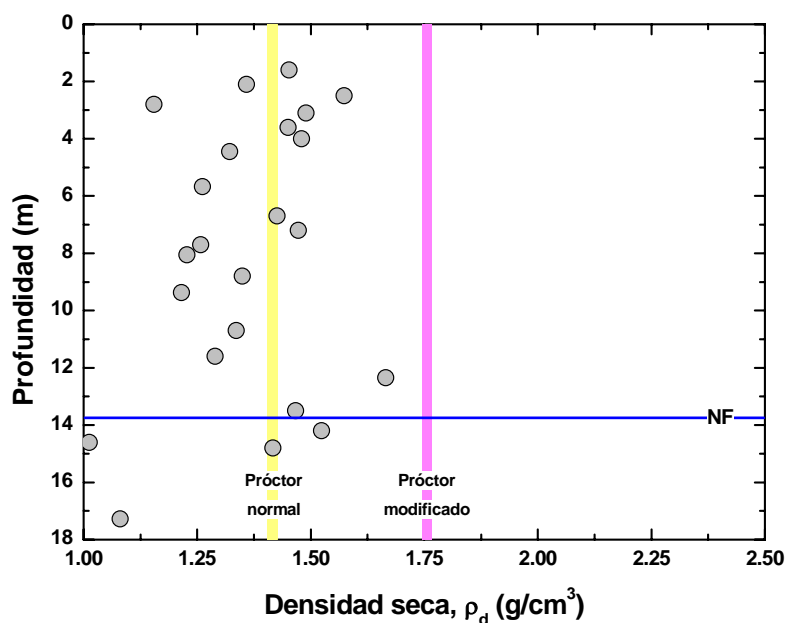


Figura 3.12. Variación de la densidad seca respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea horizontal (NF) indica la posición del nivel freático en el momento de realizar los sondeos descritos en este estudio. Las bandas tramadas corresponden al rango medio de densidad seca obtenido para los ensayos de compactación tipo Próctor normal y modificado.

3.2.3 GRANULOMETRÍA

Para determinar el tamaño de grano de los serrines, la clasificación y método convencionales (UNE 103101-1995) no son precisos al ser un material muy fino. Para este tipo de materiales suelen usarse métodos de sedimentación basados en la ley de Stokes, pero pueden resultar lentos y poco prácticos. Por ello se tomó la decisión usar una bancada óptica Coulter LS. Esta técnica se basa en la interacción que experimenta un rayo láser al chocar con una partícula, denominada de dispersión de haz láser de bajo ángulo (LALLS). La magnitud de la refracción del láser depende del tamaño de la partícula, de modo que las partículas más pequeñas provocan ángulos mayores y cada tamaño produce un comportamiento característico. De acuerdo con la técnica, los resultados obtenidos con las cuatro muestras de referencia (serrines de telar: M1, M2, M3; serrines de disco: M4) han sido representados figuras 3.13 y 3.14:

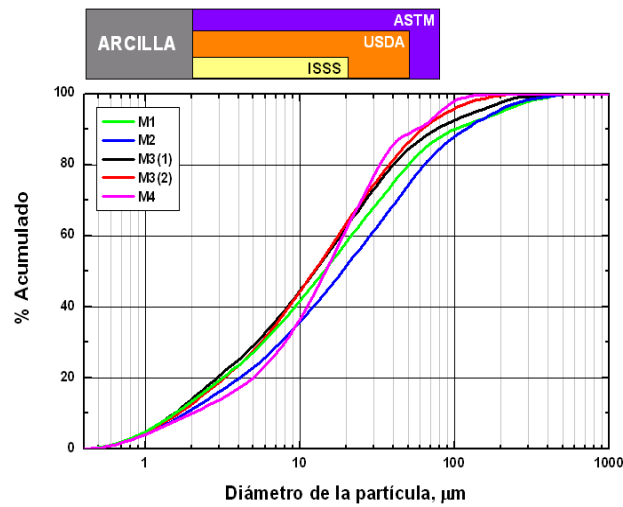


Figura 3.13. Análisis granulométrico (% acumulado) de las muestras de serrín de granito de corte con telar (M1, M2, M3(1) y M3(2) así como de corte con disco (M4). Los recuadros situados sobre el gráfico se corresponden con el límite de tamaño de grano de partículas tipo arcilla (2 mm) así como el rango de diámetros para partículas tipo limo, de acuerdo con distintas referencias. ISSS: Internacional Society of Soil Science; USDA: U.S. Department of Agriculture; ASTM: American Society for the Testing of Materials

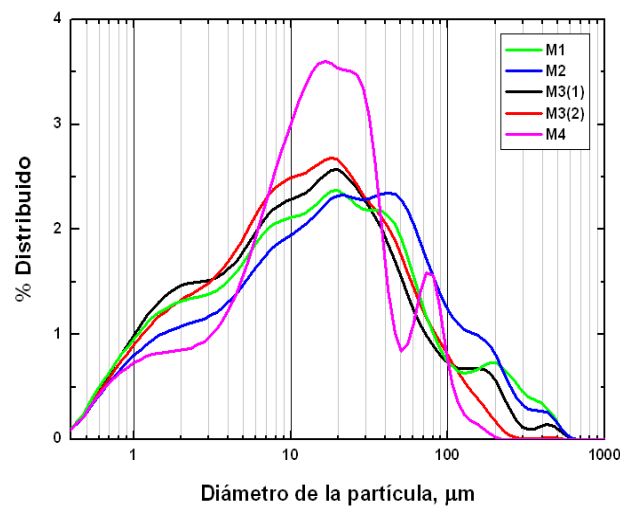


Figura 3.14. Análisis granulométrico (% distribuido) de las muestras de serrín de granito de corte con telar (M1, M2, M3(1) y M3(2), así como de corte con disco (M4). Se observa la bimodalidad de los serrines de corte con disco.

Los resultados reflejan un predominio de las partículas finas y un máximo de distribución centrado en torno a los 20 μm, si bien las muestras M4 presentan una tendencia bimodal con otro pico de distribución en torno a los 80 μm y una disminución muy significativa de partículas de diámetro cercano a los 50 μm. Este contraste granulométrico entre las muestras de corte en telares y las muestras de corte con disco se

debe a las diferencias existentes en los métodos de corte de modo que los flejes de los telares junto con la granalla, asociado a la recirculación de fluido asegurarían una distribución continua de tamaños de grano. Por otro lado, en el corte con disco la recirculación de agua es menor y el método de corte más rápido. Por ello, los serrines de disco manifiestan características singulares atribuibles al propio disco (por ejemplo el tamaño de grano del abrasivo) o de las condiciones de corte (fuerza aplicada, velocidad de rotación, etc.; Polini y Turchetta, 2004).

Para describir estos materiales atendiendo al tamaño de sus partículas han de conocerse algunos parámetros granulométricos a partir de las determinaciones por láser (Tabla 3.9).

Muestra	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	% arena	% limo	% arcilla	Log k _H	Log k _{K-C}
M1	1,6	5,8	21,6	13,9	1,0	20,0	66,5	13,5	-7,59	-6,16
M2	1,8	7,5	28,3	15,5	1,1	26,0	62,7	11,3	-7,49	-6,08
M3	1,6	8,0	18,1	9,6	1,0	14,7	72,3	13,1	-7,59	-6,18
M4	2,0	5,4	19,1	11,4	1,7	11,3	79,1	9,6	-7,40	-6,03

Tabla 3.9. Descriptores granulométricos de los serrines de corte de granito. C_u: coeficiente de uniformidad; C_c: coeficiente de curvatura; D₁₀, D₃₀ y D₆₀ corresponden al diámetro más allá del cual pasa el 10, 30 y 60 % del material, respectivamente. Log k_H y Log k_{K-C} representan el valor del coeficiente de permeabilidad (m/s) calculado a partir de la fórmula de Hazen (1892) y la ecuación de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). En el primer caso, se tomó como diámetro representativo D₁₀ y 0.01 para C_c. En el segundo caso, el índice de huecos es aproximadamente igual al del óptimo Próctor normal

Se denomina "diámetro eficaz", D₁₀, al correspondiente al 10% más fino de la curva granulométrica. También extendió el concepto de diámetro eficaz para el 60% más fino, D₆₀, y con ambos coeficientes definió el *coeficiente de uniformidad*, C_u, como la relación entre ambos. Su definición implica que los suelos más uniformes presentan valores menores de C_u.

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

Este coeficiente es un indicador de la dispersión, facilitando el estudio de la curva granulométrica junto a otros recursos de la Estadística. (Hatch y Choate 1929; Hatch 1933).

Por su parte el coeficiente de curvatura C_c se define como:

$$C_c = (D_{30})^2 / D_{60} * D_{10}$$

Por otro lado, como se observa en la figura 3.15, los serrines son limos arcillosos (*silt loam*) conforme a la clasificación USDA (Soil Survey Staff, 1993).

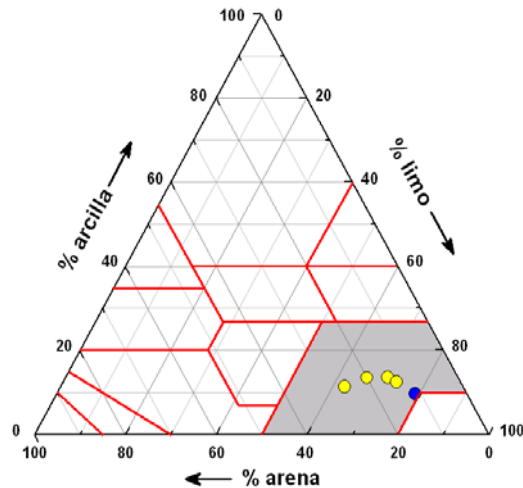


Figura 3.15. Clasificación textural de los serrines de granito, de acuerdo con el esquema de U.S. Department of Agriculture. De acuerdo con la misma, los serrines serían unos limos arcillosos (silt loam). Los círculos de color amarillo corresponden a serrines de telar mientras que el azul es un serrín de corte con disco

En cuanto al sondeo, la totalidad de muestras del testigo de O Cerquido (20 muestras y 3 muestras inalteradas) fueron sometidas a ensayos de tipo granulométrico, cuyos resultados se presentan en la figuras 3.16, 3.17 y 3.18.

Los resultados reflejan un predominio de las partículas pequeñas y un máximo de distribución centrado en torno a los 20 μm en todos los casos. Desde un punto de vista descriptivo, la granulometría de los serrines de granito procedentes de telares manifiesta una buena clasificación. Es de destacar, no obstante, la tendencia manifiesta un aumento el tamaño de grano medio en función de la profundidad del relleno. Ello es evidente al observar los coeficientes de curvatura e uniformidad de las figuras 3.17 y 3.18.

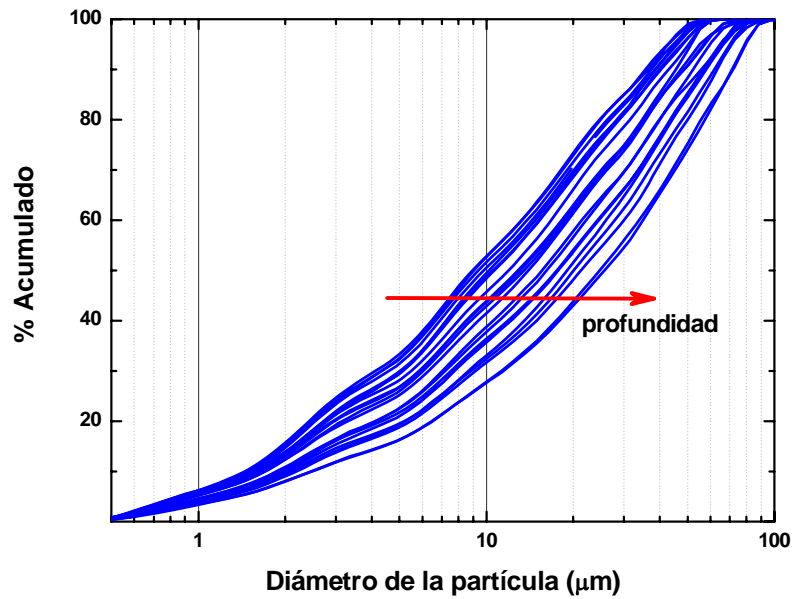


Figura 3.16 . Análisis granulométrico (curvas de porcentaje acumulado) de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). El análisis evidencia un cierto incremento del tamaño medio de las partículas que conforman los serrines a medida que la profundidad del relleno es mayor

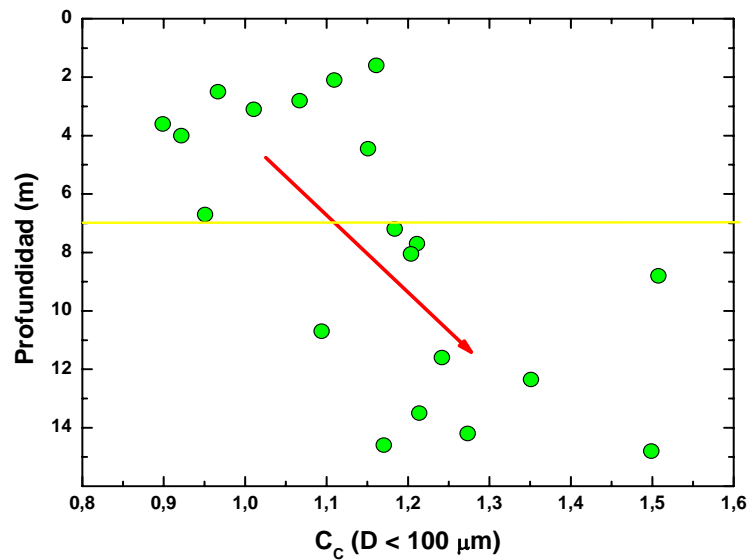


Figura 3.17 . Variación del coeficiente de curvatura (C_c) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea amarilla marca el límite de los 7m.

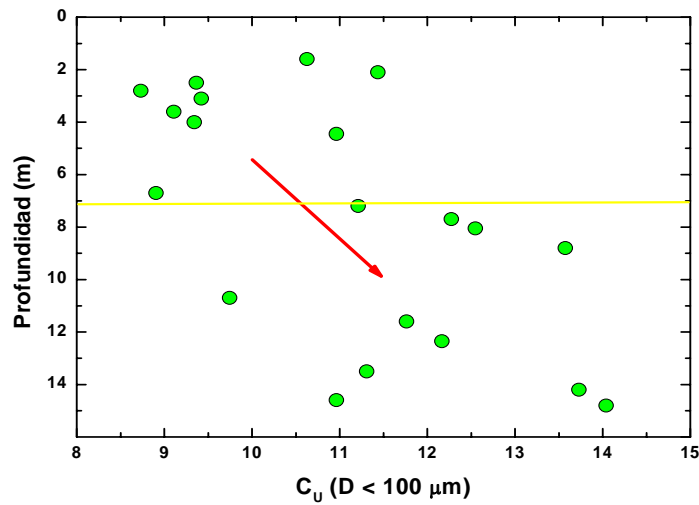


Figura 3.18 . Variación del coeficiente de uniformidad (C_u) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea amarilla marca el límite de los 7m.

Al analizar la distribución granulométrica de la fracción más gruesa, se observa una ligera tendencia hacia tamaños de grano mayor conforme se gana en profundidad, (ver figura 3.19), por lo parece que la oxidación superficial no ha formado acúmulos de partículas metálicas y serrines de relevancia.

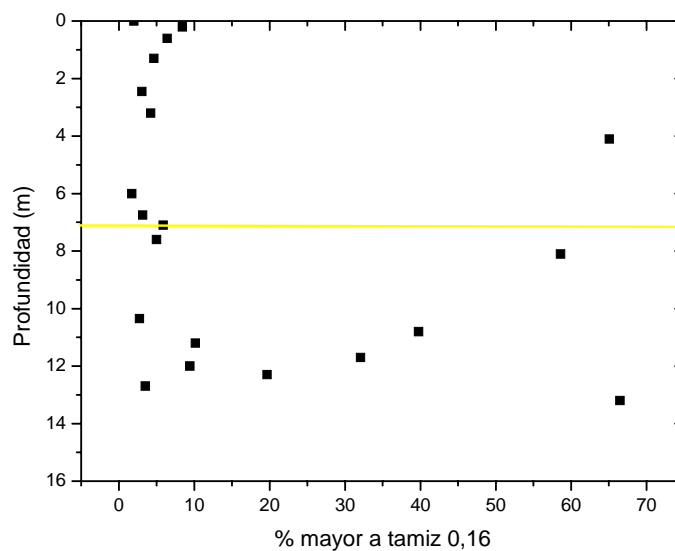


Figura 3.19. Distribución granulométrica de las partículas gruesas del sondeo en relación a la profundidad. La línea azul marca el límite de los 7m.

3.2.4 PLASTICIDAD. GRÁFICO DE CASAGRANDE Y CLASIFICACIÓN USCS

Uno de los condicionantes en el comportamiento geotécnico de un suelo de grano fino es la cantidad de agua que posee y cómo esta interacciona con las partículas de dicho suelo. La determinación de la plasticidad se realiza mediante los límites definidos por Atterberg en 1911 para una clasificación de suelos agrícolas. Sus métodos fueron precisados posteriormente por Casagrande en 1932. Para los granitos se ha determinado el límite líquido, ω_L , que separa el estado semilíquido o viscoso del estado plástico, y el límite plástico, ω_P , que separa el estado semisólido del sólido. La diferencia entre ambos es el llamado índice de plasticidad, (IP), y el rango de humedades en los que el suelo presenta plasticidad es el denominado *dominio plástico*. El ensayo para la determinación de este límite líquido está regulado por la norma UNE 103-103-94, mientras que la norma UNE 103-104-93 indica como obtener el límite plástico.

Otro parámetro relacionado con la plasticidad de un suelo es la proporción de partículas de tamaño arcilla que tiene, es la llamada *actividad* (A), definida por Skempton (1953) como:

$$A = \frac{IP}{\% \text{arcilla(en peso)}}$$

De acuerdo con el mismo, se pueden definir tres categorías de suelo: no activos ($A < 0.75$), normales ($0.75 < A < 1.25$) y activos ($A > 1.25$). Estos últimos, los más problemáticos, se caracterizarían porque experimentan un gran cambio de volumen al humectarse, una gran retracción al ser secado y, por último, ser químicamente muy reactivos. En la tabla 3.10 se presentan los siguientes valores:

Muestra	ω_L	ω_P	IP	A
M1	41,7	32,1	9,6	0,71
M2	39,1	32,3	6,8	0,60
M3	44,4	37,1	7,2	0,55
M4	38,4	31,1	7,4	0,77

Tabla 3.10. Límites de Atterberg e índices de consistencia de los serrines de granito caracterizados. ω_L : Límite líquido; ω_P : Límite plástico; IP: Índice plástico; IF: Índice de fluidez; A: actividad, de acuerdo con Skempton (1953)

De acuerdo con los resultados de la tabla los serrines ocupan en la carta de Casagrande la posición indicada en la figura 3.20. Se observa que para la mayor parte de las muestras estudiadas el límite líquido tiene un valor en torno al 40 % mientras que el límite plástico se sitúa hacia el 32 %. Por consiguiente, el índice plástico ronda el 7% que, de acuerdo con el gráfico de Casagrande, se calificaría los serrines como de "baja plasticidad". Por otro lado, este gráfico junto con los análisis granulométricos realizados permite clasificar a los serrines de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D 2487-00), en el que la totalidad de las muestras de serrín de granito analizadas corresponderían a la categoría ML.

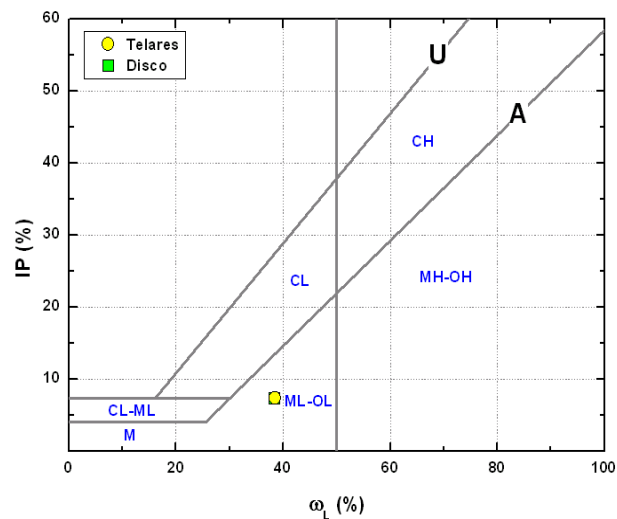


Figura 3.20. Gráfico de Casagrande y proyección de los serrines de telar y de corte con disco (ambos valores se superponen)

Según los valores de actividad de Skempton los serrines son materiales "no activos" y sólo la muestra M4 se sitúa cerca del límite con los materiales "normales". Hay que reseñar que en la mayor parte de los suelos naturales, la fracción granulométrica arcilla (< 2 μm) está conformada por minerales de la arcilla mientras que en nuestro caso se trata de los mismos minerales de la roca granítica (cuarzo, feldespatos,...) o del proceso de corte y su naturaleza no es arcillosa. En cierto sentido, esta es la razón mineralógica de la baja plasticidad de unos materiales que, de acuerdo con su granulometría, debieran ser más plásticos. No son perceptibles diferencias de comportamiento entre los serrines de telar y los de corte con disco.

Los resultados de las determinaciones de las muestras del sondeo se presentan gráficamente en las figuras 3.21 y 3.22 y en la tabla 3.11. Atendiendo a la fracción de partículas con granulometría arcilla de los serrines (entre el 10 y el 15 % en peso) así como a los correspondientes índice plástico, el valor de la actividad de Skempton (Tabla 3.10) indicaría que se trata de materiales clasificables como ‘no activos’ o ‘normales’. La interpretación de este indicador sugiere que los serrines del relleno no presentan tendencia a variar significativamente su volumen al humedecerse o secarse, y su reactividad química sería limitada, aunque hay que considerar la oxidación que puede sufrir la granalla metálica. Además, como se observa en la figura 3.23, el material del sondeo puede clasificarse como un suelo ML de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

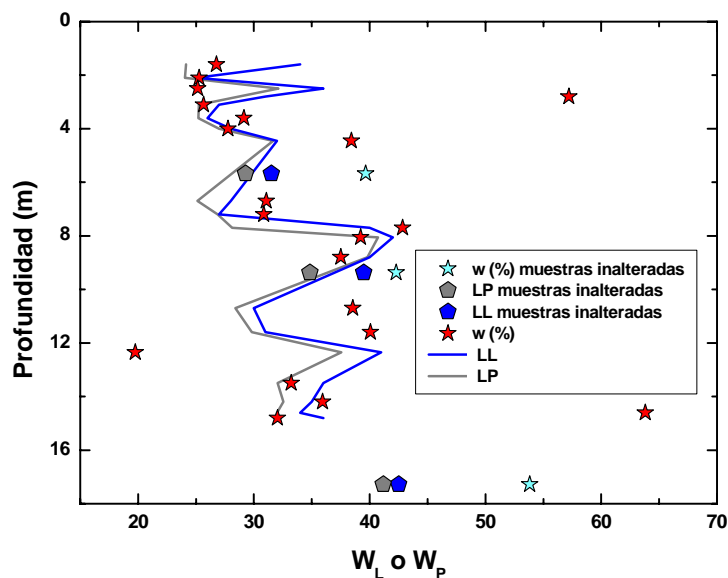


Figura 3.21. Variación de los límites de Atterberg (límite líquido, WL y límite plástico, WP) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño)

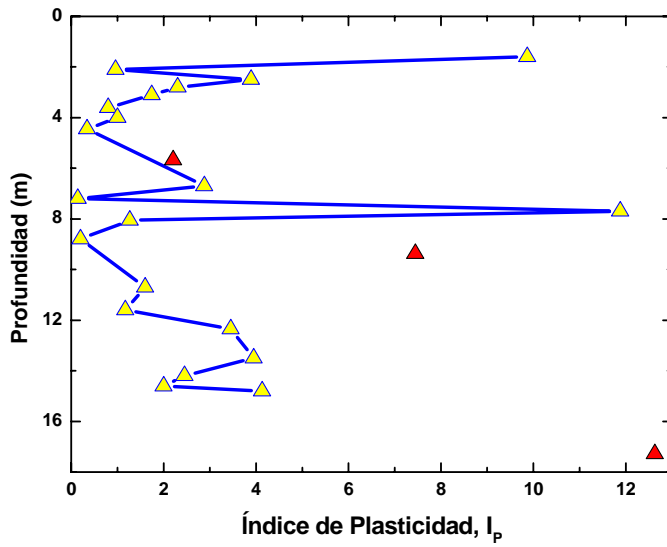


Figura 3.22. Variación del índice de plasticidad respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño)

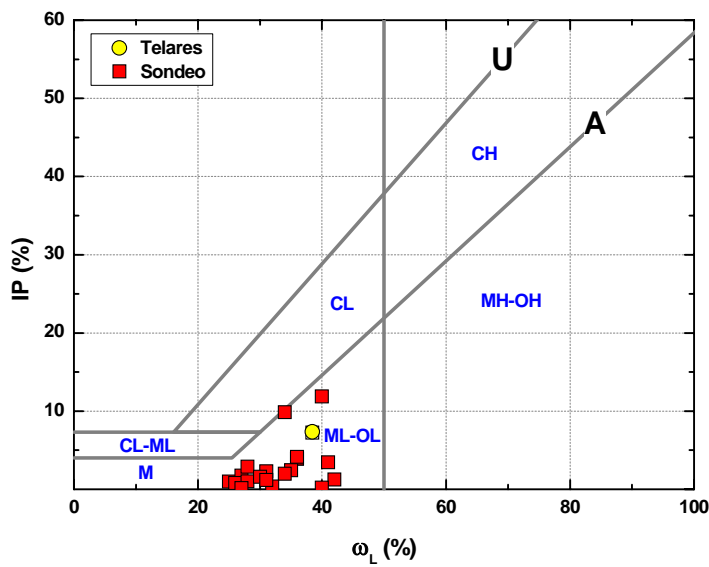


Figura 3.23. Gráfico de Casagrande para la clasificación de los serrines de granito del sondeo de O Cerquido (Porriño). Por comparación también se muestran los valores obtenidos para los serrines de telar muestreados en filtros-prensa.

Los resultados obtenidos ponen en evidencia un aumento con la profundidad de diversos parámetros tales como el contenido de humedad, los límites de Atterberg y la porosidad. Éste es un fenómeno curioso, ya que normalmente al aumentar la carga

litostática los materiales se compactan más y su porosidad, por tanto, disminuye. En nuestro caso, el aumento de la porosidad puede deberse a la forma de empaquetarse que tengan los pequeños granos que conforman los serrines de granito estudiados y las variaciones de humedad estarían relacionadas con la forma de vertido de los serrines, entre los que podrían formarse bolsas de agua. También, tal y como se ve en la figura 3.21, hay muestras con un contenido de humedad superior al límite líquido, lo que indica que en condiciones de saturación el material no tiene consistencia y el hecho de superar este límite líquido indica que el material podría fluir.

Muestra	Prof. (m)	LP	w (%)	LL	IP	IL	ρ_s g/cm ³	σ_v (kN/m ²)	u_z (kN/m ²)	σ'_v (kN/m ²)	n	e	ρ_{ap} g/cm ³	ρ_d g/cm ³	γ_{ap} (kN/m ³)
S-1	1.6	24.1	26.7	34	9.87	0.27	2.38	28.90	0.00	28.90	0.38	0.63	1.84	1.45	18.06
S-2	2.1	24.0	25.2	25	0.96	1.29	2.07	37.25	0.00	37.25	0.34	0.52	1.70	1.36	16.70
S-3	2.5	32.1	25.1	36	3.89	-1.79	2.60	44.98	0.00	44.98	0.39	0.65	1.97	1.57	19.31
S-4	2.8	28.7	57.2	31	2.3	12.40	3.40	50.32	0.00	50.32	0.66	1.94	1.81	1.15	17.81
S-5	3.1	25.2	25.6	27	1.74	0.24	2.41	55.83	0.00	55.83	0.38	0.62	1.87	1.49	18.36
S-6	3.6	25.2	29.1	26	0.8	4.94	2.51	65.01	0.00	65.01	0.42	0.73	1.87	1.45	18.37
S-7	4	27	27.7	28	1	0.76	2.51	72.43	0.00	72.43	0.41	0.69	1.89	1.48	18.55
S-8	4.5	31.6	38.4	32	0.34	19.93	2.69	80.51	0.00	80.51	0.50	1.03	1.83	1.32	17.94
MI-1	5.7	29.3	39.6	31.5	2.2	4.70	2.52	101.68	0.00	101.68	0.50	1.00	1.76	1.26	17.28
S-9	6.7	25.1	31.0	28	2.88	2.07	2.56	109.02	0.00	109.02	0.44	0.79	1.87	1.42	18.33
S-10	7.2	26.8	30.8	27	0.14	28.61	2.70	118.47	0.00	118.47	0.45	0.83	1.92	1.47	18.90
S-11	7.7	28.1	42.8	40	11.8	1.24	2.73	127.28	0.00	127.28	0.53	1.17	1.79	1.25	17.62
S-12	8.05	40.7	39.2	42	1.27	-1.19	2.37	133.15	0.00	133.15	0.48	0.92	1.71	1.22	16.76
S-13	8.8	39.8	37.5	40	0.2	-11.5	2.73	146.80	0.00	146.80	0.50	1.02	1.85	1.35	18.12
MI-2	9.4	34.8	42.3	39.5	4.64	1.60	2.50	156.55	0.00	156.55	0.51	1.05	1.73	1.21	16.96
S-14	10.7	28.4	38.5	30	1.6	6.34	2.76	169.72	0.00	169.72	0.51	1.06	1.85	1.33	18.16
S-15	11.6	29.8	40.0	31	1.17	8.76	2.67	185.66	0.00	185.66	0.51	1.07	1.80	1.29	17.71
S-16	12.3	37.5	19.7	41	3.45	-5.16	2.48	200.34	3.43	196.90	0.32	0.49	1.99	1.66	19.56
S-17	13.5	32.0	33.2	36	3.95	0.30	2.86	222.38	14.72	207.66	0.48	0.95	1.95	1.46	19.16
S-18	14.2	32.5	35.9	35	2.45	1.39	3.37	236.61	21.58	215.02	0.54	1.21	2.07	1.52	20.32
S-19	14.6	32	63.8	34	2	15.90	2.86	243.11	25.51	217.61	0.64	1.82	1.66	1.01	16.27
S-20	14.8	31.8	32.0	36	4.13	0.04	2.60	246.78	27.47	219.32	0.45	0.83	1.87	1.41	18.35
MI-3	17.2	41.1	53.8	42.5	1.31	9.64	2.58	287.12	51.75	235.38	0.58	1.38	1.66	1.08	16.30

Tabla 3.11. Propiedades geotécnicas básicas de las muestras analizadas en el testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; IL: índice de fluidez; ρ_s : densidad de las partículas sólidas; ρ_{ap} : densidad aparente; ρ_d : densidad seca; γ_{ap} : peso específico aparente; σ_v : tensión vertical; u_z : empuje hidrostático; σ'_v : tensión vertical efectiva; n: porosidad; e: índice de poros; w(%): contenido de gravimétrico de agua; MI-1, MI-2 y MI-3: muestras

3.3 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN. ENSAYOS PROCTOR.

Los ensayos Proctor, normal y modificado, permiten conocer las características del material respecto a la compactación y hacer una rápida estimación de su aplicabilidad en construcción, especialmente en obras lineales y de tierra. Su origen se encuentra en los ensayos desarrollados por R.R. Proctor, en 1933, cuando investigaba sobre cómo conseguir un estado óptimo de compactación para suelos empleados en la construcción de grandes presas. El comportamiento frente a la compactación de los serrines de granito fue evaluado a través de ensayos normalizados tipo Proctor normal (UNE-EN 103-500-94) y modificado (UNE-EN 103-501-94). Para la realización de los ensayos se emplearon métodos manuales (maza Proctor) y automáticos. En este último caso se empleó una compactadora automática de suelos de marca Mecánica Científica S.A.

Para muchas de estas obras, (por ejemplo rellenos o terraplenes), en los que el material se coloca en tongadas, los suelos han de presentar un estado más denso que su estado natural, de forma que su peso específico seco y su resistencia sean mayores. La compactación podría definirse como “la densificación de suelos mediante la aplicación de energía mecánica” (Holtz y Kovacs, 1981) y se realiza para conseguir disminuir la magnitud de los asientos del terreno, incrementar su resistencia cortante y disminuir la permeabilidad.

Se realizaron 3 ensayos Proctor normal con las muestras tipo (M1), obteniendo los siguientes resultados expuestos en la tabla 3.12. Como se observa en figura 3.24, la densidad seca óptima para a una energía de compactación Próctor normal se sitúa en torno a los 1,42 g/cm³, correspondiente a un contenido de humedad ligeramente superior al 33 %. Este valor de humedad es óptimo es algo inferior al encontrado en las determinaciones de humedad natural (~40 %), condiciones bajo las cuales la densidad seca máxima que se alcanza se situaría en torno a 1,36 g/cm³.

Proctor 1		Proctor 2		Proctor 3	
Humedad real (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Humedad real (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Humedad real (%)	Densidad seca (g/cm ³)
4,7	1,44	20,45	1,33	33,47	1,37
14,33	1,42	26,97	1,36	34,36	1,46
17,2	1,37	28,74	1,37	35,65	1,39
21,62	1,41	31,1	1,4	35,85	1,43
25,22	1,37	33,54	1,42	39,16	1,35
28,35	1,39	37,04	1,4	40,67	1,34
27,77	1,36	38,06	1,38	41,53	1,32
32,96	1,42	39,32	1,36		
36,25	1,4				
38,03	1,35				
38,07	1,37				
44,77	1,29				

Tabla 3.12. Resultados de los 3 ensayos Proctor Normal. Los números en negrita indican el óptimo de humedad para cada máximo de densidad seca. El primer ensayo abarca un rango mayor de humedades ya que sirvió de referencia para acotar los ensayos posteriores.

En cuanto a los ensayos Proctor modificados, también se realizaron 3 determinaciones obteniéndose los resultados de la tabla 3.13.

Modificado 1 Humedad (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Modificado 2 Humedad (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Modificado 3 Humedad (%)	Densidad seca (g/cm ³)
11,42	1,62	11,39	1,74	5,59	0,95
14,3	1,73	13,17	1,57	14,41	1,67
22,54	1,69	18,6	1,74	14,68	1,72
28,39	1,53	19,88	1,72	16,35	1,8
28,59	1,52	22,74	1,6	19,08	1,73
30,18	1,48	24,23	1,6	19,99	1,73
32,43	1,44	24,58	1,59	20,25	1,72
		25,18	1,58	22,53	1,65

Tabla 3.13. Resultados de los ensayos Proctor modificados. Los números en negrita indican la humedad óptima para cada máximo de densidad seca.

Se puede observar que los valores obtenidos en el ensayo Proctor modificado son más altos en lo referente a la densidad y menores respecto a la humedad óptima. Al ser la energía de compactación mayor el material presenta una densidad mayor, en torno al 1,76 g/cm³, y la alcanza con menor cantidad de agua, alrededor del 17 %. Esto se reflejará mejor al comparar las curvas de compactación (Figura 3.24)

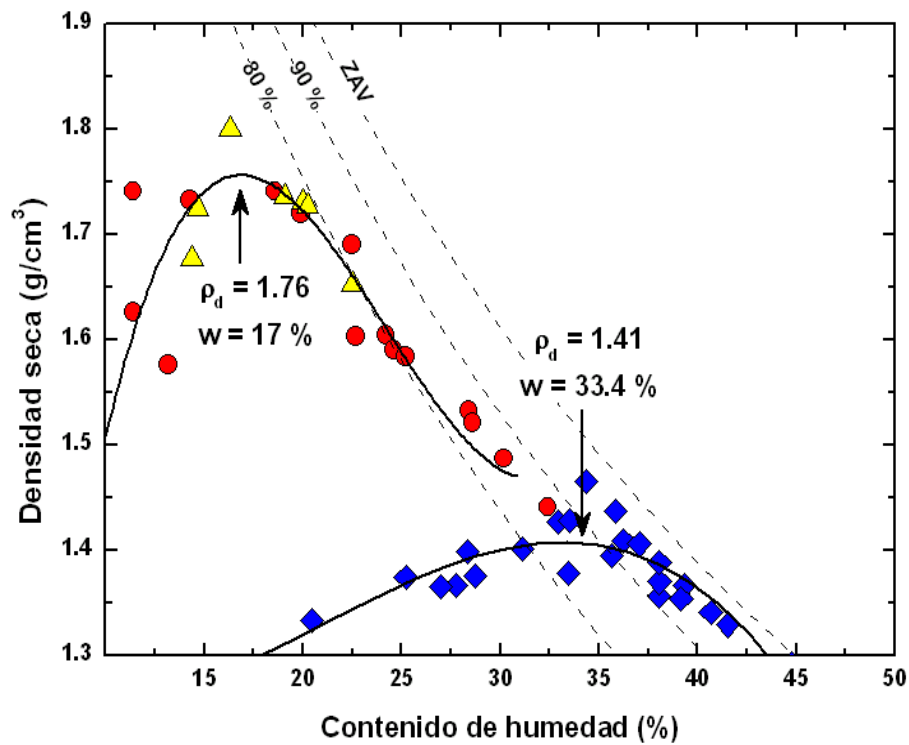


Figura 3.24. Resultado de los ensayos de compactación tipo Próctor normal y modificado realizados sobre la muestra M1. En los dos casos, la curva continua representa un ajuste polinómico (3er grado) mientras que las líneas punteadas representan su banda de confianza (95 %). ZAV: Línea de saturación; 90 y 80%: líneas de saturación del 90 y 80 %, respectivamente

No tiene mucho sentido realizar ensayos de compactación sobre las muestras procedentes del sondeo por lo que a partir de los parámetros geotécnicos básicos obtenidos de las muestras del testigo de sondeo se ha calculado el valor de la densidad seca correspondiente a cada profundidad, valores que, asociados a los correspondientes contenidos de humedad, hemos comparado con las curvas de compactación Próctor normal y modificado, tal y como se representan en la figura 3.25.

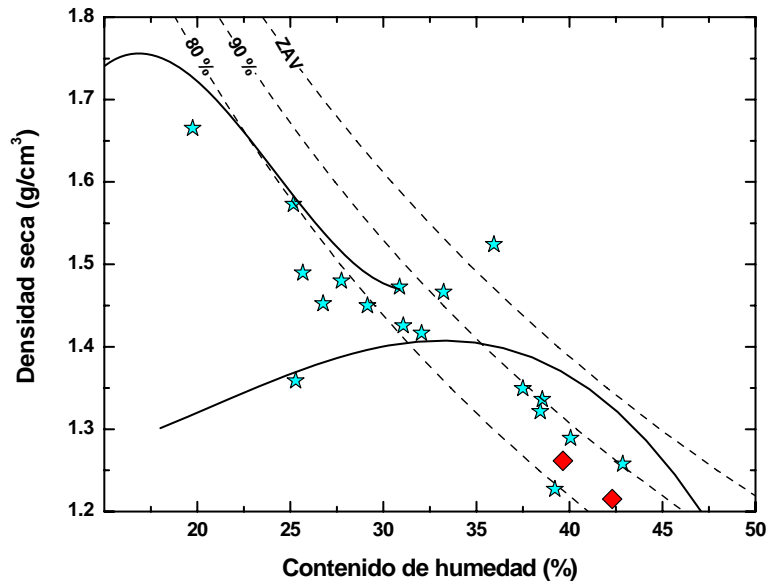


Figura 3.25. Valores de densidad seca obtenidos para las muestras del sondeo de O Cerquido (Porriño), a distintas profundidades. Los puntos rojos corresponden a dos de las muestras inalteradas obtenidas. Es posible que los contenidos de humedad determinados en el laboratorio sean inferiores a los in situ.

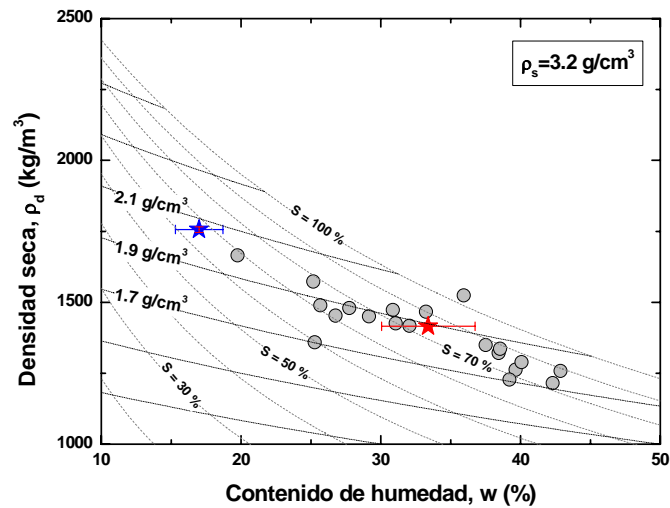


Figura 3.26. Valores de densidad seca respecto del contenido de humedad obtenidos para las muestras del sondeo de O Cerquido (Porriño), a distintas profundidades. La estrella de color azul muestra las condiciones óptimas a un ensayo Próctor modificado ($\pm 10\%$) mientras que la roja se corresponde con el óptimo Próctor normal ($\pm 10\%$). Las líneas punteadas representan isopletras de saturación mientras que las discontinuas son isopicnas aparentes.

También se puede observar que un número significativo de muestras aparece compactado con valores algo superiores a los del ensayo Próctor normal pero netamente

inferiores al valor óptimo del Próctor modificado. (Figura 3.26). Por otro lado, no se aprecian tendencias claras en relación a una dependencia con la profundidad de los valores de compactación (densidad seca).

3.4 ÍNDICE C.B.R.

Para completar la caracterización de los serrines respecto a la compactación se han realizado una serie de ensayos C.B.R. saturados y no saturados. Se utilizan para evaluar la capacidad portante de suelos en terraplenes, explanadas y capas de base o subbase en firmes. El índice CBR (*California Bearing Ratio*) no es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de propiedades tales como su estado de agregación, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique. Se determinó por primera vez en el laboratorio del Material Research Department of the California Division of Highways en el año 1938. Para los serrines la determinación del índice CBR se realizó según lo establecido por la norma UNE 103-502-95 empleando una máquina de ensayos universal de marca Mecánica Científica S.A., de 5 Tm de capacidad. La compactación de las muestras M1 utilizadas en este ensayo se realizó bajo condiciones del ensayo Proctor modificado. En total se realizaron tres ensayos completos cuyos resultados se muestran a continuación en la tabla 3.14 y posteriormente se presentan en una gráfica. (Figura 3.27).

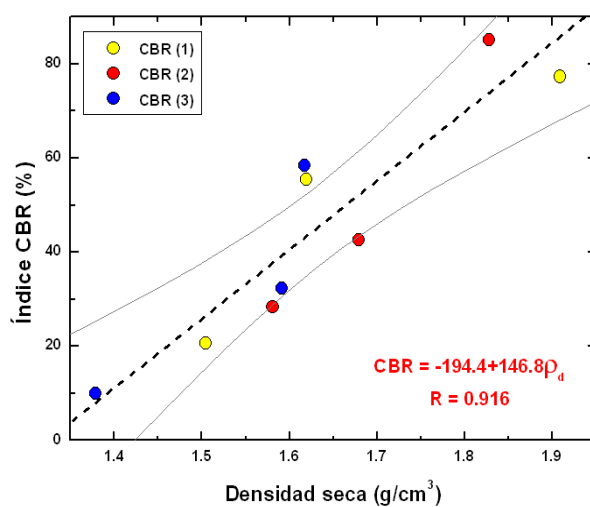


FIGURA 3.27. Variación del índice CBR con la densidad seca de probetas no saturadas de serrines de granito tipo M1 (serrines de telar)

CBR-1 (Ciudad Real)							
E (kJ/m³)	Nº golpes	w (%)	ρ_d	F_{2.5} (kN)	F_{5.0} (kN)	CBR_{2.5} (%)	CBR_{5.0} (%)
397,4	15	21,9	1,505	1,04	2,77	7,9	13,87
794,9	30	19,1	1,619	6,55	10,767	49,63	53,82
1589,8	60	13,0	1,909	12,57	18,14	95,17	90,72
CBR-2 (Ciudad Real)							
E (kJ/m³)	Nº golpes	w (%)	ρ_d	F_{2.5} (kN)	F_{5.0} (kN)	CBR_{2.5} (%)	CBR_{5.0} (%)
397,4	15	17,7	1,581	4,69	5,54	35,554	32,75
794,9	30	16,6	1,679	6,35	8,99	48,09	44,95
1589,8	60	13,9	1,829	10,98	17,22	83,16	86,135
CBR-3 (La Coruña)							
E (kJ/m³)	Nº golpes	w (%)	ρ_d	F_{2.5} (kN)	F_{5.0} (kN)	CBR_{2.5} (%)	CBR_{5.0} (%)
397,4	15	17,9	1,379	1,05	1,481	7,94	7,4
794,9	30	18,1	1,591	4,91	7,71	37,21	38,55
1589,8	60	19,4	1,617	10,25	15,28	77,59	75,64
CBR-sat (La Coruña)							
E (kJ/m³)	Nº golpes	w (%)	ρ_d	F_{2.5} (kN)	F_{5.0} (kN)	CBR_{2.5} (%)	CBR_{5.0} (%)
397,4	15	36,5	1,209	0,5	0,88	3,78	4,4
794,9	30	29,3	1,617	2,43	6,25	18,39	31,25
1589,8	60	35,1	1,562	3,64	6,79	27,55	33,95

TABLA 3.14. Resultados del ensayo C.B.R.

De acuerdo con el valor de índice CBR, es posible categorizar las explanadas en 3 tipos, tal y como se indica en la tabla 3.15. Este aspecto se trata con más detalle al evaluar el uso de los serrines en la construcción de terraplenes. (Capítulo 6).

Categoría de Explanada	Características	Índice CBR
E1	Deformable	5 < CBR < 10
E2	Poco deformable	10 < CBR < 20
E3	Muy poco deformable	CBR > 20

TABLA 3.15. Categorías de explanada, de acuerdo con el índice CBR

3.5 ENSAYOS EDOMÉTRICOS

3.5.1 CONSOLIDACIÓN

El comportamiento de los serrines de granito bajo condiciones edométricas constituye uno de los aspectos más importantes en la caracterización geotécnica de los mismos. El edómetro fue diseñado por Terzaghi en 1925 para refrendar sus propuestas teóricas sobre la consolidación. Durante la década siguiente otros investigadores como Casagrande (1932), Rutledge (1935), Gillboy (1936) o Skempton (1938) realizaron los ensayos de consolidación con el aparato ideado por Terzaghi modificándolo en función de sus objetivos. Para conocer y evaluar dicho comportamiento se han realizado varias series de ensayos edométricos, siguiendo la norma UNE-EN 103405 (1994). El ensayo se ha desarrollado en una bancada edométrica de Mecánica Científica S.A. cuyo límite operacional es de 1800 kPa. Los datos resultantes de los ensayos edométricos se pueden emplear para determinar la magnitud y velocidad a la que se producen los asientos de un terraplén o relleno. Por ello, tienen una importancia clave en el diseño de estructuras así como en la evaluación de su comportamiento.

En esta investigación se utilizaron probetas cilíndricas de 70 mm de diámetro, siendo la altura inicial de las probetas de 20 mm. Todas las muestras se compactaron aproximándose a una densidad seca de 1.41 g/cm^3 y a una humedad del 33%, valor del óptimo Próctor normal descrito en el apartado anterior ($\rho_d \sim 1,41 \text{ g/cm}^3$; $\omega \sim 33\%$). Se emplearon escalones de carga de 5, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 600, 1000 y 1500 kPa mientras que las descargas se produjeron al alcanzar los 300 y 1500 kPa, descendiendo por escalones inversos hasta los 80 y 600 kPa, respectivamente. Los desplazamientos verticales fueron obtenidos automáticamente mediante un sistema de adquisición de datos que, conectado a cada uno de los edómetros, registra la lectura procedente de comparadores electrónicos tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*). Las trayectorias de tensiones verticales utilizadas se describen en la tabla 3.16 mientras que en la tabla 3.17 se indican los tipos de ensayo realizados en cada muestra.

Tipo	Trayectoria de Carga (kPa)
T1	5-10-20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500-600-150-600-1500
T2	20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500-600-150-600-1500
T3	5-10-20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500-600-150-600
T4	5-10-20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500-600-150
T5	20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500-600-150
T6	20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500
T7	5-10-20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500
T8	20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000-1500
T9	5-10-20-40-80-150-300-80-20-80-300-600-1000

TABLA 3.16 . Resumen de las trayectorias de carga y descarga (en cursiva)

Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
M1	T1	T7	T4	T7	T1
M2	T1	T3	T3	T1	T1
M3	T1	T9	T1	T1	--
M4	T6	T8	T2	T5	--

TABLA 3.17. Descripción de los ensayos realizados con cada una de las muestras consideradas

Los resultados que se representan gráficamente a continuación mediante las curvas de asiento-tiempo (Figuras 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31) y edométricas (Figuras 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35) suponen un ejemplo de cada muestra. La totalidad de los resultados se encuentra en el Anexo 1.

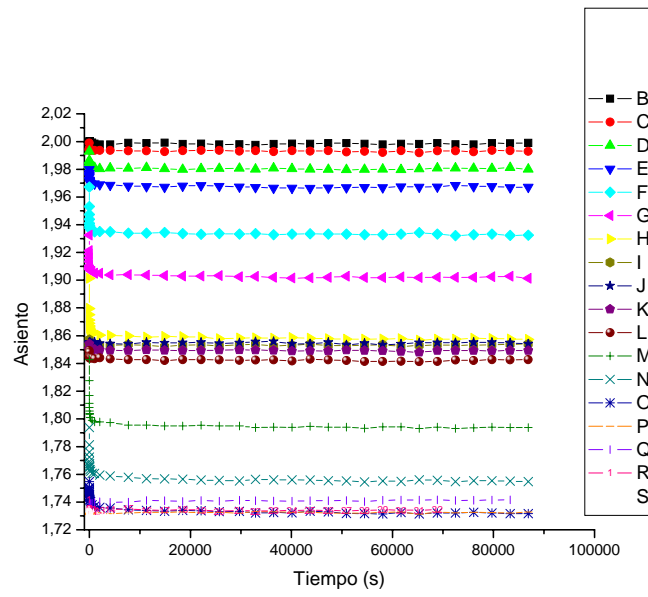


Figura 3.28. Curva asiento-tiempo para M1

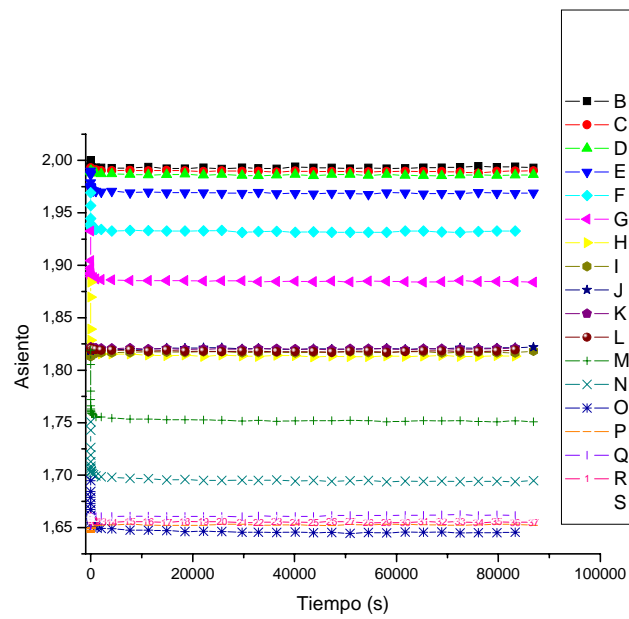


Figura 3.29. Curva asiento-tiempo para M2

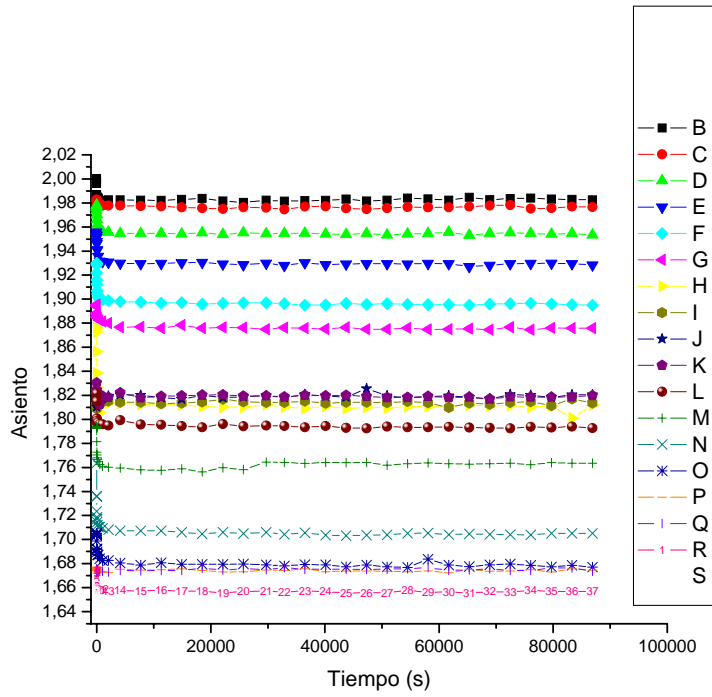


Figura 3.30. Curva asiento-tiempo para M3

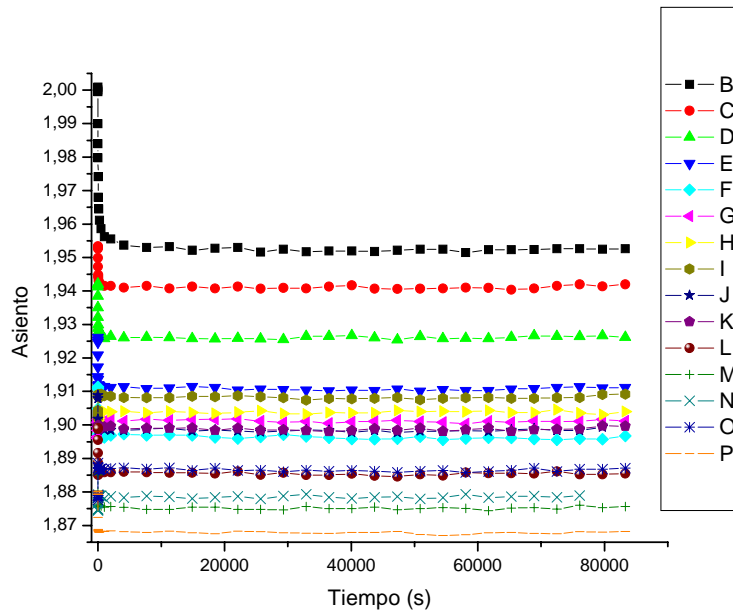


Figura 3.31 Curva asiento-tiempo para M4

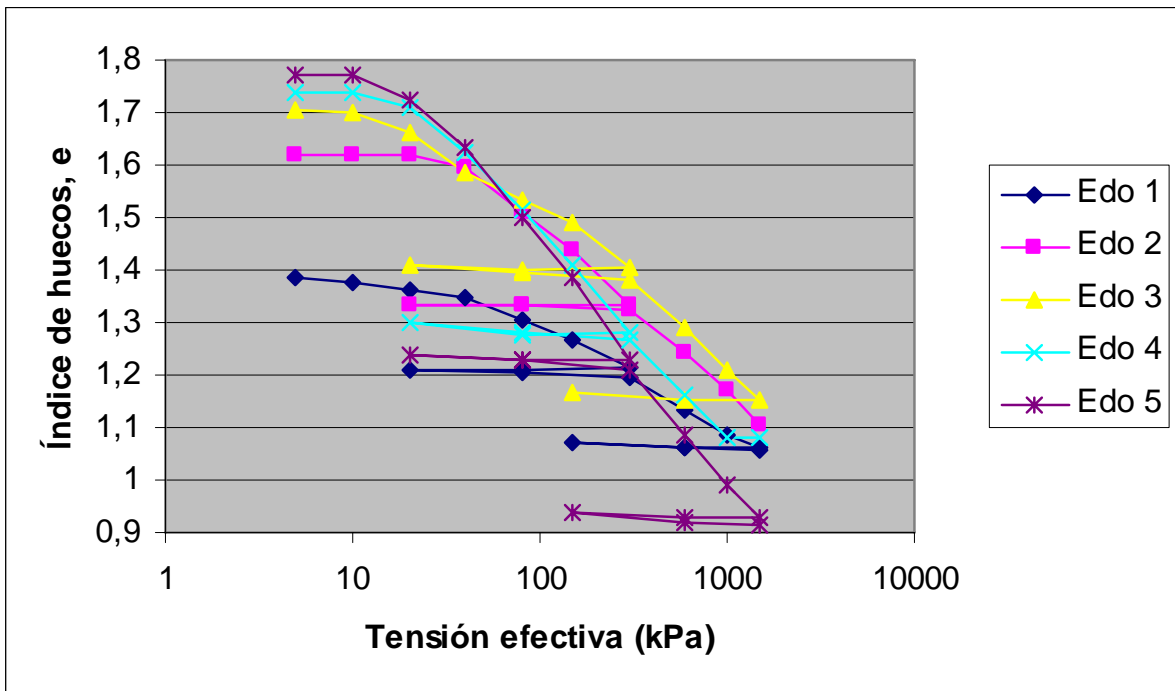


Figura 3.32. Curva edométricas de la muestra M1

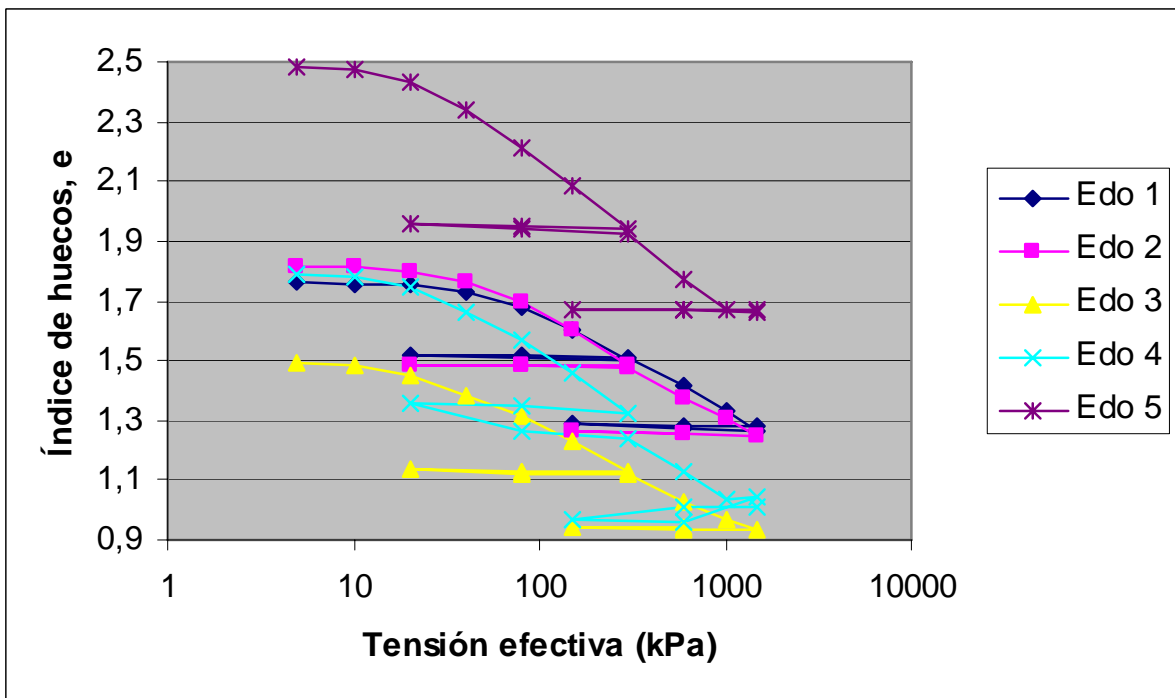


Figura 3.33. Curvas edométricas de la muestra M2

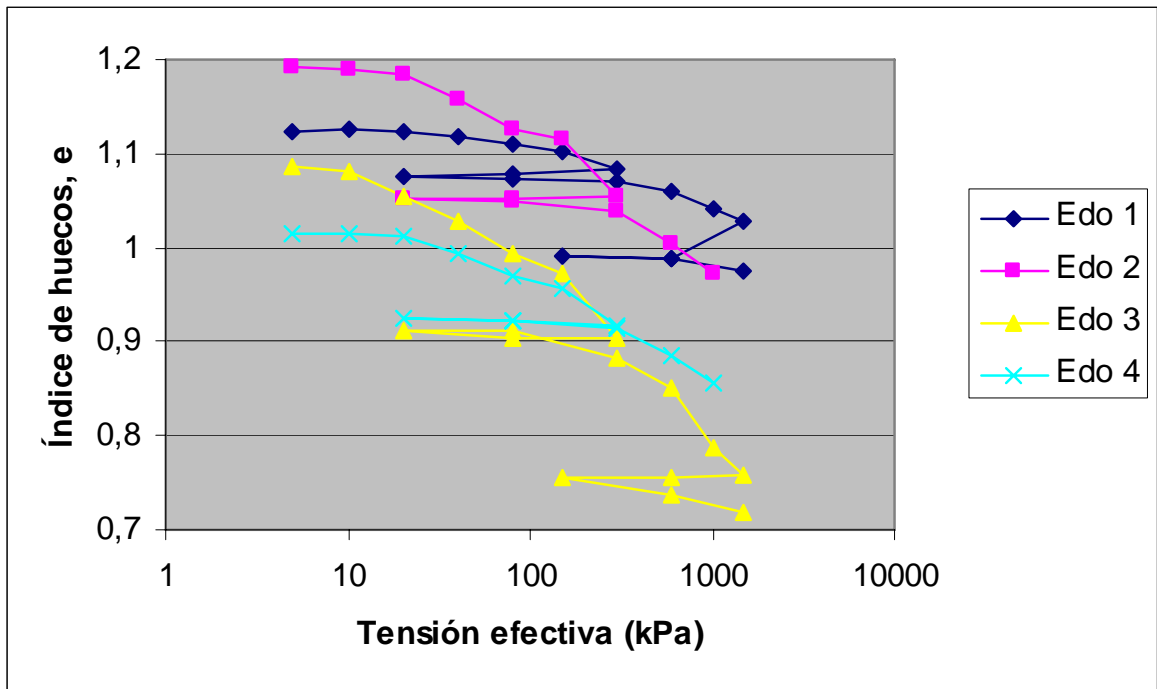


Figura 3.34. Curvas edométricas de la muestra M3

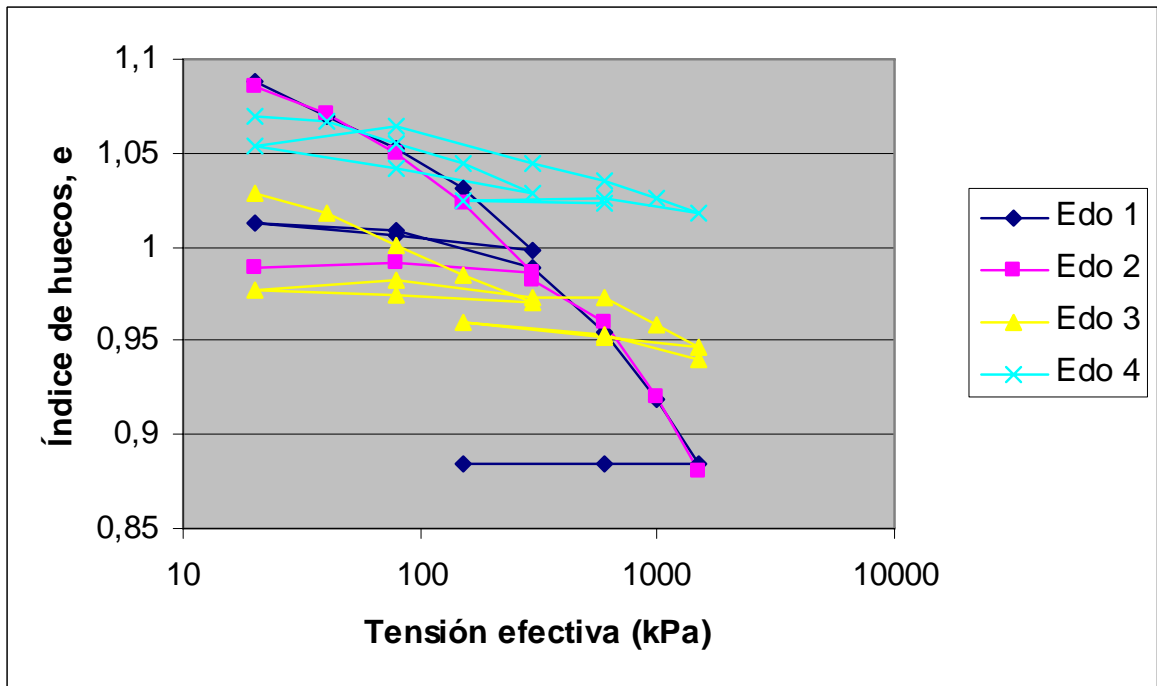


Figura 3.35. Curvas edométricas de la muestra M4

En cada escalón de carga, la deformación máxima se alcanza con relativa rapidez (entre 1 y 3 horas, de un total de 25 horas de duración por cada incremento de carga). En consecuencia, la disipación de la sobrepresión intersticial en cada escalón de carga es rápida.

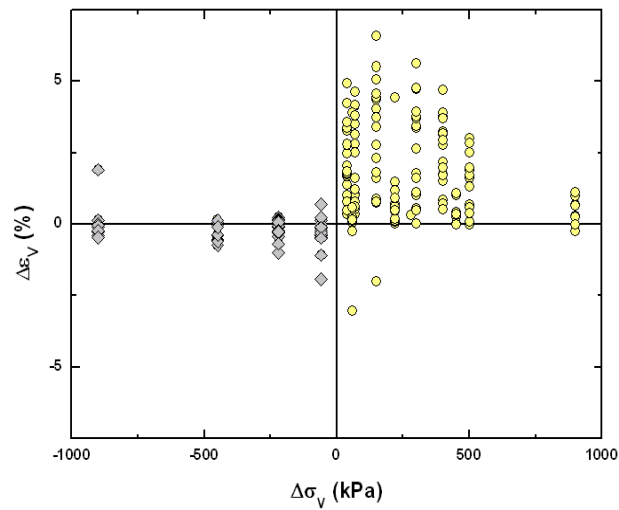


FIGURA 3.36 Incremento de deformación, $\Delta\varepsilon_v$, asociado a cada uno de los incrementos de carga, $\Delta\sigma_v$, aplicados en los ensayos edométricos realizados

En una primera aproximación al análisis de los resultados, en la figura 3.36 se ha representado el incremento de deformación vertical asociado a cada uno de los incrementos de carga aplicados. En dicha figura, los incrementos de carga negativos corresponden a etapas de descarga mientras que los positivos a incrementos de carga. Podemos observar que, incluso despreciando resultados de significado dudoso (por ejemplo, pérdida de volumen en procesos de descarga), los datos no manifiestan tendencias fácilmente interpretables. Si se representan los valores de los parámetros de compresibilidad C_* (C_c o C_r , según corresponda a la rama noval o a la de descarga-recarga respectivamente) asociados a cada escalón de carga, tampoco se obtiene una buena agrupación de los mismos, como se observa en las figuras 3.37, 3.38, 3.39 y 3.40. El parámetro C_* se define como:

$$C_* = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (\text{Ecuación 1})$$

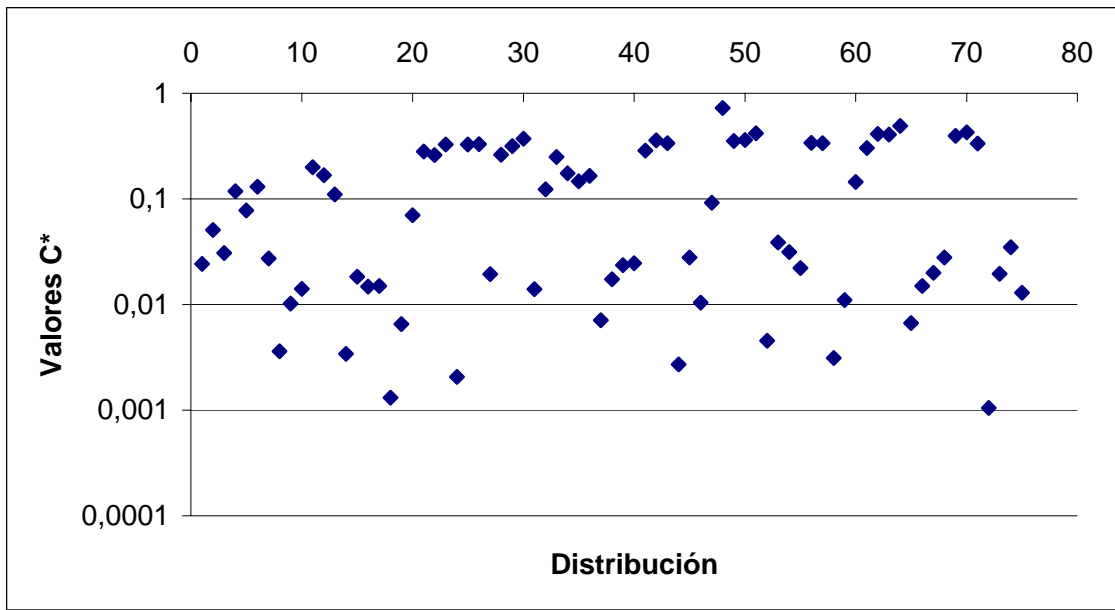


Figura 3.37. Distribución de valores de C^* para M1 tras aplicar modelo de Terzaghi

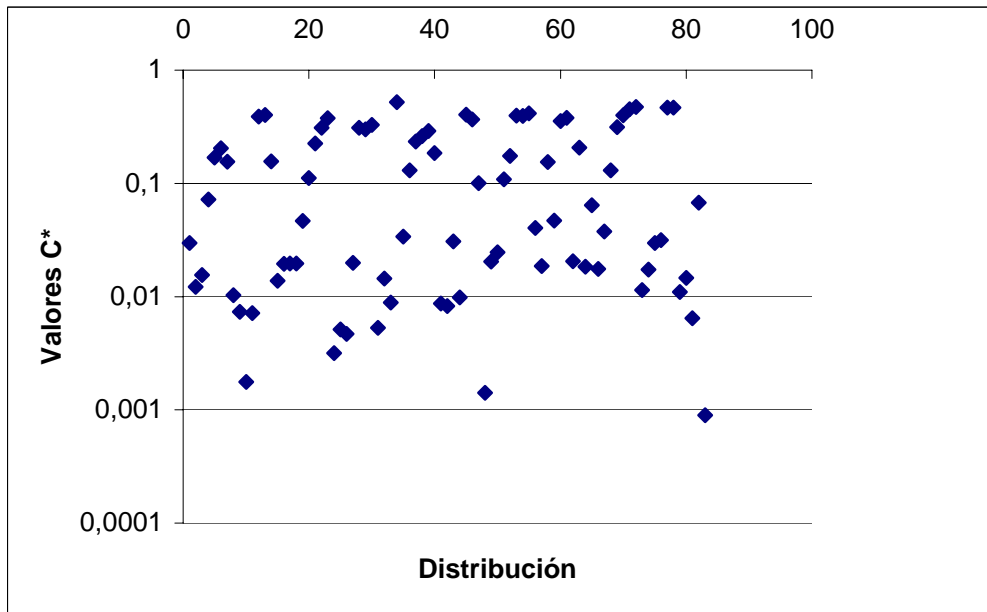


Figura 3.38. Distribución de valores de C^* para M2 tras aplicar modelo de Terzaghi.

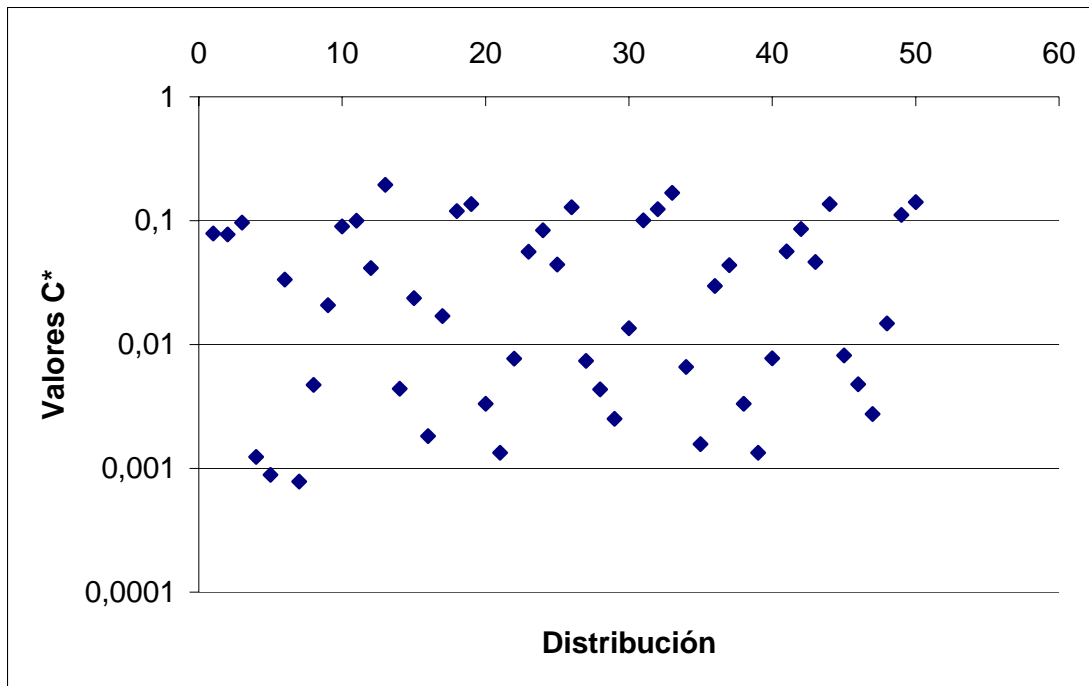


Figura 3.39. Distribución de valores de C^* para M3 tras aplicar modelo de Terzaghi

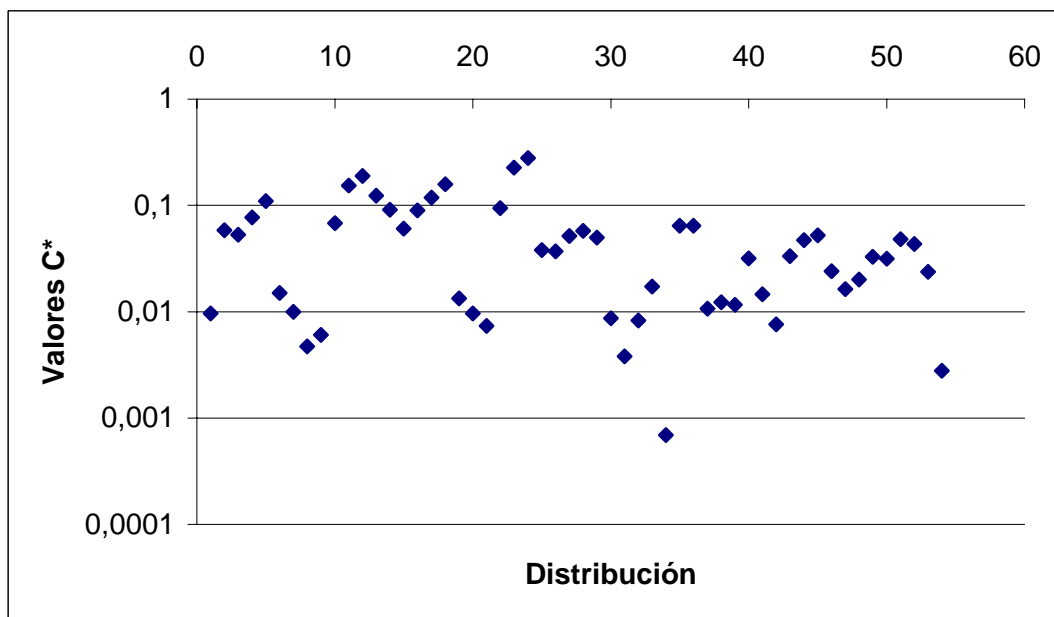


Figura 3.40.. Distribución de valores de C^* para M4 tras aplicar modelo de Terzaghi

Dada la dispersión de resultados y teniendo en cuenta que el fundamento conceptual de la interpretación aplicada se basa en considerar únicamente procesos de consolidación primaria, se ha considerado razonable introducir en el análisis la existencia de procesos diferidos similares a los procesos de hidratación asociados a la consolidación secundaria. Además, al refinar la interpretación de parámetros, se decidió aplicar de modo sistemático técnicas de identificación.

La resolución del problema inverso se realizó mediante un algoritmo de minimización global basado en la evaluación del error asociado a una nube densa de puntos que configura una malla regular en el espacio de búsqueda (Navarro et al., 2004). Para definir este espacio se escogieron como parámetros constitutivos de la consolidación primaria la compresibilidad (definida por la ecuación 1) y la permeabilidad del suelo, K . Ambas se suponen constantes en cada escalón de carga. La consolidación secundaria se ha supuesto caracterizada por un parámetro relacionado con la compresibilidad de la microestructura, D , así como por otros dos parámetros que caracterizarían el intercambio de agua entre la micro y la macroestructura del material (C y H ; ver Alonso y Navarro, 2004). Asimismo, la microestructura del material se ha supuesto elástica. Para automatizar el proceso, y a fin de evaluar una población de datos estadísticamente significativa, se desarrolló un código especialmente adaptado al problema (Alonso y Navarro, 2004).

Suponiendo que la consolidación primaria (δ_1) es más rápida que la secundaria (δ_2), se puede estimar un tiempo t_k en el que ya se ha producido la δ_1 y a partir del cual los procesos de consolidación dependerán sólo de δ_2 . Aplicando el procedimiento descrito en la figura 3.41 para cada escalón de carga se pueden obtener los parámetros C , H y D que caracterizan la δ_2 en este proceso. Una vez identificada la δ_2 , podemos obtener de la consolidación total el valor de δ_1 , y aplicar entonces el modelo de Terzaghi a para obtener los parámetros C^* y K .

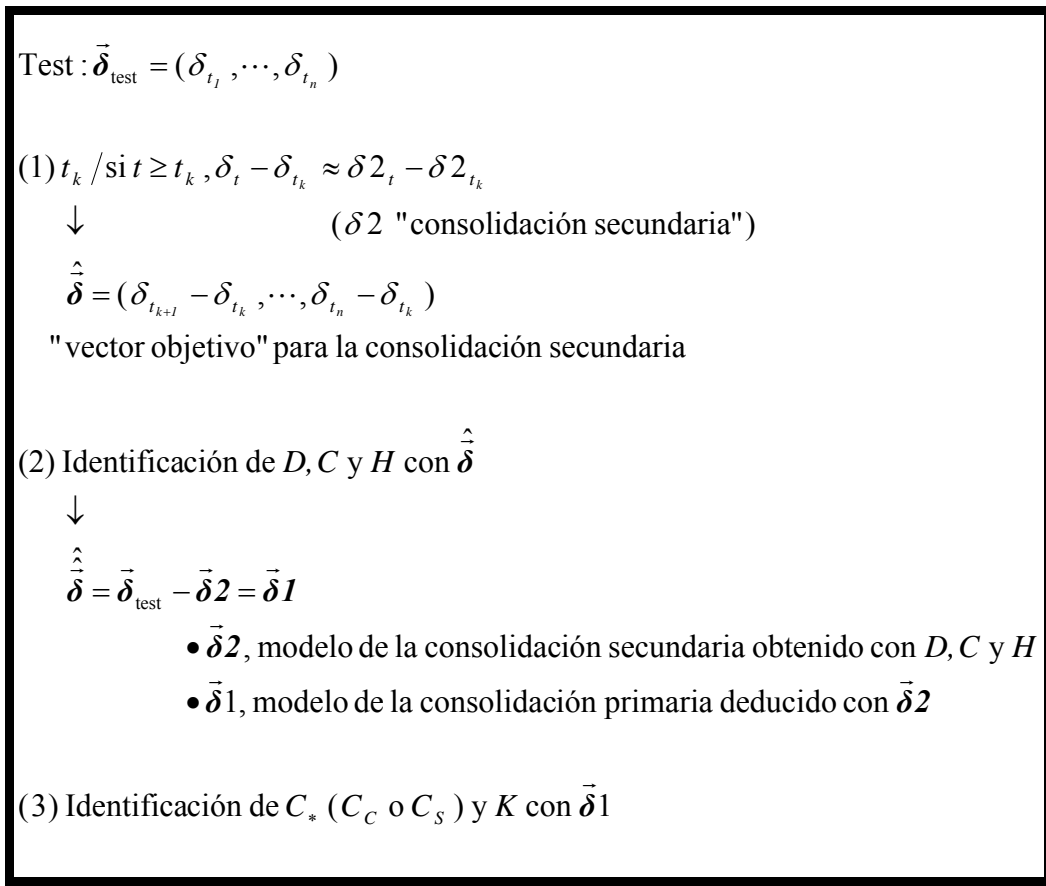


Figura 3.41. Procedimiento de cálculo seguido para identificar la consolidación primaria y secundaria en cada escalón de análisis

En la figura 3.42 podemos apreciar que, para escalones novales de carga se identificó una consolidación secundaria relativamente baja (en torno al 10% para los materiales procedentes de los telares M1, M2 y M3), lo cual es coherente con su baja actividad. No obstante, llama la atención el hecho de que siendo los serrines tipo M4 (es decir, producto del corte con disco) aquellos con menor superficie específica, sean estos mismos los que mayor consolidación secundaria presentan (en torno al 20%).

Si parece consistente que la consolidación secundaria tenga mayor importancia en los escalones de descarga/recarga, en los que la consolidación primaria es menor. (Figura 3.42).

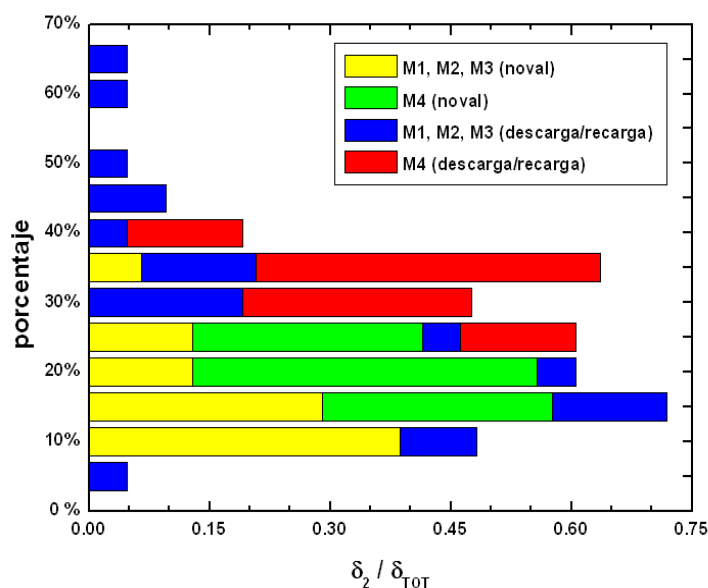


Figura 3.42. Frecuencia porcentual del valor de la consolidación secundaria identificada, δ_2 , con respecto al asiento total, δ_{TOT} .

No todas las curvas asiento-tiempo han podido ser reproducidas tan satisfactoriamente como los ejemplos ilustrados en la figura 3.43. De forma aproximada, en el 35 % de los escalones de descarga se han producido comportamientos “escalonados”, es decir, que en la primera descarga la deformación registrada fue mínima mientras que en episodios de descarga subsiguientes el hinchamiento fue más acusado. Este comportamiento indica el desarrollo de fuerzas de fricción en el contacto entre el anillo de confinamiento de acero y el material ensayado. El papel de las fuerzas de rozamiento puede ser relevante ya que la superficie de contacto acero/serrín no fue lubricada y además, la relación de esbeltez de las probetas es grande (altura/diámetro=0.4). Vale la pena destacar, no obstante, que este valor de esbeltez se sitúa en límite superior prescrito por la norma ASTM D 2435-03, donde se aconseja, no obstante, relaciones inferiores a 0,25.

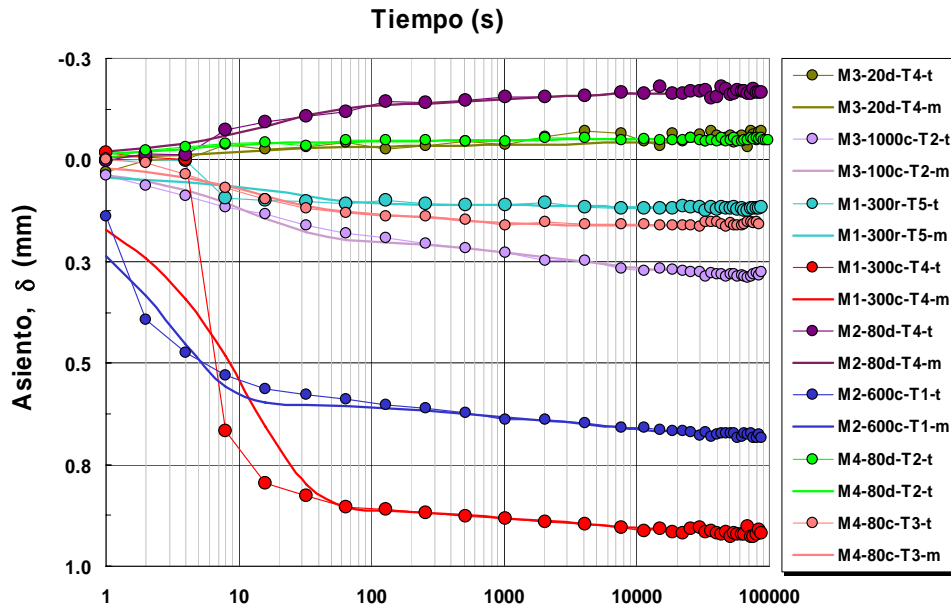


Figura 3.43. Curvas asiento-tiempo correspondientes a distintos escalones de carga. M1, M2, M3 y M4 son las distintas muestras y los números que acompañan cada designación indican la carga ejercida en cada uno de los escalones analizados. Las letras c, d y r indican si se trata de un escalón de carga, descarga o recarga, respectivamente. Los indicadores T1, T2, T3, T4 y T5 hacen referencia a la trayectoria del ensayo tal y como se ha definido en la Tabla 14. Por último, la letra final define si se trata de puntos experimentales (t) o bien resultante de la aplicación del modelo teórico (m)

El 65 % de los escalones de descarga/recarga restantes son susceptibles de ser considerados válidos y su estudio, junto con el de las correspondientes etapas de carga, nos ha permitido permite realizar la identificación de los parámetros de consolidación secundaria (*C*, *H* y *D*) que se muestran en las tablas 3.18 y 3.19.

D					
	N	media	desv est	CV	CC
M1	31	8,05E-03	1,71E-03	21%	1,01
M2	35	1,16E-02	2,84E-03	24%	1,31
M3	33	9,39E-03	1,91E-03	20%	0,62
M4	31	1,03E-02	2,92E-03	28%	1,18

Tabla 3.19. Parámetro de compresibilidad de la microestructura frente a la consolidación secundaria. CV(en %) constituye el coeficiente de variación. CC representa la curtosis de los datos asociados a cada distribución

C					
	N	media	desv est	CV	CC
M1	31	6,92	1,69	24%	0,41
M2	35	5,60	1,08	19%	0,44
M3	33	4,77	1,03	22%	1,58
M4	31	5,71	0,97	17%	2,74
H (1/s kPa)					
	N	media	desv est	CV	CC
M1	31	3,40E-10	7,46E-11	22%	0,39
M2	35	4,33E-10	9,66E-11	22%	1,09
M3	33	2,28E-10	6,79E-11	30%	3,02
M4	31	1,30E-08	3,50E-09	27%	0,57

Tabla 3.19. Parámetros de intercambio de masa entre la macro y microestructura en relación con la consolidación secundaria. CV (en %) constituye el coeficiente de variación. CC representa la curtosis de los datos asociados a cada distribución.

Tras utilizar estos parámetros de la consolidación secundaria para determinar la deformación primaria, se identificaron los índices de las tablas 3.20 y 3.21. Se puede observar que, si bien el coeficiente de variación, CV, de los parámetros estimados es alto, los coeficientes de curtosis son siempre positivos. De ese modo, el modelo de consolidación secundaria aplicado para estimar la consolidación primaria permite identificar los parámetros primarios con un grado de agrupamiento satisfactorio. Esto se comprueba en las figuras 3.44, 3.45, 3.46 y 3.47. En ellas se observa un buen agrupamiento en dos zonas, una asociada C_c y otra a C_s . De este modo también se pueden distinguir entre sí estos parámetros. La mejora respecto a las figuras 3.37, 3.38, 3.39 y 3.40 es significativa.

C_c					
	N	media	desv est	CV	CC
M1	17	0,355	0,035	10%	0,17
M2	21	0,292	0,060	20%	1,65
M3	20	0,120	0,030	25%	1,69
M4	17	0,054	0,014	26%	1,10

Tabla 3.20. Parámetros C_c identificados en escalón de carga. CV define el coeficiente de variación y CC el de curtosis.

C_s					
	N	media	desv est	CV	CC
M1	14	0,016	0,007	48%	0,03
M2	14	0,017	0,008	51%	1,62
M3	13	0,029	0,011	34%	2,40
M4	14	0,009	0,002	19%	0,51

Tabla 3.21. Parámetros C_s identificados. CV define el coeficiente de variación y CC el de curtosis

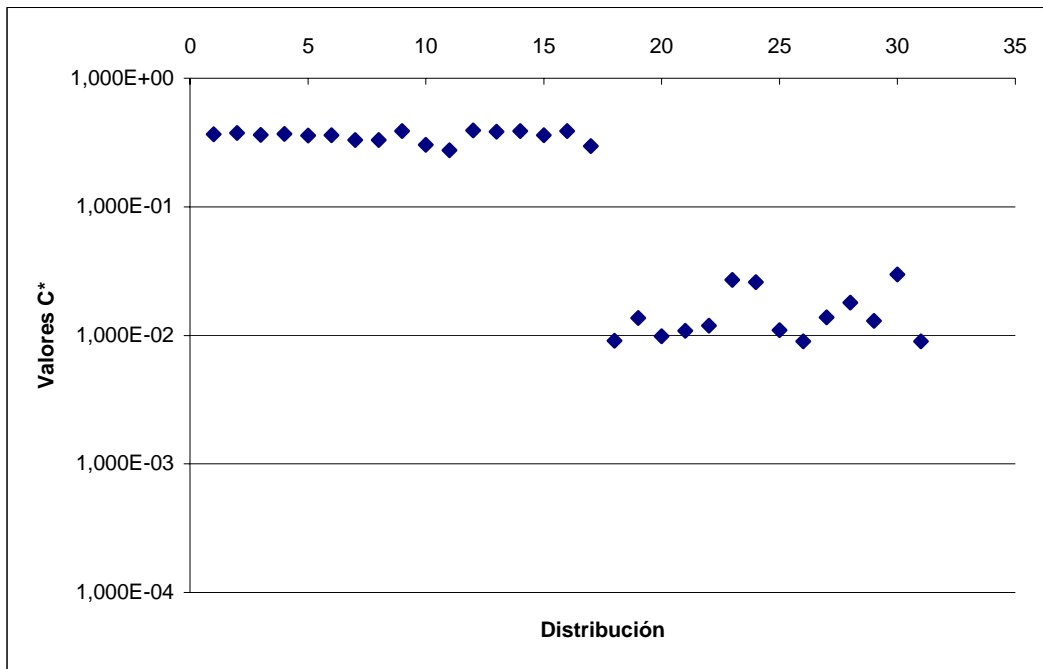


Figura 3.44. Distribución de valores de C* para M1 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

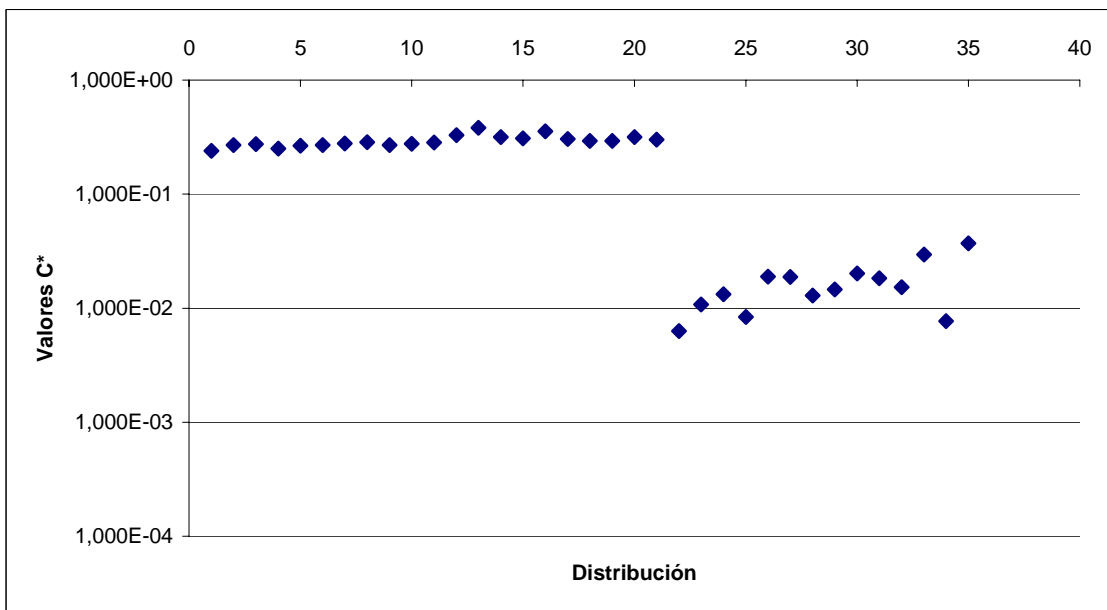


Figura 3.45. Distribución de valores de C* para M2 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

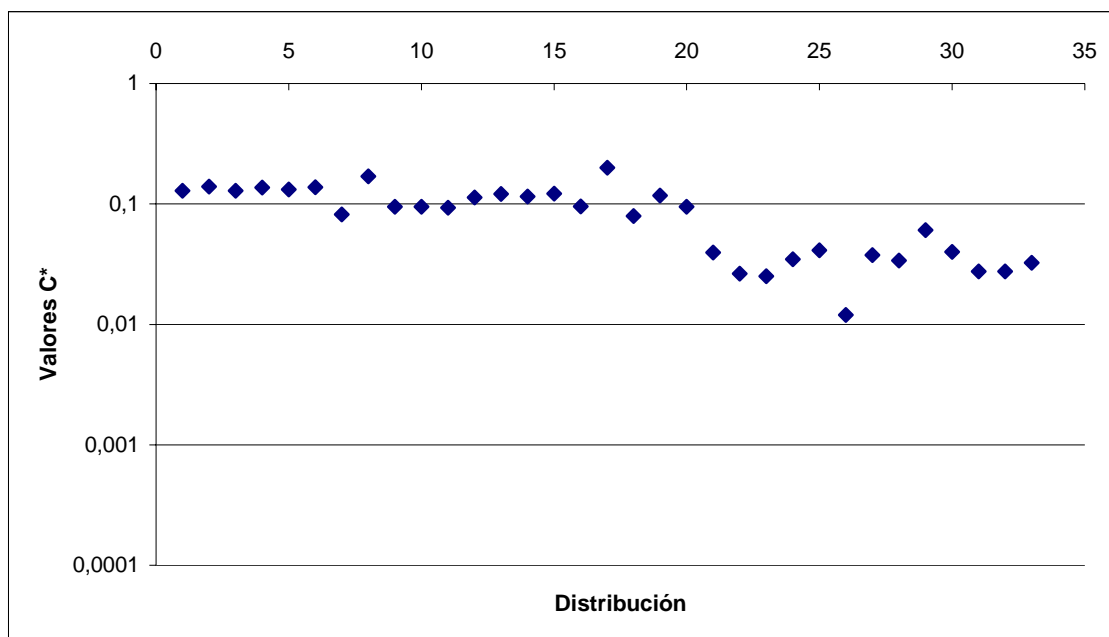


Figura 3.46. Distribución de valores de C^* para M3 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

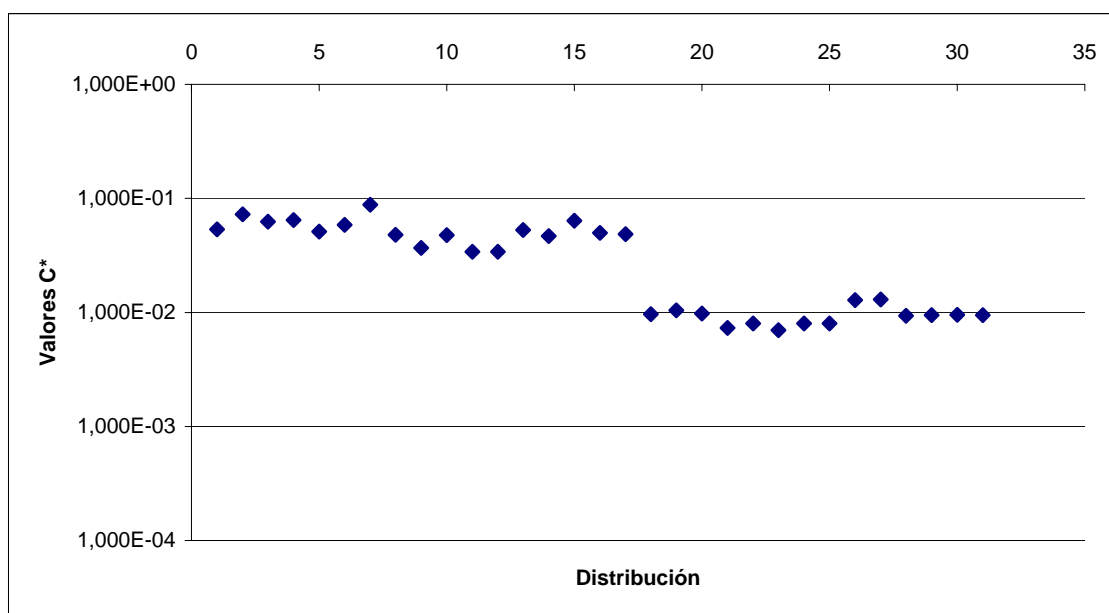


Figura 3.47. Distribución de valores de C^* para M4 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

En cualquier caso la nueva metodología propuesta, basada en la aplicación sistemática de técnicas de identificación de parámetros y en la consideración de los procesos de consolidación secundaria, ha permitido mejorar considerablemente la interpretación de los ensayos edométricos.

3.5.2 ENSAYO K_0

En condiciones unidimensionales (es decir, deformación lateral nula), análogas a las que encontraríamos en un relleno, el incremento de la tensión efectiva horizontal es proporcional al incremento de la vertical y el correspondiente coeficiente de proporcionalidad recibe el nombre de coeficiente de empuje en reposo y suele representarse como K_0 . Se ha realizado un ensayo edométrico con control de la tensión radial empleando para ello una muestra tipo M1. Para ello se ha utilizado un equipo ISMES Enel.Hydro que posee un anillo de carga radial en el que se detecta la presión ejercida por la muestra sobre las paredes laterales que la confinan. De este modo, conociendo la tensión vertical (carga aplicada que actúa sobre la superficie de la probeta, σ_v) y la tensión radial (σ_H) es posible obtener el valor del coeficiente de empuje en reposo (K_0):

$$K_0 = \frac{\Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_v}$$

La figura 3.48 ilustra la variación de la tensión horizontal para distintas etapas de carga y descarga. Podemos apreciar que los datos son susceptibles de un buen ajuste lineal ($R=0,996$) y que el valor K_0 es igual a 0,335. Para su determinación se ha calculado la pendiente de la curva σ_H vs. σ_v a partir de un umbral de deformación a partir del cual los valores representan la rama de comportamiento noval del material.

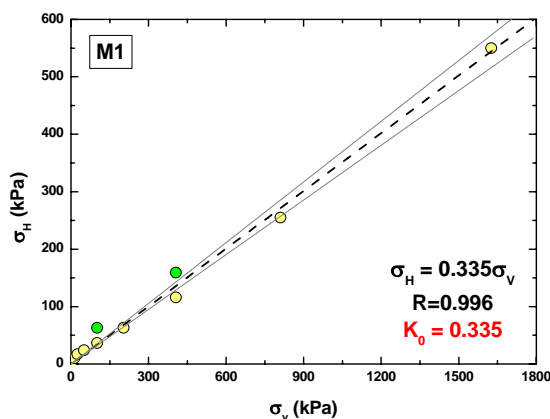


Figura 3.48. Variación de la tensión efectiva horizontal respecto de la vertical en un ensayo edométrico realizado sobre una muestra tipo M1 (serrín de telar). Los círculos de color verde indican etapas de descarga. K_0 es el coeficiente de empuje en reposo. La línea discontinua representa el ajuste lineal y las líneas continuas que rodean a esta última corresponde a su banda de confianza (95 %)

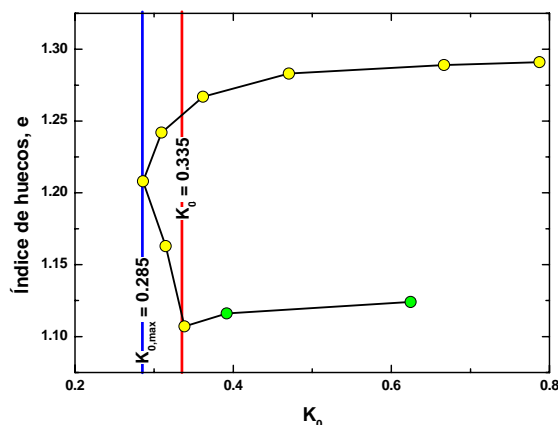


Figura 3.49. Variación de la tensión efectiva horizontal respecto de la vertical en un ensayo edométrico realizado sobre una muestra M1. Los círculos verdes indican etapas de descarga. K_0 es el coeficiente de empuje en reposo.

La figura 3.49 muestra la evolución del coeficiente de empuje en reposo respecto del índice de poros en el mismo ensayo. Podemos observar que en los primeros escalones de carga K_0 experimente una rápida variación y que está asociada a la preconsolidación del material. Por encima de una tensión efectiva vertical de ~ 100 kPa entramos en la rama de compresión normal y observamos que, para una variación del índice de huecos significativa, K_0 cambia muy poco. El valor mínimo de K_0 se alcanza para una tensión vertical de ~ 400 kPa.

3.6 RESISTENCIA AL CORTE

Al igual que sucede con los ensayos edométricos, los ensayos de resistencia al corte son fundamentales para establecer el comportamiento geotécnico de los serrines de granito. Una de las técnicas más extendidas para la determinación de la resistencia a cortante de los materiales comúnmente empleados en obras de tierra es la del corte directo. El primer dispositivo de corte fue creado en 1846 por Alexandre Collin y posteriormente ese diseño inicial ha sido modificado por diversos autores como Bell (1915), Casagrande (1932) ó Cooley y Smith (1935). El objetivo de este ensayo es determinar los parámetros resistentes de una muestra sometida a un esfuerzo cortante. Dichos parámetros son la cohesión, c , y el ángulo de rozamiento interno, ϕ , con los que se puede caracterizar el material según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

Los parámetros resistentes de los serrines se determinaron mediante el ensayo de corte directo regido por la norma UNE 103-402-98 y la norma ASTM D 3080-90. Se utilizó una caja de corte de Mecánica Científica S.L. El límite operacional de la caja de corte empleada está condicionado por la máxima tensión vertical admisible por ella, valor que se sitúa en 400 kPa. La medida de los desplazamientos tanto verticales como horizontales fue realizada mediante dos comparadores electrónicos tipo LVDT acoplados a un sistema de adquisición de datos. La velocidad del desplazamiento se estableció en 0,25 mm/min. En este ensayo también se trabajó con muestras remoldeadas

En una primera aproximación, las muestras de serrín de granito se amasaron y emplazaron en la caja de corte sin ningún tratamiento previo especial (en particular, precompactación). En todos los casos el contenido de humedad de las muestras fue próximo a las condiciones Próctor normal. La figura 3.50 muestra algunas curvas tensión de corte respecto de la deformación horizontal para las muestras de serrines de telar (M1, M2 y M3) así como de discos de corte (M4). Se aprecia que se alcanza un valor máximo de tensión de corte y que éste se mantiene a medida que la deformación horizontal aumenta. Se puede interpretar este comportamiento como el propio de un material sin cohesión.

Por otro lado, la figura 3.51 muestra, para uno de los ensayos realizados, la comparación entre la tensión de corte y la deformación vertical asociada a la deformación horizontal.

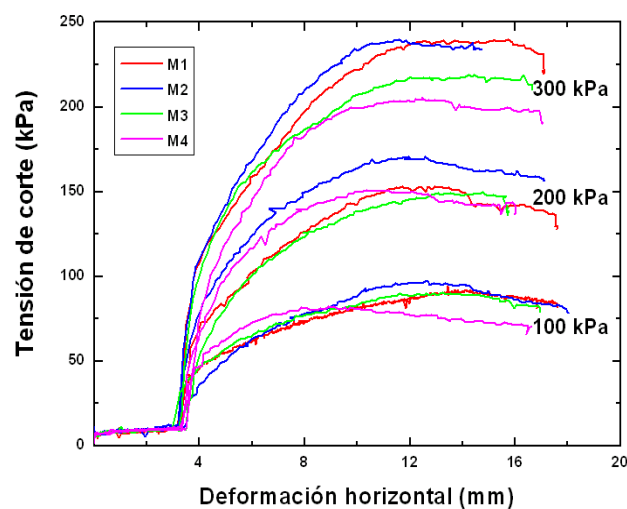


Figura 3.50. Resultados de los ensayos de corte directo realizados sobre las muestras M1, M2, M3 (serrines de telar) y M4 (corte con disco). Las tensiones normales aplicadas fueron 100, 200 y 300 kPa.

Es interesante observar que, una vez finalizado el asiento de la placa de reparto de tensiones verticales, cuando la muestra empieza a experimentar un incremento significativo de tensión cortante ($\epsilon_H \sim 3,75$ mm) se produce una significativa reducción de volumen ($\epsilon_V < 0$). Es decir, la muestra presenta un comportamiento contractante (o dilatación negativa). La interpretación más razonable de este fenómeno cabe atribuirlo al movimiento de las partículas de los serrines bajo la actuación de la fuerza de cizalla, de modo que se produce un reordenamiento en las mismas y la consecuente reducción de volumen. Ello es característico de materiales granulares poco densos.

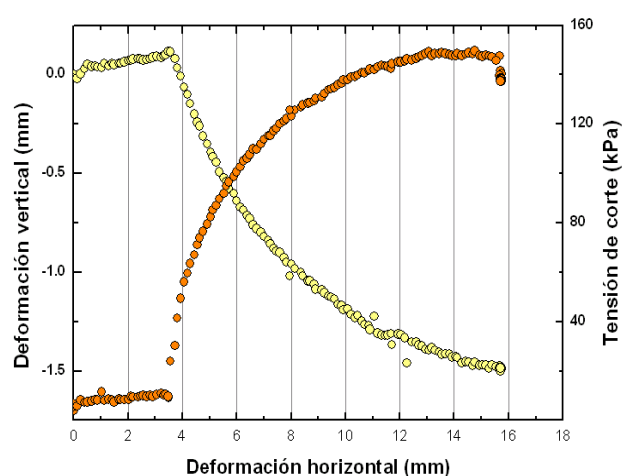


Figura 3.51. Comparación de la deformación vertical y la tensión de corte respecto de la deformación horizontal en un ensayo de corte directo sobre una muestra tipo M3, con una tensión vertical de 200 kPa

A fin de comprobar este efecto, se han realizado diversos ensayos en los que la muestra de serrín ha sido densificada con la ayuda de una maza Próctor, aplicando una variable energía de compactación (15, 30 y 60 golpes). Los resultados se presentan en las figuras 3.52 y 3.53.

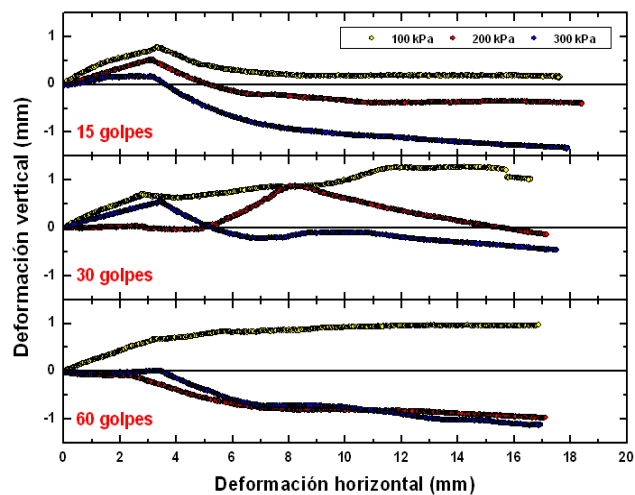


Figura 3.52. Deformación vertical respecto de la horizontal para diversas muestras tipo M1 (serrín de telar) densificadas con distinta energía de compactación. Se presentan resultados para tensiones normales de 100, 200 y 300 kPa. Con una energía de compactación equivalente a 15 golpes, todas las muestras son contractantes. Para 60 golpes, tan solo la muestra ensayada a menor carga normal es dilatante, siendo las otras dos (200 y 300 kPa) contractantes. Para 30 golpes, el comportamiento es complejo.

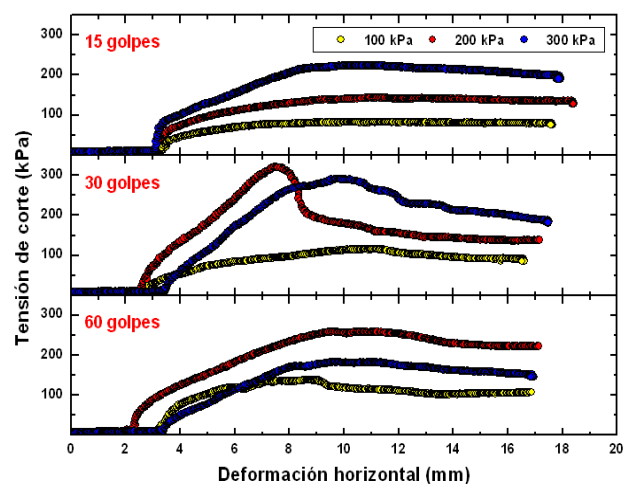


Figura 3.53. Tensión de corte respecto de la deformación horizontal para distintos valores de tensión normal y grado de densificación. Las muestras ensayadas han sido de tipo M1 (serrín de telar)

Es interesante observar que las muestras poco compactadas manifiestan un comportamiento netamente contractante (disminución de volumen al ser cizalladas) pero a medida que se densifica, su comportamiento pasa a ser dilatante. Dentro de este último caso, la dilatancia que manifiestan las muestras es tanto mayor cuanto menor es la tensión normal aplicada. Se puede comprobar también que, aun en aquellas muestras más densificadas, estas pueden experimentar una significativa reducción de volumen cuando la carga normal es alta (Figura 3.52).

En la figura 3.53 se ha representado en un diagrama τ - ϵ_H las mismas muestras cuyas deformaciones verticales han sido descritas en el párrafo anterior. Es interesante comprobar que para muestras de baja densidad (15 golpes) las curvas resultantes son análogas a las presentadas en la figura 3.59, relativas a las muestras inalteradas tanto en aspecto como en valor de tensión de corte máxima. También es análogo el comportamiento de las deformaciones verticales (comparar figuras 3.51 y 3.52). Sin embargo, a medida que se densifica la muestra (30 y 60 golpes) se observan cambios sustanciales. Se debe destacar el aumento de resistencia que evidencian las muestras con la compactación a 30 golpes aunque el aspecto de las curvas τ - ϵ_H sugeriría que las heterogeneidades granulométricas en la muestra (p. Ej., la eventual presencia de granos de un tamaño mayor en la zona de cizalla) o cambios en el proceso de preparación de las probetas (cambios en el proceso de compactación y tallado de las probetas) podrían ser responsables de los perfiles obtenidos. De igual forma, los resultados a 60 golpes son un tanto anómalos en la medida que se observa una mayor resistencia a 200 kPa que a 300 kPa de tensión normal.

En cualquier caso parece razonable suponer que, cuando las muestras de serrines de granito son compactados, se produce un aumento significativo de su resistencia al corte. Así, Jiménez Salas y de Justo (1975) y González de Vallejo et al. (2002) indican que, aun considerando distintos grados de pre-compactación, una vez superada la resistencia cortante pico, la resistencia cortante residual de las muestras más compactadas tiende a converger con el valor de resistencia máxima de las muestras no compactadas. Desde ese punto de vista, la compactación proporcionaría una reserva de resistencia suplementaria y la determinación de los parámetros resistentes en muestras poco compactadas aportaría valores conservadores.

En un apartado anterior se hizo referencia al desarrollo de costras como producto de la oxidación de la granalla y virutas de fleje. En este contexto es interesante destacar que el crecimiento de dichas costras en el seno del serrín es susceptible de aportar una mayor resistencia ante los esfuerzos cortantes.

En cuanto a los resultados, la tabla 3.22 muestra el valor del contenido de humedad de las distintas muestras ensayadas mediante corte directo. Asimismo, las tablas 3.23 y 3.24

recogen los valores de tensión de corte máxima, ángulo de rozamiento máximo y cohesión de los serrines de telar y corte con disco ensayados.

σ_v (kPa)	M1(1)	M1(2)	M1(3)	M2	M3	M4
100	30,6	35,3	36,7	29,9	28,1	33,3
200	28,8	35,1	36,1	30,2	31,1	30,1
300	32,3	35,0	36,1	27,6	29,5	30,8

Tabla 3.22. Contenido de humedad de las muestras ensayadas a corte directo. M1(1), M1(2), M1(3), M2 y M3 son serrines de telar. M4 son serrines de discos de corte

σ_v (kPa)	M1(1)	M1(2)	M1(3)	M2	M3	M4
100	94,1	85,3	85,6	97,3	90,5	82,1
200	15,0	158,9	137,9	17,4	149,6	15,0
300	239,9	217,6	227,4	23,9	218,9	205,6

Tabla 3.23. Valores de tensión de corte máxima (en kPa) para distintos valores de tensión vertical, σ_v de los serrines de granito ensayados. w (%) representa el contenido de humedad. M1, M2 y M3 serrines de telar. M4 serrines de corte con disco

Parámetro	M1(1)	M1(2)	M1(3)	M2	M3	M4	M1-15g	M1-30g
ϕ_{max}	36,1	33,5	35,3	34,3	32,7	31,7	35,3	40,7
c (kPa)	16,5	21,6	8,5	30,9	24,6	22,7	8,9	4,9

Tabla 3.24. Parámetros resistentes de los serrines de granito obtenidos a partir de los ensayos de corte directo. M1-15g y M1-30g hace referencia a muestras tipo M1 (serrines de telar) compactadas a 15 y 30 golpes, respectivamente

De acuerdo con esos datos, podemos observar que el ángulo de rozamiento máximo es menor en el caso de las muestras M4 (serrín de corte con disco) si bien, el valor promedio de 34° podría ser tomado como representativo de todas ellas (Figura 3.54). Por otro lado, los valores de cohesión son muy bajos (~ 21 kPa, en promedio), tal y como corresponde a un material constituido por partículas sueltas no cementadas. Asimismo, los ensayos no han permitido establecer diferencias significativas entre los ángulos de rozamiento máximo y residual.

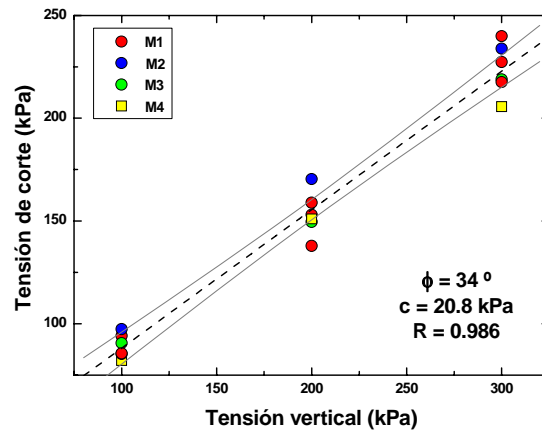


Figura 3.54. Tensiones verticales respecto de corte correspondientes a los distintos ensayos de resistencia al corte directo realizados. La línea discontinua representa un ajuste lineal a los datos experimentales relativos a serrines de telar. El valor del ángulo de rozamiento, cohesión (c), y coeficiente de correlación (R), se indica en la misma figura. Las líneas finas continuas a ambos lados de la recta de regresión representan su banda de confianza del 95%. Las muestras M1, M2 y M3 corresponden a serrines de telar mientras que la M4 son serrines de disco de corte.

La figura 3.55 muestra la comparación entre la curva de regresión de las muestras de la figura 3.54 y los ensayos sobre muestras densificadas por compactación. Podemos observar que las muestras menos compactadas son descritas satisfactoriamente por el ajuste a los datos experimentales de muestras sin compactación. De igual forma, la compactación a 30 o 60 golpes conduce a ángulos de rozamiento mayores ($\sim 40^\circ$) pero no a diferencias significativas entre ambos grados de compactación.

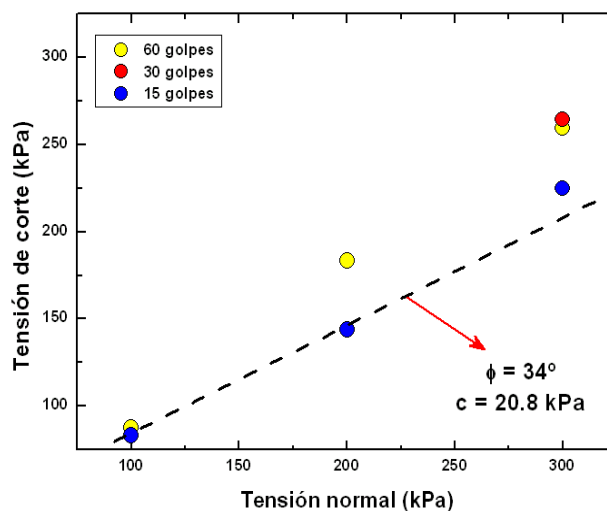


Figura 3.55. Comparación entre la curva de ajuste a muestras sin pre-compactación (línea discontinua) respecto de probetas densificadas por compactación. Observar el buen ajuste entre probetas compactadas a 15 golpes y la recta de regresión basada en probetas no compactadas

Es importante destacar que el valor medio del ángulo de rozamiento de los serrines obtenidos compara muy bien con los valores de resistencia al corte drenada de minerales que típicamente componen los suelos granulares. Así, Terzaghi et al. (1967) indican que el ángulo de rozamiento del cuarzo en presencia de agua va de 22 a 35° mientras que para los feldespatos este va de 36 a 38°. Ambos minerales son dos de los constituyentes principales de los serrines. Es remarcable, asimismo, es buena la correspondencia entre el rango de valores observados para el ángulo de rozamiento y el índice plástico ilustrado empíricamente por esos mismos autores (Terzaghi et al., 1967) en la figura 3.56.

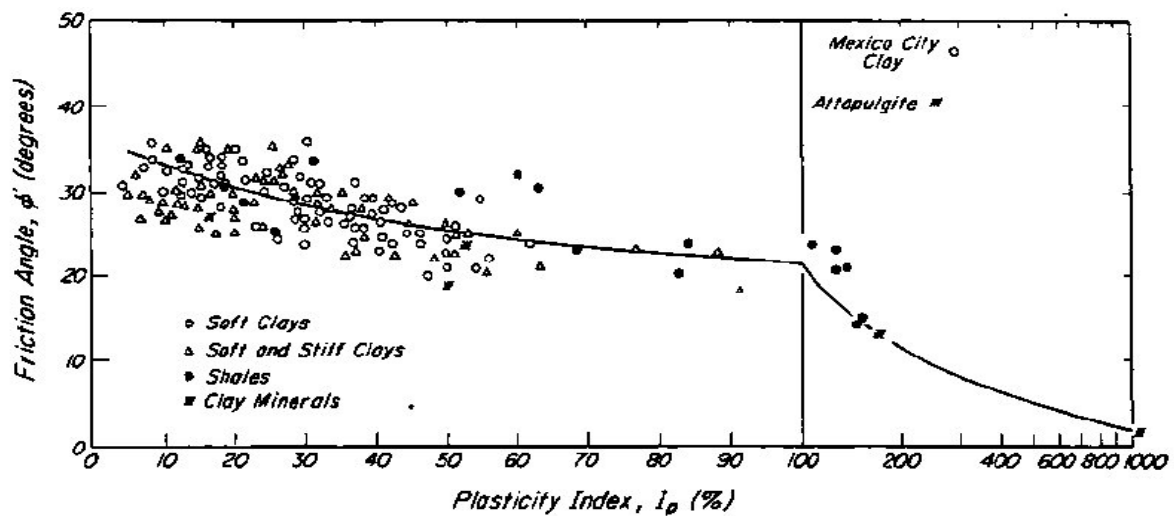


Figura 3.56. Valores típicos de diversos materiales para IP y ϕ . Extraída de Terzaghi y Peck. (1967)

Al comparar la distribución de los valores de los ángulos de rozamiento, se observa que la dispersión es pequeña, siendo los resultados coherentes y con una tendencia clara a la disminución de dicho ángulo conforme aumenta la carga. (Fig. 3.57)

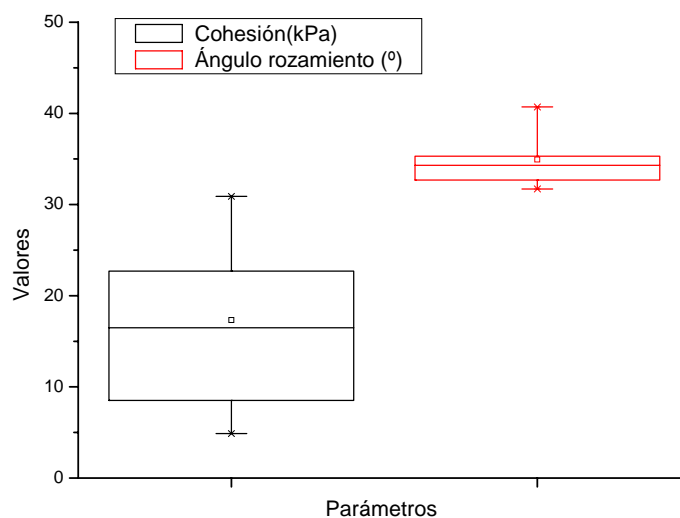


Figura 3.57. Valores de ángulo de rozamiento y de cohesión para las muestras de telar.

Esta misma coherencia en los resultados se da al comparar los valores de tensión máxima, donde los valores están razonablemente agrupados y sólo aumentan las diferencias entre valores (muestras) al aumentar la carga. (Fig. 3.58).

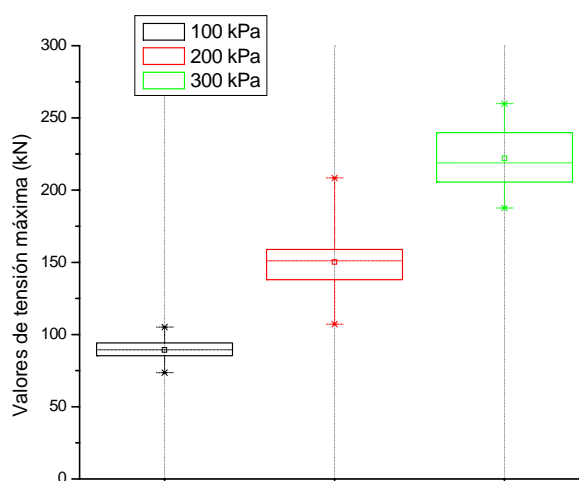


Figura 3.58. Valores de tensión máxima de las muestras de telar.

El comportamiento resistente frente al corte de las muestras inalteradas procedentes del sondeo es también ha sido establecido. Las figuras 3.59, 3.60 y 3.61 ilustran los resultados obtenidos con los distintos ensayos de corte.

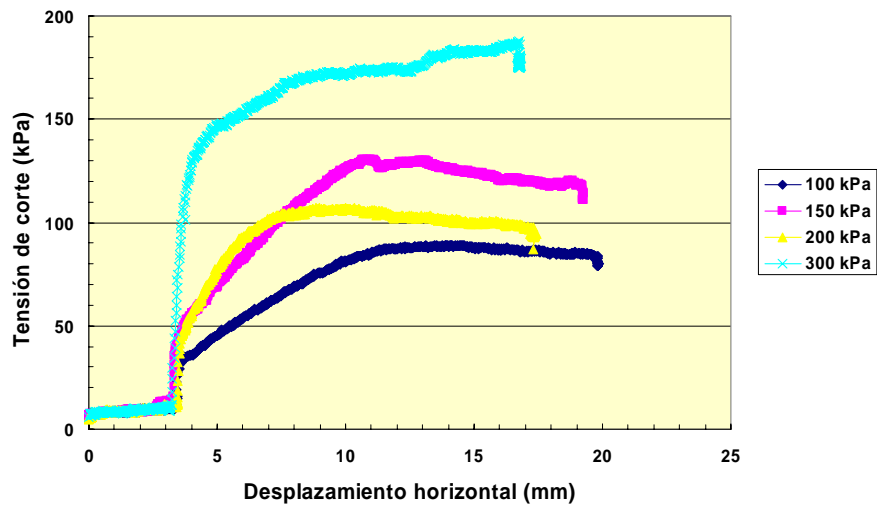


Figura 3.59. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 1 (MI-1; cota = 5.675 m) del sondeo de O Cerquido

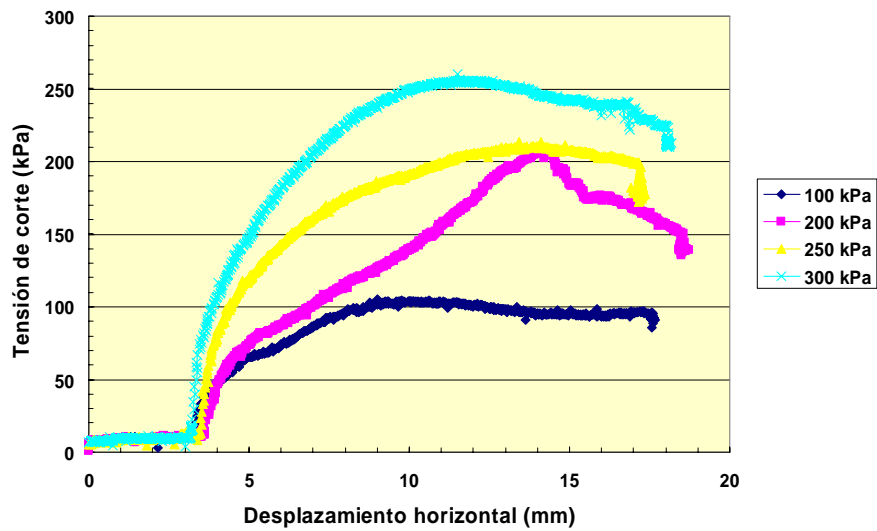


Figura 3.60. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 2 (MI-2; cota = 9.375 m) del sondeo de O Cerquido

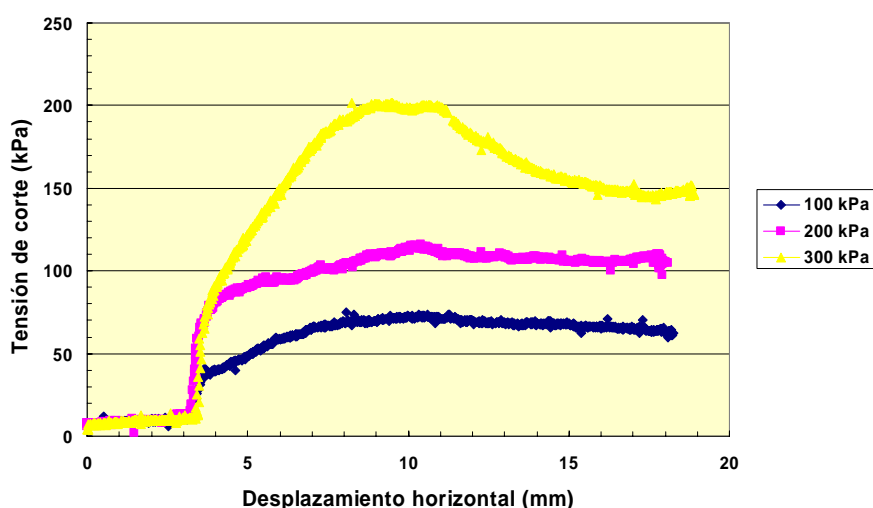


Figura 3.61. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 3 (MI-3; cota = 17.275 m) del sondeo de O Cerquido

Los resultados de la tabla 3.25 de las muestras del sondeo presentan valores similares a las muestras anteriores excepto en el caso de MI-3, que aún siendo la muestra obtenida a mayor profundidad, tiene la cohesión menor debido posiblemente a su alto contenido de humedad, por encima del límite líquido del material.

σ_v (kPa)	MI-1	MI-2	MI-3
100	89,38	105,11	75,08
200	107,11	208,41	115,91
300	187,66	259,77	201,58
w (%)	39,65	42,30	53,82
w (%)	39,65	42,30	53,82
w (%)	39,65	42,30	53,82
ϕ_{max}	29,77	36,43	4,33
c (kPa)	26,16°	37,71°	32,31°

Tabla 3.25. Valores de tensión máxima de corte (en kPa) y parámetros de los ensayos de corte directo realizados con las muestras inalteradas procedentes del sondeo.

3.7 OTRAS DETERMINACIONES

En este apartado se incluyen los ensayos in situ realizados en el sondeo de O Cerquido y la recuperación del material magnético de las muestras procedentes de dicho sondeo.

3.7.1 ENSAYOS PENETROMÉTRICOS

Los ensayos realizados corresponden a dos modalidades de penetración dinámica (SPT, Standard Penetration Test) y (DPSH, Deep Probe Super Heavy). En ambos casos es posible semicuantificar las tensiones admisibles de los suelos para diferentes profundidades, dándose el ensayo por finalizado cuando se obtiene el rechazo a la penetración (100 golpes sin penetrar un mínimo de 15 cm) o bien las resistencias obtenidas son suficientes para los requerimientos del proyecto. Este tipo de ensayos, especialmente indicado para suelos granulares, suele emplearse también en suelos finos y tiene como objetivo evaluar la compacidad del suelo, investigar la homogeneidad o anomalías del subsuelo y comprobar la situación en profundidad del estrato competente de cimentación. La normativa aplicada para la realización de los ensayos DPSH fue la UNE 103801-94 mientras que para los ensayos SPT lo fue la UNE 103800-92. En el presente estudio se han realizado 5 ensayos DPSH junto con 6 de tipo SPT. Los resultados se muestran en la tabla del Anexo 4.

Los valores SPT han sido corregidos y normalizados (Tablas 3.26 y 3.27) teniendo en cuenta distintos factores. De ese modo:

$$\begin{aligned}N_{60} &= C_{ER} N_{SPT} \\N_{60} &= C_{ER} C_B C_R C_S C_{NF} N_{SPT} \\(N_1)_{60} &= C_{ER} C_N N_{SPT} \\(N_1)_{60} &= C_{ER} C_N C_B C_R C_S C_{NF} N_{SPT}\end{aligned}$$

en las que:

Normalizaciones			Correcciones		
N_{SPT}	Golpes de campo sin corregir		C_B	Por diámetro sondeo	
N_{60}	60% energía impacto de la maza		C_R	Por peso del varillaje	
$(N_1)_{60}$	60% energía impacto y presión confinamiento		C_S	Por dispositivo de muestreo	
C_N	Por tensión vertical efectiva		C_{NF}	Por el nivel freático	
C_{ER}	Por energía impacto de la maza				

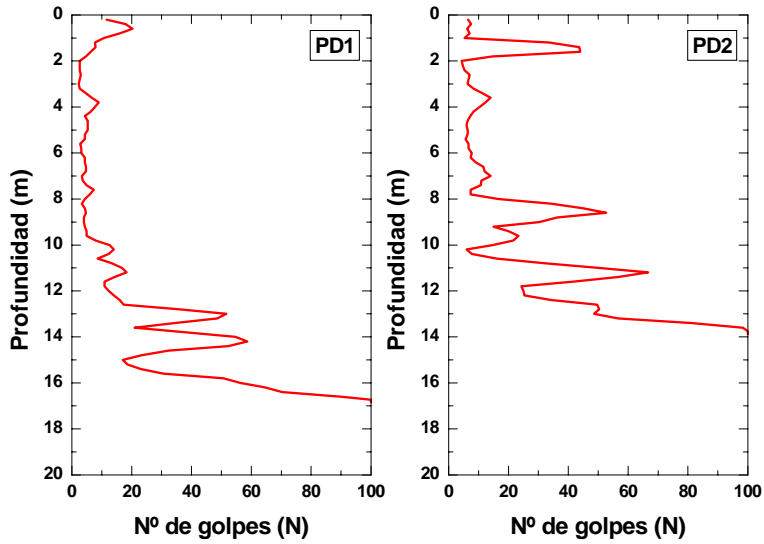
Tabla 3.26. Parámetros de las ecuaciones

De modo más específico, las correcciones realizadas fueron las siguientes:

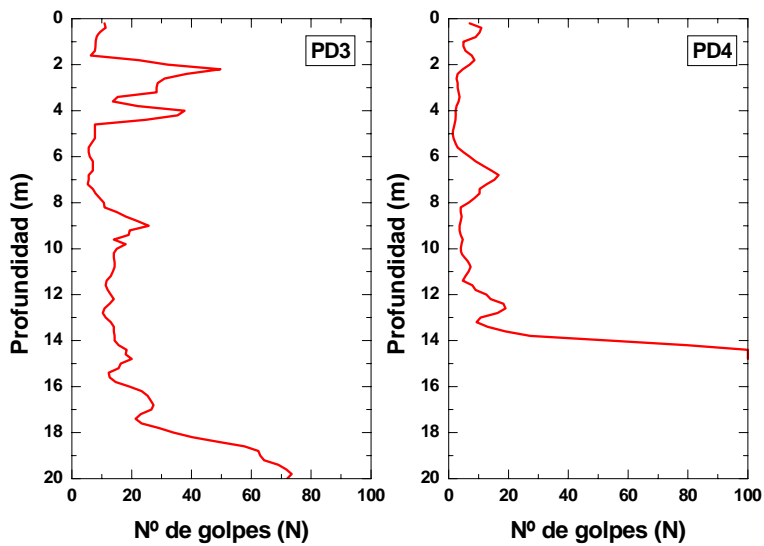
Normalizaciones usadas	
C_N	Liao y Whitman (1986)
C_{ER}	Tokimatsu y Seed (1987)
C_B	Skempton (1986)
C_R	Skempton (1986)
C_S	Skempton (1986)
C_{NF}	Baraza (1982)

Tabla 3.27. Correcciones y normalizaciones utilizadas.

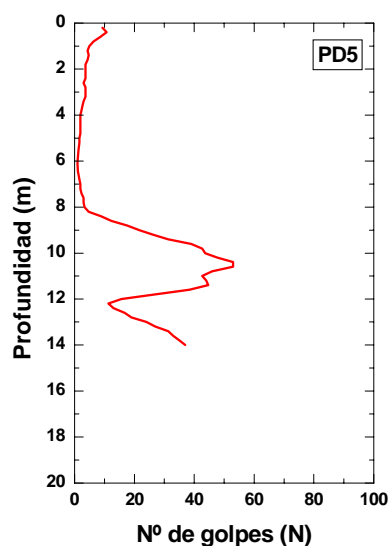
Los parámetros derivados a partir de los ensayos penetrométricos deben ser tomados como meramente indicativos en la medida que muchas de las correcciones comúnmente empleadas son de aplicación a materiales granulares y no finos, como es nuestro caso. En cualquier caso, es de destacar la baja compactación de los materiales ensayados lo cual obedece a la poca o nula compactación realizada en el momento de proceder al relleno, así como a la nula cementación. También es reseñable, no obstante, como los valores de n° de golpes (N) tienden a crecer a partir de los 12 metros de profundidad, lo que se observa en las figuras 3.62, 3.63 y 3.64. Los resultados globales se hallan en el anexo 4.



3.62. Variación del número de golpes con la profundidad para los penetrómetros 1 y 2.



3.63. Variación del número de golpes con la profundidad para los penetrómetros 3 y 4.



3.64. Variación del número de golpes con la profundidad para el penetrómetro 5..

3.7.2 ENSAYO LEFRANC

El ensayo Lefranc permite obtener un valor aproximado de la conductividad hidráulica de un medio poroso in situ. El ensayo se realiza durante la ejecución de un sondeo y consiste hacer subir el nivel de agua dentro del mismo y observar su descenso entre dos tiempos suficientemente alejados (Figura 3.65). La conductividad hidráulica, K , se calcula entonces de acuerdo con la siguiente expresión:

$$K = \frac{d_e \ln(2L/d)}{8Lt} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

En la que h_1 y h_2 es la altura de agua al principio y final del ensayo, t el tiempo transcurrido entre las observaciones de h_1 y h_2 , L la longitud de la zona filtrante, d el

diámetro de la zona filtrante y d_e el diámetro de la entubación (que puede ser igual a d). En nuestro caso los valores que dichos parámetros toman son los siguientes: $L=1,5$ m; $d_e=d=0,101$ m; $t= 10$ minutos;

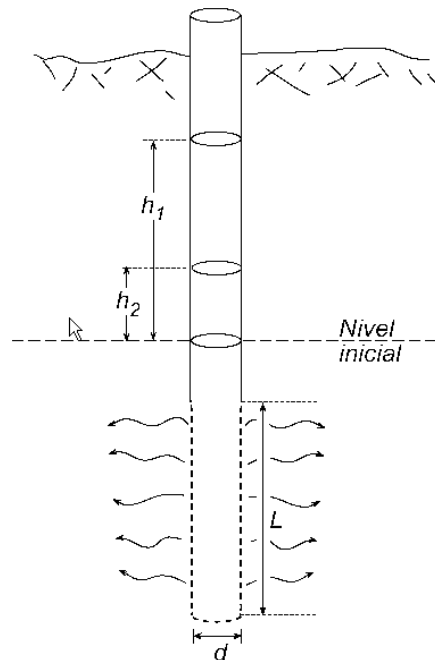


Figura 3.65. Esquema general de un ensayo hidráulico tipo Lefranc e identificación de los parámetros de interés

La figura 3.66 muestra los descensos observados en el sondeo durante la realización del ensayo de forma previa a su entubado y para una profundidad de 16.5 a 18 m. Los resultados del ensayo realizado indican que la conductividad hidráulica de los serrines de granito a la profundidad indicada es de $\sim 4,5 \times 10^{-6}$ m/s ($\sim 0,38$ m/día).

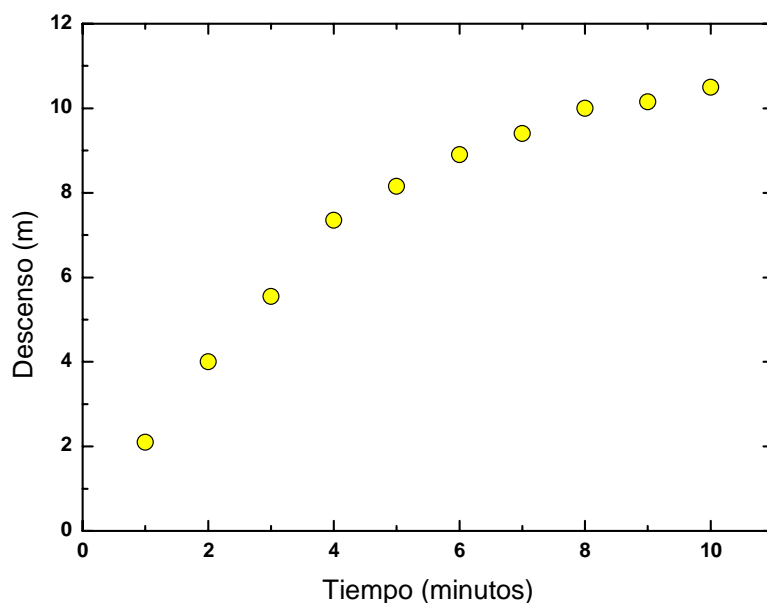


Figura 3.66. Descensos de nivel observados en el sondeo en función del tiempo a lo largo del desarrollo del ensayo Lefranc

Si se compara la determinación de la conductividad hidráulica obtenida en este ensayo in situ con las obtenidas mediante los ensayos edométricos se puede observar que existe una clara diferencia, ya que el parámetro k según los edómetros es dos órdenes de magnitud menor que la determinada por Lefranc. Esto se debe a la distinta compactación de los materiales por la heterogeneidad del relleno. En los edómetros los serrines han soportado presiones verticales mayores, hasta 1500 kPa, mientras que la tensión máxima por carga litostática del sondeo está en torno a los 315 kPa en la zona más profunda del mismo

3.8 RECUPERACIÓN DE MATERIAL MAGNÉTICO.

Se ha realizado un ensayo de recuperación de material magnético de las muestras del sondeo, ya que durante el proceso de corte se añade granalla metálica rica en Fe. Los resultados se muestran en la figura 3.67 junto con el correspondiente % de Fe analizado en

las mismas muestras. Es interesante contrastar que a unos 7 m de profundidad se produce un cambio muy significativo en el contenido de granalla (y de Fe) el cual cabe atribuirlo a la heterogeneidad de los serrines, los cuales se individualizarían en dos secciones (> 7 m ó inferior y < 7 m ó superior). Esta diferencia puede ser apreciada también en otros componentes de los serrines: el caso de algunos metales (por ejemplo, Ni, V y U) o el de algunos componentes mayoritarios (por ejemplo, sílice, aluminio, cloro, calcio, carbono total). La interpretación de este hecho cabría buscarla en cambios en la materia prima (tipología principal de granito aserrado) así como en las propias técnicas de aserrado (con un menor contenido de granalla y cal en los últimos tiempos), tal y como se ha comentado en el capítulo introductorio.

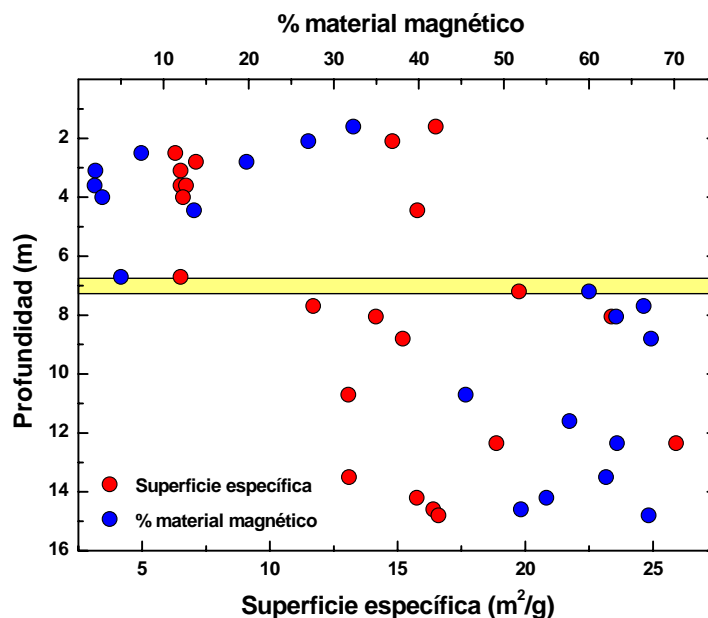


Figura 3.67. Variación de la superficie específica de los serrines de granito en función de la profundidad del sondeo. A efectos comparativos se presenta el % de material magnético recuperado a cada profundidad estudiada. Observar la razonable concordancia entre los mayores valores de superficie específica y la proporción de material férreo. La banda horizontal amarilla separa las dos secciones del sondeo. (Vázquez, 2006).

4 APLICACIÓN DE LOS SERRINES EN TERRAPLENES, RELLENOS Y BARRERAS.

Una vez conocidas las características geotécnicas de los serrines de granito resulta posible la modelización de algunos de sus posibles usos en Ingeniería Civil de acuerdo con las restricciones impuestas por las normativas y especificaciones vigentes. Resulta particularmente interesante el uso de los serrines de granito en la construcción de terraplenes para obras viales y en rellenos, dado el elevado consumo previsible de material necesario para su realización. Para hacer una detallada evaluación técnica de la viabilidad de estas aplicaciones, se han aplicado herramientas de análisis geotécnico, de acuerdo con la caracterización experimental ya realizada. Este estudio del comportamiento mecánico es importante ya que estos materiales nunca se han usado anteriormente en obras. A continuación, en la tabla 4.1 se resumen las características de los serrines, incluyendo parámetros de la consolidación secundaria que serán útiles en el presente capítulo.

LL	42
LP	32
% arcilla	10 - 15
% limo	70 - 75
% arena	20 - 10
ρ_n (g/cm³)	1,64
w_n (%)	37
ρ_s (g/cm³)	3,12
ρ_{dOPT} (g/cm³)	1,41
w_{OPT} (%)	33
C_c	0,292
C_r	0,017
C	5,47
D	1,05×10 ⁻²
H (s kPa)⁻¹	2,55×10 ⁻¹⁰
c' (kPa)	21
ϕ (°)	34

Tabla 4.1. Resumen de las características de los serrines de granito

Donde ρ_{OPT} y w_{OPT} corresponden al óptimo Proctor y C, D y H son parámetros de la consolidación secundaria ya descritos en el apartado de la consolidación.

4.1 VALORACIÓN RESISTENTE DE LOS SERRINES DE GRANITO.

El comportamiento resistente de los serrines de granito es crítico en la construcción de terraplenes. En los rellenos, dado el confinamiento existente (Figura 4.1a), se tendrá poca movilidad al corte. No sucederá así en los taludes de los terraplenes, donde es posible que se produzcan fenómenos de deslizamiento (Figura 4.1b).



Figura 4.1a. Relleno

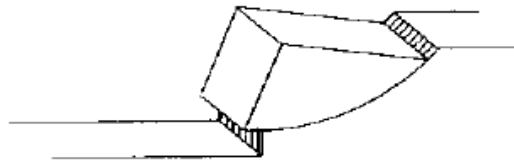


Figura 4.1b. Talud con rotura.

Para evaluar la estabilidad de los taludes de serrines de granito se han considerado dos casos tipo (Tabla 4.2). En primer lugar se ha considerado un talud de 10 m de altura, con una pendiente 1.5 H: 1V. En segundo lugar (Tabla 4.2) se ha considerado un talud muy elevado, 30 m, con una pendiente 3 H: 1V (pendiente a adoptar en taludes de esta envergadura; Escario, 1981). La cohesión y el ángulo de rozamiento se han tomado de los ensayos de corte con unos valores de 21 kPa y 34° respectivamente. Es importante recordar la existencia del depósito de O Cerquido, donde se realizó el sondeo, ya que presenta taludes estables compuestos de serrines de granito de 30° en 3 bermas de alrededor de 9 m de altura.

Como se comprueba en la tabla 4.2, en los dos casos tipo considerados se alcanza un factor de seguridad superior a 1,5, valor exigible en taludes a largo plazo (ROM 0.5-94, 1994). Para obtener estos valores se ha supuesto una situación muy adversa con respecto al

agua (terraplén completamente saturado: talud tipo 5 según la clasificación de Hoek y Bray, 1981). La estabilidad se ha obtenido utilizando los ábacos de cálculo para rotura circular de estos mismos autores (Figura 4.2). Se ha elegido el criterio de cálculo de estos autores ya que, siendo uno de los más usados y conocidos, es fácilmente correlacionable con otros métodos y permite trabajar con suelos homogéneos y saturados en situaciones de rotura circular cuya fuerza es controlada por el criterio de Mohr-Coulomb.

H	$c/\gamma H(\text{tg}\varphi)$	i	F
10	0,18	34	1,53
30	0,06	18	1,53

Tabla 4.2. Resultados del ábaco. H es la altura del talud, i el ángulo del talud, $c/\gamma H(\text{tg}\varphi)$ es una expresión que incluye la cohesión y ángulo de rozamiento del material y F es el factor de seguridad.

En consecuencia, los parámetros resistentes de los serrines aseguran un buen comportamiento a estado límite último. Por ello el esfuerzo de cálculo se centrará en el estado límite de servicio, es decir, en la deformabilidad.

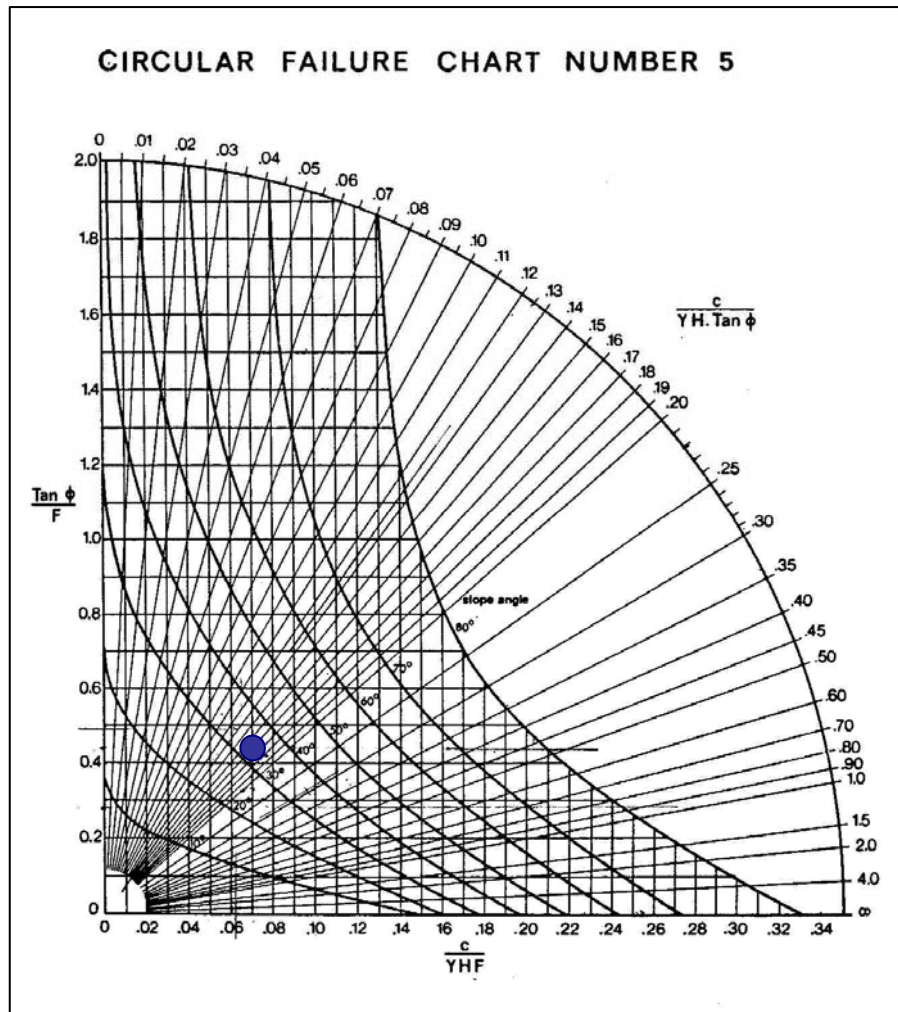


Figura 4.2. Ábaco de Hoek correspondiente al caso evaluado. (Nº 5). (Tomado de Hoek y Bray, 1981)

4.2 USO DE LOS SERRINES DE GRANITO COMO TERRAPLÉN PARA CARRETERAS. MODELO ELÁSTICO MULTICAPA.

Un posible uso de los residuos estudiados es su disposición como material de terraplén en carreteras (Figura 4.3). Según establece el pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (en adelante, PG-3) un terraplén consiste en la extensión y compactación, por tongadas, de los materiales cuyas características se definen en el punto 3º del artículo 330 del mismo pliego. Dichas actuaciones deben desarrollarse en zonas de tales dimensiones que permitan la utilización de maquinaria pesada de forma

sistemática, con el fin de a crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera. La ejecución de los terraplenes comprende las siguientes operaciones:

- Preparación de la superficie de apoyo del relleno tipo terraplén.
- Extensión de una tongada.
- Humectación o desecación de una tongada.
- Compactación de una tongada.

El principio general en el que se basa la construcción de terraplenes se basa en utilizar al máximo posible los materiales procedentes de las excavaciones de desmonte, túneles y demás obras auxiliares aunque, debido a sus características intrínsecas, puede ser recomendable prescindir de algunos de ellos. Además, el criterio de distribución de sus materiales debe ser selectivo de modo los mejores materiales para su coronación y los de peor calidad para el núcleo. En los terraplenes se distinguen cuatro zonas, cuya geometría debe ser definida en el correspondiente proyecto constructivo:

- *Coronación:* Es la parte superior del relleno tipo terraplén, sobre la que se apoya el firme, con un espesor mínimo de dos tongadas y siempre mayor de 50 cm.
- *Núcleo:* Es la parte del relleno tipo terraplén comprendida entre el cimiento y la coronación.
- *Espaldón:* Es la parte exterior del relleno tipo terraplén que, ocasionalmente, constituirá o formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos sin misión estructural en el relleno entre los que se consideran, plantaciones, cubierta de tierra vegetal, encachados, protecciones antierosión, etc.

- *Cimiento*: Es la parte inferior del terraplén en contacto con la superficie de apoyo. Su espesor será como mínimo de 1 m.

De acuerdo con el artículo 330 del PG-3, los materiales empleados en terraplenes serán, de modo general, suelos o materiales locales que se obtendrán de las excavaciones realizadas en obra así como de préstamos que se definan en el Proyecto o que se autoricen por el Director de las Obras. Los serrines de granito encajarían en esta última categoría según los valores indicados por el PG-3 (Tabla 4.3).

Tipo	LL	IP	Hinchamiento libre	Materia Orgánica	Sales Solubles	D _{max}	UNE #2	UNE #0.40	UNE #0.080
Serrines	~42	~8	~0,15	~ 0,1	~0,05		100	~95	~80
Seleccionados	< 30	< 10	0	< 0.2	< 0,2 (a)	< 100 mm		≤ 15	
							< 80	< 75	< 25
Adecuados	< 40	> 4 (b)		< 1.0	< 0,2 (a)	< 100 mm	< 80		< 35
Tolerables	< 65	> 0,73(LL-20) (d)	< 3.0	< 2.0	< 1.0 (c)				
Marginales		< 0,73(LL-20) (e)	< 5.0	< 5.0					
Inadecuados	No cumple con las condiciones anteriores								

Tabla 4.3. Criterios establecidos por el PG-3 (artículo 330) en relación a las características que deben reunir los terraplenes para obras viales. Todos los datos en %. Notas: (a) incluyéndole yeso; (b) Si LL > 30, IP > 4; (c) Sales distintas al yeso. El contenido en yeso debe ser < 5%; (d) Si LL>40; (e) Si LL>90

Consecuentemente se ha de valorar su capacidad portante para poder ser utilizado como explanada de infraestructuras viarias. Para esto se procedió a un cálculo analítico mediante un modelo elástico de comportamiento de sistemas multicapa. Para este fin se ha utilizado el módulo `elast4` del modelo `PavimCR` (Yustres 2003). Este modelo está basado en la solución teórica planteada en diversas referencias (Burmister, 1945a; Burmister, 1945b; Burmister, 1945c; Hayhoe, 2002; Huang, 1993).

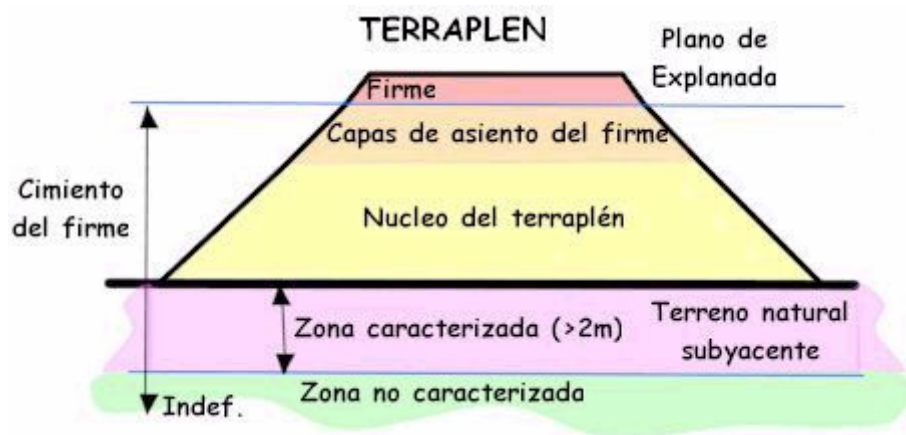


Figura 4.3. Esquema general de un terraplén de carretera

Para conocer si los serrines pueden ser utilizados en explanadas de carreteras ha de buscarse un criterio de discriminación significativo en lo relativo a las obras lineales. En este caso, dado que la Xunta de Galicia no dispone en la actualidad de un marco normativo al respecto, se ha utilizado el propuesto por la Junta de Andalucía, O.C. 1/1999 “Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía” (Junta de Andalucía 2003) ya que se aplica en vías de moderada densidad de tráfico que representan el tipo de infraestructuras donde se pueden plantear el uso de estos materiales.

De acuerdo con la Junta de Andalucía (2003), la calidad de las explanadas viene determinada por el **módulo elástico equivalente**, E_{eq} , que puede ser obtenido mediante la expresión empírica:(Junta de Andalucía 2003):

$$E_{eq} = 13150 / d_0$$

donde d_0 es la deflexión superficial (en centésimas de mm) causada por una carga de aplicada sobre una placa circular de 15 cm de radio y equivalente a 500 kPa. El valor 13150 es obtenido al considerar un espacio de Boussinesq (semiinfinito equivalente, elástico, lineal, homogéneo e isótropo) de módulo E_{eq} y de coeficiente de Poisson 0,35 que presenta la misma deflexión superficial que la explanada estudiada. La Junta de Andalucía exige además que para que una explanada sea admisible, el valor mínimo de E_{eq} sea de 60 MPa y denomina a este tipo de construcción **E1**. Las explanadas de calidad media, **E2**, han de tener un módulo equivalente no inferior a 100 MPa y en las de calidad superior, **E3**, E_{eq} ha de ser mayor de 160 MPa.

Tal y como se indica en la normativa de referencia, se considera una profundidad mínima de reconocimiento del substrato de 2 m. Bajo el mismo se sitúa, con espesor infinito, una capa con un comportamiento elástico determinado en función del terreno reconocido (Junta de Andalucía 2003). La zona reconocida toma los valores dados en la descripción de los serrines, en donde el módulo edométrico secante, $E_{m,s}$, se obtiene como

$$E_{m,s} = \frac{(1 + e_o) \sigma'_f - \sigma'_o}{C_s \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_o}}$$

donde e_o es el índice de huecos inicial a tensión σ'_o , C_s es el índice de hinchamiento y σ'_f es la tensión final (tras la aplicación de la placa de carga). El módulo de elasticidad del suelo se obtiene mediante

$$E = \frac{E_{m,s}(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

donde ν es el módulo de Poisson, cuyo valor para este caso es de 0,35. Como el módulo de elasticidad de los serrines depende de las tensiones finales y estas a su vez de dicho módulo ha sido preciso un cálculo iterativo hasta conseguir la solución del problema. Los módulos elásticos obtenidos (Figura 4.4) se sitúan por debajo de los valores de la tabla 1 y no llegan a los 60 MPa que exige la normativa. Cabe apuntar que independientemente de estos resultados basados en la deformabilidad del material los serrines de granito se consideran de naturaleza “marginal” según el PG-3 (Ministerio de Fomento 2002), que es el documento que determina las prescripciones tecnológicas usadas en España. Según el PG-3 los serrines, y por tanto las explanadas de este material, son marginales al presentar un límite líquido (LL) en torno a 40 y un índice de plasticidad (IP) cercano a 10.

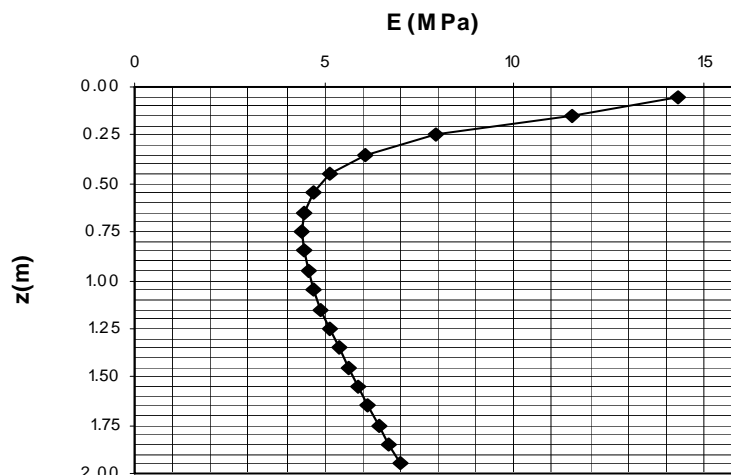


Figura 4.4. Valores obtenidos de E en la simulación junto a la profundidad considerada de terraplén uniforme de serrines de granito.

Se han evaluado las explanadas propuestas en la Norma 6.1. I.C. (Ministerio de Fomento 2003) para el caso de que el suelo de excavación o la obra de tierra subyacente sea de tipo inadecuado, marginal o tolerable, según el artículo 330 del PG.-3 (Ministerio de Fomento 2002). Para cada una de las explanadas se ha realizado un cálculo elástico no lineal para estimar la deflexión (d_0) que se produciría si se realizara un ensayo de placa de carga como el propuesto por la Junta de Andalucía. El programa supone una simetría cilíndrica, simulando una carga circular equivalente para obtener el efecto de las ruedas. En este caso se ha supuesto que las explanadas descansan sobre los serrines en lugar de hacerlo sobre suelo de tipo “inadecuado”. Se han analizado todas las secciones asignando las propiedades elásticas a los materiales en ellas incluidos de acuerdo con las indicaciones de la normativa andaluza. En el caso de suelos, dado que las clasificaciones en las normativas andaluza y la estatal difieren, se ha realizado una conversión de los límites definidos en la normativa autonómica (Junta de Andalucía 2003, ver Anexo IV) para adaptarla a la nacional.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos en esta evaluación. Bajo cada una de las secciones que propone la norma 6.1. I.C. se muestra el módulo elástico equivalente (E_{eq}). Como se puede observar ninguna de las secciones responde con los requerimientos de explanada de ninguna de las dos normas. Únicamente las secciones de explanada E3 pueden ser usadas para obtener una explanada E1.

Tipo de terraplén	Solución 6.1 IC	E_{eq} (MPa)
E1	1	31
	2	31
	3	23
	4	36
	5	33
	6	27
E2	7	47
	8	42
	9	35
	10	40
	11	49
	12	60
E3	13	86
	14	74
	15	82

Tabla 4.4 Módulo elástico equivalente obtenido para las explanadas contempladas en la Norma española 6.1 IC (Ministerio de Fomento, 2003), asumiendo el uso de serrines como sustituto de otros materiales marginales.

El pobre rendimiento del material estudiado se debe a su bajo módulo de elasticidad, que provoca que los materiales de tipo suelo que se asientan sobre ellos queden compactados de manera deficiente. Sin embargo, además del efecto explícito de la deformabilidad de los serrines, es importante apuntar que este efecto se propaga al resto de los materiales. En un medio multicapas compactado la deformabilidad de una capa viene dada por la deformabilidad del material que se halla bajo ella, ya que ese material condiciona la eficiencia de la compactación de la capa estudiada.

Este efecto es reproducido en la norma andaluza mediante los coeficientes c_i definidos en la Tabla Anexo 4 (en Junta de Andalucía 2003). Mediante ellos se obtiene el módulo elástico de una tongada de suelo compactado siendo este c_i veces superior la capa subyacente. Sin embargo las capas estabilizadas con cal o cemento tienen unas características fijas, como la rigidez, que no son dependientes de los materiales subyacentes. Se “corta” así la propagación de la flexibilidad. Esta independencia da lugar a un mejor rendimiento global de las secciones que presentan estos materiales mejorados, obteniéndose una explanada equivalente considerablemente mejor que la conseguida sin suelo estabilizado como se puede observar en la tabla 4.4. Aún así los módulos resultantes son inferiores a los que según la norma 6.1 C deberían presentar.

A tenor de los resultados y teniendo en cuenta que la finalidad de este estudio es comprobar si estos materiales pueden ser usados en este tipo de obras y no optimizar la

construcción de carreteras, la utilización de aditivos estabilizantes permite buscar soluciones especialmente adaptadas a los serrines de granito, sobre todo en la construcción de terraplenes. En este tipo de obra los serrines pueden servir, de un modo barato, para aproximar la obra a la rasante deseada, pese a que en la parte final del terraplén haya que usar materiales más caros.

Ya que la consolidación de los serrines condicionará la aplicabilidad de estas soluciones, es necesario conocer más cosas sobre ella y por tanto es necesario conocer la consolidación global del sistema (terraplén de serrines) debida al peso propio y a una sobrecarga de uso extendida (carga uniforme en superficie). Esto se analizará en el siguiente apartado.

4.3 USO DE LOS SERRINES EN LA CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS.

Junto a la potencial construcción de terraplenes de obras lineales, otro de los usos contemplados para estos materiales es la construcción de rellenos que permitan generar suelo urbanizable en zonas donde la topografía sea accidentada, como sucede en el caso de O Porriño. Otro tipo de relleno a estudiar es el de antiguas canteras, ya abandonadas, y que actualmente se lleva a cabo en algunas explotaciones de la comarca. En todos estos casos es fundamental caracterizar correctamente el proceso de consolidación, con especial atención a la hora de introducir en el modelo la influencia del proceso constructivo. Durante dicho proceso la mayor parte del relleno experimenta una importante variación de carga, dificultando el análisis del mismo mediante modelos de consolidación lineal. Además, pese a que tras la compactación el grado de saturación S_r será elevado, se tendrá un proceso de consolidación parcialmente saturada. Esto implica el uso de métodos numéricos para analizar el relleno y su comportamiento, pese a que en buena parte del sistema el proceso será unidimensional, tanto en deformación como en flujo. Las herramientas y formulaciones desarrolladas con anterioridad por otros autores (por ejemplo, Lloret y Alonso, 1980; Wong et al., 1998; Conte, 2004), no están orientadas a simular procesos de construcción ni tienen en cuenta los asientos diferidos asociados a la consolidación secundaria, lo que infravalora tanto el asiento total, como el control de dicha consolidación secundaria sobre la tasa de asiento en condiciones de campo. Por ello se ha desarrollado en

colaboración con la E.T.S. de Ingeniería de Caminos de la UCLM en Ciudad Real, el programa Gar4fill, código adaptado para simular la consolidación de un relleno compactado.

En este programa se ha usado, dada la elevada saturación de los rellenos, la tensión intergranular σ^* para caracterizar la consolidación unidimensional del material:

$$\sigma^* = \sigma - P_G + s \cdot S_r$$

donde σ es el esfuerzo vertical total, P_G es la presión de gas, s es la succión ($s = P_G - P_l$) y S_r es el grado de saturación. De este modo la tensión σ^* es equivalente a la definición clásica de esfuerzo efectivo para $s=0$ y $S_r=1$ y la propuesta por Bishop (1959) con χ igual a S_r si el suelo no está totalmente saturado.

La variación del índice de poros macroestructural, Δe_M ($e_M =$ volumen de poros macroestructurales/ volumen de mineral), se calcula como:

$$\Delta e_M = -C^* \cdot \Delta \log(\sigma^*)$$

donde C^* es igual a C_r si σ^* es menor que la tensión de preconsolidación σ_C , y será igual a C_c si σ^* es igual a σ_C . Para la presión de consolidación se ha tomado un valor inicial de 100 kPa, que es coherente con la estabilización del índice característico de la consolidación primaria observada al identificar los parámetros en los ensayos edométricos realizados. (Figura 4.5) Además está de acuerdo con los valores propuestos por Alonso (2002). El valor de la preconsolidación se actualiza a lo largo del proceso de cálculo si se comprueba que σ^* tiende a superar a σ_C (siempre se tiene $\sigma_C \geq \sigma^*$).

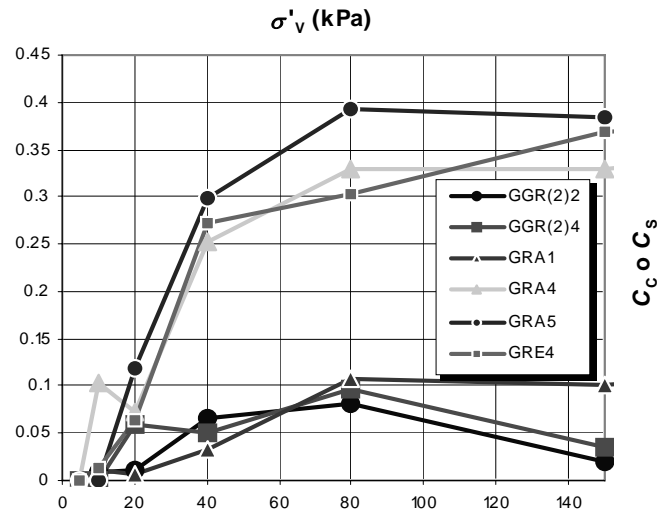


Figura 4.5. Valores de los índices característicos de la deformación macroestructural (C_c ó C_s) asumiendo las leyes $\Delta e_M \leftrightarrow \Delta \log \sigma'_v$. Los valores están definidos para cada escalón de carga.

La consolidación secundaria es entendida como el resultado de los procesos locales de transferencia del agua que ocupa los microporos menores de 10-100 nm (agua microestructural), hacia los poros mayores libres de agua (agua macroestructural). Esta idea, ya descrita y con formulación propuesta por autores como De Jong, (1968); Mitchell, (1993); Sills, (1995); ó Murad et al., (2001), ha demostrado ser una herramienta útil para caracterizar los procesos de consolidación secundaria en diversos suelos (Navarro y Alonso, 2001; Navarro y Alonso, 2005). Se ha usado para analizar los ensayos de consolidación realizados en los edómetros y se han podido determinar satisfactoriamente los parámetros de consolidación secundaria C , H y D , ya descritos en el capítulo 4. Estos parámetros han sido usados como datos de entrada para Gar4fill, ya que las bases termodinámicas de la formulación permiten utilizarlos en suelos parcialmente saturados.

Para caracterizar correctamente la consolidación hemos de definir otros parámetros necesarios para el cálculo. Así la tasa de transferencia de agua, c_m , ha sido determinada conforme a Alonso y Navarro (2005):

$$c_m = G \cdot [\pi - \pi_B]$$

donde G es un coeficiente de transferencia que se calcula como:

$$\frac{G}{\rho_m} = H \left(\frac{\pi_B}{\pi} \right)^C = 2.55 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{\pi_B}{\pi} \right)^{5.47}$$

siendo ρ_m la densidad del agua microestructural, π el potencial de hinchamiento, C y H los parámetros de consolidación secundaria ya conocidos y con valores de $2,55 \times 10^{-10}$ 1/[s kPa]) y 5,47 respectivamente. En cuanto a π_B , se trata de una función definida como:

$$\pi_B = \sigma - \frac{\rho_m}{\rho_w} [P_L - P_{atm}] - \frac{\rho_m}{MW_w} RT \ln x_M$$

donde ρ_w es la densidad el agua de la muestra, P_L es la presión del líquido, P_{atm} la presión atmosférica, MW_w el peso molecular del agua, R la constante universal de los gases, T la temperatura y x_M la fracción molar del agua de los macroporos (definida como $x_M = n_M / n_L$, el cociente entre el número de moles del agua macroestructural entre el número de moles del líquido; esto es al agua más las sales disueltas). En el estudio se considera $x_M \approx 1$.

Para suelos saturados, si tomamos P_{atm} como 0, el esfuerzo π_B se convierte aproximadamente en el esfuerzo efectivo y lo será exactamente si las densidades del agua libre y adsorbida son iguales. Se puede interpretar como el potencial de presión de agua que el contorno (carga y estado del agua macroestructural) impone a la microestructura. El potencial de hinchamiento, π , define el esfuerzo que se debe aplicar a una temperatura dada para que el índice de poros de la microestructura se mantenga constante mientras el agua macroestructural está a presión atmosférica. Este potencial está ligado a la microestructura del suelo mediante la expresión (Alonso y Navarro, 2005):

$$\Delta e_m = -D \cdot \Delta \log(\pi) = 1.05 \times 10^{-2} \cdot \Delta \log(\pi)$$

donde e_m es el índice de poros de la microestructura del suelo y D es un parámetro de la consolidación secundaria, ya conocido y con un valor de $1,05 \times 10^{-2}$, que puede cambiar con la temperatura, aunque dada la pequeña variación de la misma en rellenos simulados se ha considerado T constante.

Al simular la construcción del relleno hay que tener en cuenta que las consolidaciones primaria y secundaria pueden solaparse durante un lapso de tiempo significativo. Por lo tanto las variaciones de la macro y microporosidad han de ser formuladas por separado. Estas ecuaciones de balance (Navarro y Alonso, 2001) son:

$$\frac{1}{(1+e)} \frac{D_S(e_M \cdot Sr)}{Dt} + \frac{\partial(q_M)}{\partial z} + \frac{c_m}{\rho_w} = 0$$

$$\frac{D_S e_m}{Dt} = \frac{(1+e)}{\rho_m} c_m$$

donde $D_S(\bullet)/Dt$ es la derivada material con respecto al movimiento del esqueleto sólido del suelo, e es el índice de poros total ($e=e_M+e_m$), y q_M es el flujo volumétrico del agua de la macroestructura paralelo al eje Z. Se calcula aplicando la ley de Darcy:

$$q_M = -\frac{K \cdot \kappa}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_L}{\partial z} + \gamma_w \right)$$

donde μ_w y γ_w son la viscosidad dinámica y el peso específico del agua libre. K es la permeabilidad intrínseca y κ la permeabilidad relativa. Este parámetro se calcula combinando los modelos de Brooks y Corey (1964) y Burdine (1953):

$$\kappa = Se^{3+2/\lambda}$$

donde Se es la saturación efectiva definida como:

$$Se = \frac{(Sr - Sr_R)}{(Sr_S - Sr_R)}$$

siendo Sr_R la saturación residual y Sr_S la saturación máxima. La saturación efectiva se calcula a través de la expresión de Van Genuchten (1980) sobre la retención de agua:

$$Se = \left(1 + (\alpha \cdot s)^n \right)^{-m}$$

donde α es un parámetro de ajuste relacionado con la presión de entrada del aire y n y m son parámetros de ajuste relativos a la distribución del tamaño de poro. En este caso se asume $m=1-1/n$ al igual que la equivalencia propuesta por Carsel y Parrish (1988) entre los parámetros n y λ ; $\lambda = n-1$. En cuanto a los valores de Sr_R , α y m , se aceptan los valores de Meyer et al. (1999) para **silt loam** como se ve en la tabla 4.5 y Sr_S se toma con valor de 1. La permeabilidad intrínseca K se calcula conociendo el valor de la conductividad hidráulica, k , a partir de los datos edométricos.

S_{rR}	0,121
α (kPa ⁻¹)	0,193
m	0,219

Tabla 4.5. Parámetros hidráulicos de los serrines

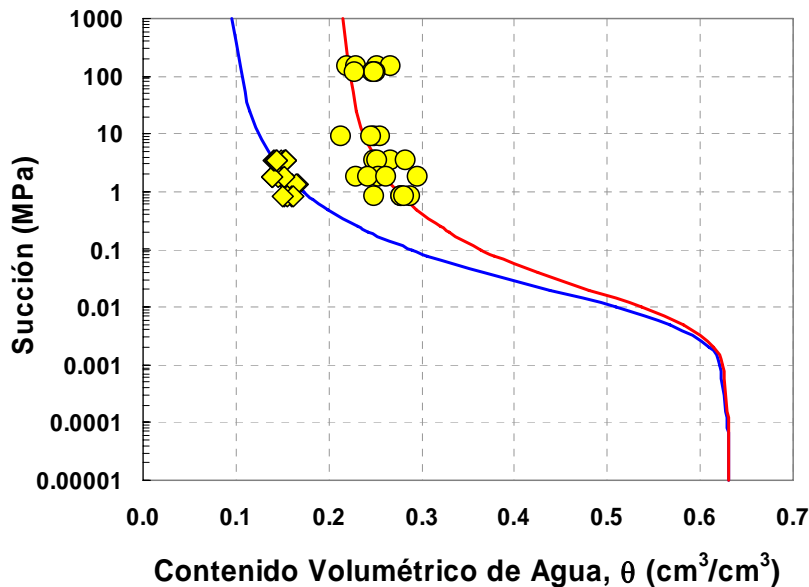


Figura 4.6. Curvas de Van Genuchten para los serrines de granito. (Vázquez, 2006)

También supone que los poros con aire están interconectados lo que lleva a que la presión de gas se disipe velozmente y la P_G permanezca constante a presión atmosférica (P_{atm}). Esto hace que sólo deba resolverse el flujo del agua siendo la variable de estado del problema P_L ($s=P_G-P_L$).

Para calcular P_L , Gar4fill resuelve la ecuación diferencial de balance de agua mediante la discretización de elementos finitos basada en un algoritmo FCTS (Forward Time Centered Space; Press et al., 2002). Se utiliza una malla con nodos separados cada 20 cm. El programa fue comprobado en dos etapas. La primera consistió en comparar los resultados analíticos con los obtenidos por el programa en una consolidación lineal saturada. La segunda consistió en comparar distintos procesos constructivos con el programa de simulación FADES (Navarro and Alonso, 2000; Juncosa et al., 2001). Los resultados de ambas verificaciones fueron satisfactorios.

El programa Gar4fill también fue usado para realizar un ejercicio de validación del modelo hidro-mecánico. Para ello se simuló la consolidación unidimensional de una probeta de 20 cm de espesor y 10 cm de diámetro en condiciones iniciales del óptimo del Proctor normal. Utilizando los parámetros identificados en probetas convencionales de 2 cm, el modelo numérico permite reproducir los resultados experimentales, como se observa en la figura 4.7. El ajuste obtenido parece indicar que los parámetros asumidos para el comportamiento hidráulico son válidos. Por tanto el modelo parece capaz de predecir la consolidación de rellenos de considerable espesor.

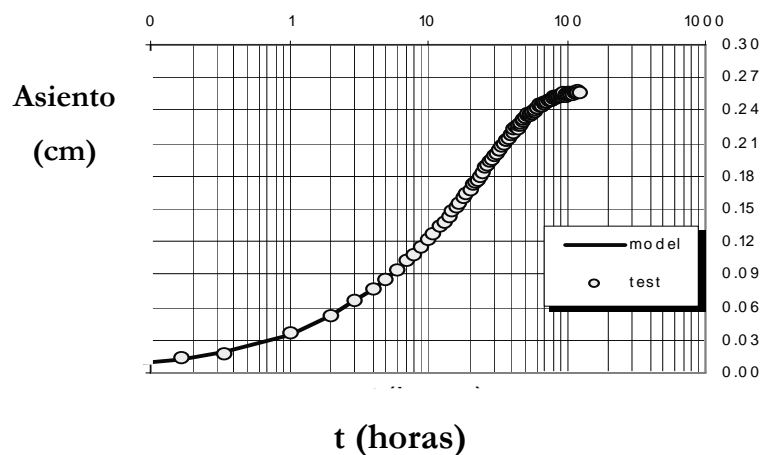


Figura 4.7. Comparación de la consolidación de una probeta de 20 cm a condiciones iniciales Proctor normal realizada por simulación y experimentalmente.

Por último señalar que el programa Gar4fill simula el proceso de un modo automático. Sólo es necesario indicar al comienzo de la simulación el número de etapas constructivas, el tiempo que transcurre entre ellas, el número de tongadas de cada etapa y su espesor y el tiempo en el que se disponen las tongadas. Además el programa realiza los ajustes entre etapas automáticamente con lo que no es necesario calcular manualmente.

4.4 SIMULACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO.

Se ha simulado la construcción de cuatro rellenos de 2, 4, 8 y 16 metros de altura. En cada caso se han considerado, respectivamente, 1, 2, 4 y 8 etapas de construcción, cada una de ellas de 2 metros de espesor. Cada capa de 2 m se coloca mediante 10 tongadas de 20 cm y cada día se colocan 2 tongadas, dejando 15 días entre dos etapas sucesivas sin

colocar material. Tras acabar la construcción del relleno se dejan pasar otros 15 días antes de colocar una sobrecarga de uso de 15 kPa, tal y como recomienda el Departamento de Transporte de California (CALTRANS, 1995). Esta es la llamada estrategia **S0**. Para cada uno de los rellenos considerados se tarda, respectivamente, 5, 25, 65 y 145 días en la ejecución en función de los metros de relleno.

Se ha supuesto un borde inferior de relleno impermeable y equilibrio en superficie entre evaporación e infiltración, pero el programa permite modificar estos parámetros. Los resultados presentan asientos no excesivos como se observa en la figura 4.8 y la tabla 4.8. A medida que los rellenos son más altos disminuye la importancia de la consolidación secundaria, pasando del 58 % en el relleno de 2 m al 27 % del relleno de 16 m. Estos valores están dentro del rango descrito por Pelletier et al. (1979; en Crawford, 1986) para terraplenes de autopistas. Un aspecto destacado es la rapidez a la que se produce la consolidación, algo esperable para suelos no saturados y con poros con aire interconectados. A medida que se construye la carga es asumida directamente por el esqueleto sólido y no se producen incrementos de presión de agua en los poros. La consolidación secundaria también experimenta una rápida evolución. La velocidad de carga asociada a la construcción es lo suficientemente lenta para que la evolución del estado de la microestructura se pueda entender como una sucesión de etapas de equilibrio, de escalones, tal y como se ve en la figura 4.10.

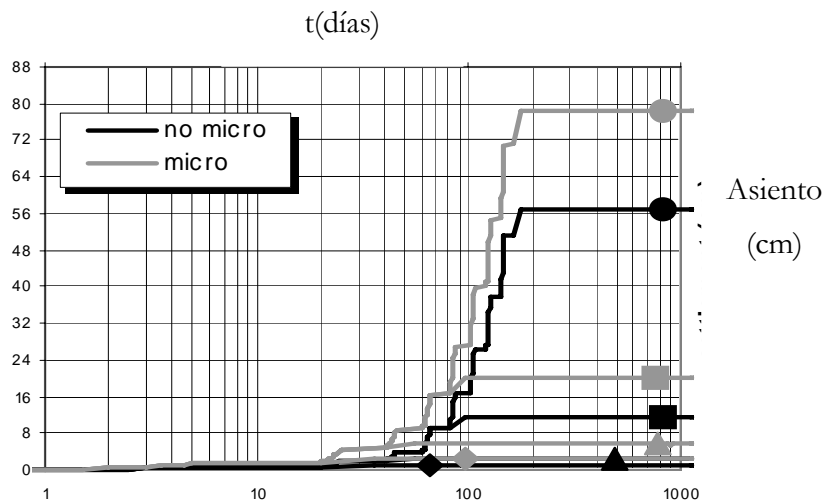


Figura 4.8. Evolución del asiento para la estrategia S0. El relleno de 16m se marca con un círculo, el de 8 m con un cuadrado, el de 4m con un triángulo y el de 2m con un rombo.

A lo largo del proceso π es siempre casi igual a π_B , que a su vez es igual a σ , ya que apenas se generan una presión excesiva de agua en los poros (s es casi constante durante el proceso). En la figura 4.9 se puede observar la evolución de estos parámetros con el tiempo y en comparación con un ensayo de consolidación de control. Dicho ensayo consistió en someter a una probeta de serrines de 2 cm de espesor a una carga instantánea de 300 kPa (valor similar a la carga de 16 m de terraplén, curva OEDM de la gráfica). La carga brusca genera un incremento instantáneo de π_B que no puede ser seguido por la capacidad de transferencia de agua de la microestructura ni por la deformabilidad, lo que genera un proceso diferido de la consolidación secundaria asociado a la tendencia de π a equilibrarse con π_B .

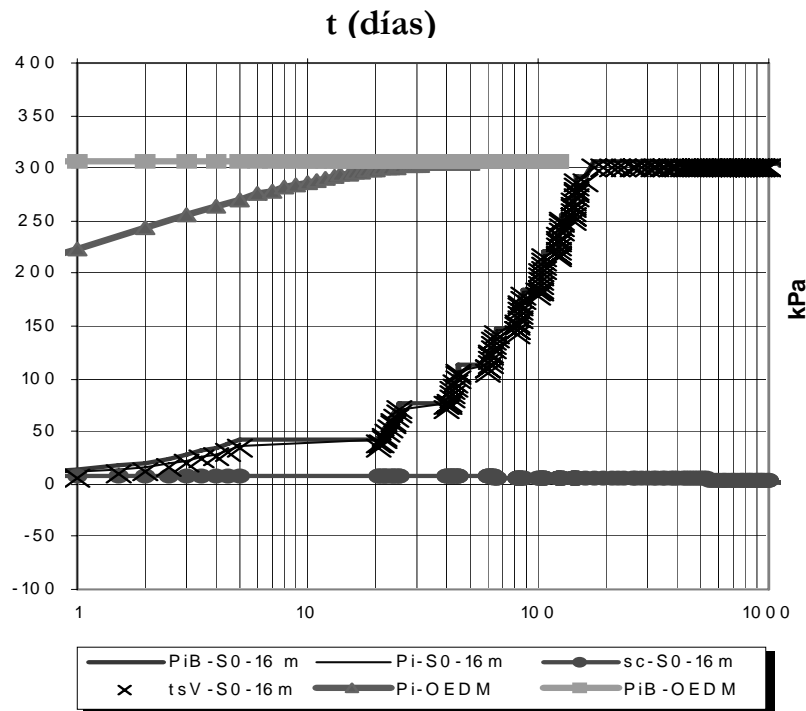


Figura 4.9. Variación de los esfuerzos de hinchamiento π y π_B (curvas P_i y $P_i B$), de la succión s (curva s_c) y del esfuerzo vertical total (curva tsV) a $z=0$. Estas curvas son relativas a la simulación de la construcción de un relleno de 16 m siguiendo S_0 . Las curvas OEDM pertenecen a la simulación del ensayo edométrico.

También es destacable el efecto de la tensión de preconsolidación, ya que al aumentar la altura del relleno las tensiones verticales aumentan, llegando a superar las condiciones de preconsolidación iniciales. En los rellenos de 2 y 4 m todo el suelo se mantiene en la rama de recarga pero en los rellenos de 8 y 16 m el suelo pasa a la rama noval. En el caso de los 8 m lo hace en los últimos 3,8 m (σ^* máxima de 159 kPa en $z=0$) y

para el relleno de 16 m lo hace en los últimos 11.6 m (σ^* máxima de 306 kPa). Esto también se traduce en el incremento relativo del asiento, que es de 1,8 cm/m en los rellenos de 2 y 4 m, pero se eleva a 3,6 cm/m para pasar al escalón de 8 m y llega hasta 7,2 cm/m al pasar a los 16 m

En todos los casos la velocidad de consolidación es alta, lo que invita a probar la simulación de procesos constructivos más rápidos que S0. Se han considerado las estrategias de la tabla 4.6 pero considerando sólo terraplenes de 16 m de altura. En la figura se puede observar que al construir más deprisa se acelera el asiento, es decir se produce más asiento en menos tiempo.

Estrategia	t_s (días)	t_B (meses)	t_C (meses)
S0	0,5	0,5	0,5
S1	0,5	0	0
S2	0,25	0	0
S3	0,1	0	0

Tabla 4.6. Estrategias de ejecución de los rellenos. En cada caso se han colocado 10 tongadas de 20 cm y se ha tenido en cuenta la sobrecarga de 15 kPa.

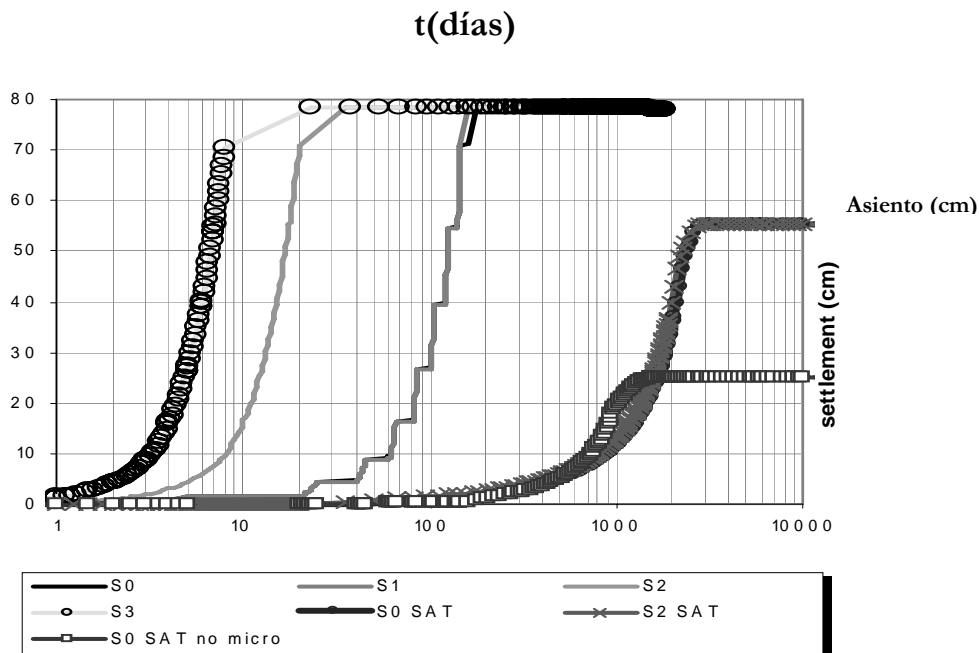


Figura 4.10. Evolución temporal de los asientos según cada una de las estrategias seguidas. S0 SAT y S2 SAT se han simulado en condiciones saturadas. S0 SAT no micro sólo considera la consolidación primaria.

Para comparar con criterio los valores de los asientos hay que considerar que el uso del relleno está condicionado por el incremento del asiento producido al colocar la sobrecarga y es una manera indirecta de limitar los posibles asientos superficiales. Conforme con la norma española de edificación NBE-AE/88 (Ministerio de Fomento, 2002b), el incremento máximo para cimentar estructuras de pequeña rigidez es de 75 mm, pasa a ser de 50 mm para estructuras de gran rigidez y sólo es de 25 mm para edificios de carácter monumental.

A tenor de los asientos de la tabla 4.7 las estrategias S0, S1 y S2 presentan un asiento menor de 75 mm y en el caso de S3 el asiento es prácticamente este valor. En consecuencia los rellenos podrían usarse como cimentación para industrias ligeras prácticamente tras acabar su construcción. En el caso de los análisis saturados, S0 SAT y S2 SAT, los procesos de consolidación de la macro y microestructura se ralentizan y prácticamente todo el asiento se produce tras el proceso constructivo, por lo que la estrategia de ejecución es casi irrelevante. Los resultados de S0 SAT (por escalones) son casi idénticos a S2 SAT (construcción rápida). La disipación de las presiones del agua libre y el equilibrio entre micro y macroestructuras se producen de una manera muy lenta, lo que impediría usar el relleno para cimentar estructuras de pequeña rigidez hasta transcurridos 6.5 años. En la tabla 4.8 se comparan los tiempos que han de transcurrir tras finalizar la construcción del relleno para que el asiento sea menor que el prescrito por la norma, 50 mm y 25 mm.

	$t_c(\text{day})$	m)	$\Delta\delta(\text{cm})$
S0	145	70,9	6,8
S1	40	70,9	6,9
S2	20	70,7	7,1
S3	8	70,3	7,6
S0 SAT	145	0,5	5,9
S2 SAT	20	0,1	55,3

Tabla 4.7. Asientos finales para las estrategias de construcción de rellenos de 16m y para las estrategias S0 y S2 en condiciones saturadas.

Estrategia	t5 (días)	t2.5 (días)
S0	166	172
S1	44	49
S2	23	28
S3	11	15

Tabla 4.8. Tiempo que ha de transcurrir para que el asiento sea permitido

4.5 USO DE LOS SERRINES COMO BARRERAS IMPERMEABLES.

La permeabilidad de un material es un parámetro crítico en relación con el comportamiento en obras de tierra. En nuestro estudio se ha determinado el valor de la permeabilidad saturada de los serrines de granito a través de aproximaciones teóricas (granulometría) y métodos experimentales (edómetros).

La distribución granulométrica permite realizar unos cálculos referidos al comportamiento hidráulico de materiales granulares. En este sentido, las aproximaciones más frecuentemente empleadas son la de Hazen (1892) y la ecuación de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). La ecuación de Hazen se expresa de forma general a través de la siguiente fórmula:

$$k = C_e D_e^2$$

en la que k representa el coeficiente de permeabilidad (m/s), C_e una constante y D_e el tamaño de grano efectivo, expresado en mm. La constante C_e incorpora aspectos tales como la forma de los poros en la dirección del flujo y el propio valor de la porosidad. De acuerdo con Hazen (1892) el diámetro D_{10} suele controlar la permeabilidad de un suelo granular y, de acuerdo con el mismo autor, para materiales arenosos, el valor recomendado para C_e es 0,01

La fórmula de Hazen permite aproximar el valor de la permeabilidad de un suelo granular con una precisión de ± 2 órdenes de magnitud. (Figura 4.11).

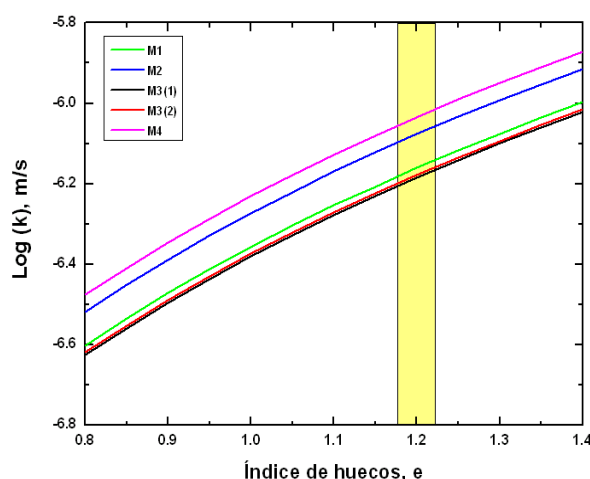


Figura 4.11. Variación del coeficiente de permeabilidad (m/s) de los serrines de granito en relación con el índice de huecos, de acuerdo con la ecuación de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). Las muestras M1, M2, M3(1) y M3(2) corresponden a serrines de telar mientras que la M4 es un serrín de corte con disco. La banda tramada en amarillo corresponde al valor medio del índice de huecos bajo condiciones de compactación Próctor normal

Por otro lado, la ecuación de Kozeny-Carman tiene la forma:

$$k = \frac{\gamma_w}{5f\eta S^2} \cdot \frac{e^3}{1+e}$$

En dicha expresión γ_w , y η representan el peso específico del agua y su viscosidad dinámica, e es el índice de huecos, f un factor de forma (que toma los valores de 1.1, 1.25 y 1.4 para granos redondeados, sub-redondeados y angulosos, respectivamente) y S la superficie específica expresada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{6}{\sqrt{d_{\max} d_{\min}}}$$

siendo d_{\max} y d_{\min} el tamaño de grano máximo y mínimo, respectivamente. En nuestro cálculo hemos empleado el factor de forma igual a 1,25 y los resultados, proyectados en función del índice de huecos, se presentan en la figura 11.

El valor de la conductividad hidráulica calculada de acuerdo con la fórmula de Hazen es $\sim 2,6 \times 10^{-8}$ m/s mientras que, de acuerdo con la de Kozeny-Carman es $\sim 6,3 \times 10^{-7}$. Ambos valores contrastan razonablemente bien con los obtenidos en la caracterización hidrodinámica de los serrines, como veremos posteriormente. Esto, a primera vista, puede parecer sorprendente puesto que ambas fórmulas reflejan el comportamiento de materiales

de granulometría más gruesa (entre arena fina y grava, de acuerdo con Freeze y Cherry, 1979) y uniforme. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los serrines de granito están formados mayoritariamente por partículas subangulares de tendencia equidimensional. Ello les diferencia de los “suelos” convencionales en los que, a igualdad de tamaño de grano, la mineralogía arcillosa predominante determina que sus granos sean morfológicamente muy diferentes.

En todo caso, con estas ecuaciones, se obtiene una estimación grosera de algunas de las características hidráulicas del serrín que se conocerán con mayor exactitud mediante la aplicación de otros ensayos. Para estos materiales, silt loam, suele asociarse una permeabilidad saturada próxima a $9,39 \times 10^{-7} \text{m/s}$, consistente con los valores antes expuestos (Meyer et al., 1999).

Aunque los resultados de estas aproximaciones teóricas son congruentes entre sí, es preferible obtener datos experimentales, en este caso a partir de los edómetros.

Los ensayos edométricos se realizan bajo condiciones saturadas y en la interpretación de las curvas de consolidación primaria es posible calcular el valor de la conductividad saturada en el sentido vertical del material, k_v , teniendo en cuenta que:

$$k_v = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{E_m}$$

En la que C_v , E_m y γ_w representan el coeficiente de consolidación, el módulo edométrico ($\Delta\sigma_v/\Delta\varepsilon_v$) y el peso específico del agua, respectivamente.

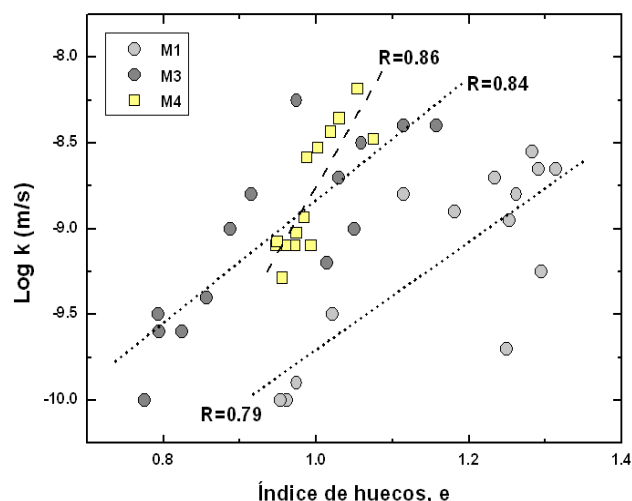


Figura 4.12. Variación del coeficiente de permeabilidad, k , respecto del índice de poros de acuerdo con los ensayos edométricos realizados. Las líneas representan ajustes lineales a los datos de cada una de las muestras ensayadas y se acompañan del correspondiente coeficiente de correlación. Las muestras M1 y M3 corresponden a serrines de telar mientras que la M4 procede de discos de corte

En la figura 4.12 se han proyectado las permeabilidades estimadas en función del valor del índice de poros, e . En la gráfica se ha representado también una serie de líneas de tendencia exponencial (líneas discontinuas), para las que se han obtenido unos coeficientes de correlación, R , de 0,79 (M1), 0,84 (M2) y 0,86 (M4). Resulta interesante comprobar, además, que las líneas de tendencia de los serrines de corte con telar (muestras M1, M2 y M3) presentan pendientes subparalelas. Ello constituye una constatación de que, al igual que sucede con los índices de compresión e hinchamiento (C_c y C_s , respectivamente) el comportamiento hidráulico de los serrines producto de corte con disco (M4) es sensiblemente diferente.

En marzo del año 2001 una empresa asociada a la Asociación Galega de Graniteiros encargó la realización de unos ensayos de permeabilidad bajo carga constante a un laboratorio especializado de control geotécnico. Las muestras ensayadas se corresponden con nuestra denominación M1. La tabla 4.9 resume los resultados obtenidos:

Muestra	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	Log k (m/s)
1	1,33	39,2	-8,16
2	1,11	52,7	-8,26
3	1,13	51,5	-8,42

Tabla 4.9. Conductividades hidráulicas medidas en tres muestras tipo M1, de acuerdo con determinaciones realizadas por encargo de la AGG mediante la aplicación de la técnica del permeámetro de carga constante

Los valores de permeabilidad obtenidos permiten establecer la idoneidad de los serrines de granito como material para impermeabilización y sellado, de acuerdo con el RD 1481/2001, de de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (Ministerio de Medio Ambiente, 2001). De acuerdo con lo establecido ahí y los valores de permeabilidad calculados podemos establecer que los serrines de corte de granito, una vez efectuada una adecuada compactación, cumplirían con los requisitos exigidos para las capas de protección y sellado o recubrimiento de diversos tipos de vertederos. (Figura 4.13).

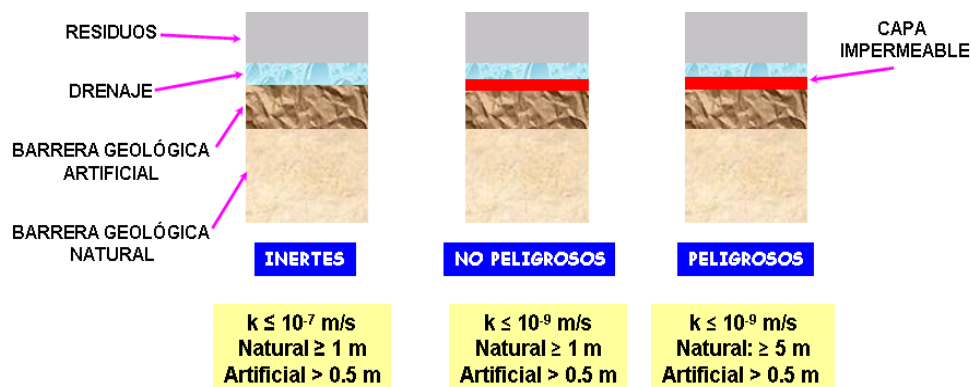


Figura 4.13. Criterios requeridos para las barreras de impermeabilización para vertederos de residuos de distinto tipo, de acuerdo con lo establecido en el R.D: 1481/2001

5 CONCLUSIONES

Con la caracterización básica se han podido establecer los parámetros fundamentales que rigen su comportamiento. Los serrines de granito son material de composición granítica, tamaño de grano fino y con baja plasticidad y sin tendencia a la expansividad ni a la corrosión de estructuras de hormigón.

Es importante señalar cuál es la situación legal de los granitos dentro de las diversas normativas de obras y residuos:

1) El RD 1481/2001, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, incluiría los serrines como materiales aptos tras ser compactados para las capas de protección y sellado

2) Según el PG-3, para obras de carreteras y puentes, serían materiales marginales según su plasticidad aunque si se ajustan a las condiciones granulométricas para el relleno de terraplenes

3) Según la ITR/01.0/04, de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia, los residuos de serrines son considerados como no peligrosos inertes para determinados usos. En cuanto a la estabilidad de taludes, se ha comprobado mediante una modelización cuidadosa que no presentan problemas al respecto, situándose dentro de los valores de factor de seguridad estipulados por la legislación vigente.

Su uso en firmes y explanadas de viales también ha sido modelizado, obteniendo unos resultados esperanzadores de cara al uso masivo de este material. Serían materiales marginales que podrían ser mejorados con cementos, geotextiles o una eficiente compactación.

No obstante, el simple hecho de que los materiales en cuestión sean adecuados para diversas aplicaciones no constituye una garantía de solución suficiente respecto del

problema de su gestión ya que la implementación de tales soluciones debe ser a la vez viable desde los puntos de vista técnico y económico.

A continuación se resumen ordenadamente las conclusiones más destacables de esta parte de nuestro estudio:

- A tenor de los experimentos realizados, los serrines de granito son material de composición granítica, tamaño de grano fino y con baja plasticidad. Su identificación de acuerdo con el esquema del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es la ML.
- La mineralogía de los serrines está constituida mayoritariamente por cuarzo, microclina, plagioclasa, biotita, moscovita y clorita) así como otros minerales secundarios, formados durante el secado y carbonatación de los serrines (calcita) o bien como producto de la oxidación de la granalla y virutas de fleje (*green rust*).
- La superficie específica BET de los serrines es significativamente inferior a la que se observa en materiales naturales de igual tamaño de grano. En realidad, los serrines están constituidos por partículas minerales que, en su mayoría, no pertenecen a los minerales de la arcilla. Ello implica importantes diferencias en cuanto al comportamiento que debiéramos esperar si se atiende sólo a su distribución granulométrica. Asimismo, la caracterización realizada permite establecer que se trata de un material sin tendencia a la expansividad.
- La densidad de las partículas sólidas de los serrines de telar presenta un valor próximo a 3,2 Mg/m³, muy por encima del valor esperable a priori para una roca ígnea clásica o un suelo. No obstante se debe considerar que a los serrines de granalla se incorpora granalla y virutas de los flejes, ambas de acero ($\rho \approx 7,87 \text{ Mg/m}^3$)

- La densidad seca óptima para a una energía de compactación Próctor normal se sitúa en torno a los 1,41 Mg/m³, correspondiente a un contenido de humedad ligeramente superior al 33 %. En el caso del Próctor modificado, la densidad seca óptima es cercana a 1.72 Mg/m³, correspondiente a una humedad del 16 %.
- Para una energía de compactación equivalente a la de un Próctor normal ($\rho_d \sim 1,41 \text{ Mg/m}^3$ y $\omega(\%) \sim 33$), el índice CBR sería ligeramente superior a 10 %, lo que es característico de explanadas poco deformables (tipo E2). Por otro lado, para una energía de compactación equivalente al Próctor modificado ($\rho_d \sim 1,76 \text{ Mg/m}^3$ y $\omega(\%) \sim 17$) el índice CBR estaría alrededor de 60, propio de las explanadas tipo E3 (muy poco deformables)
- La exposición al aire de los serrines en capas delgadas húmedas puede conducir a la oxidación de la granalla que contiene y dar lugar al desarrollo de costras de oxidación (*hardpans*). Cuando éstas se forman dentro de los propios serrines, mejoran su resistencia debido a que presentan mayor cohesión y su rugosidad superficial es muy alta.
- Cuando se forman costras superficiales, éstas contribuyen a impermeabilizar la superficie, limitando la infiltración de agua y mejorando la resistencia a la erosión de los serrines expuestos en taludes por acción de la escorrentía superficial.
- Puesto que la formación de las costras implica un aumento de volumen, existe la posibilidad de que en obras de tierra en las que se empleen serrines se produzcan modificaciones de geometría indeseadas (p. ej. levantamiento de capas compactadas) o incluso que se desarrollen caminos para el flujo preferente del agua. No obstante las observaciones realizadas indican que tales fenómenos tendrían lugar, tan solo, en la inmediata vecindad de la superficie.

- Los valores de permeabilidad obtenidos permiten establecer la idoneidad de los serrines de granito como material para impermeabilización y sellado, de acuerdo con el RD 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (Ministerio de Medio Ambiente, 2001). De acuerdo con lo establecido ahí y los valores de permeabilidad calculados se puede establecer que los serrines de corte de granito, una vez efectuada una adecuada compactación, cumplirían con los requisitos exigidos para las capas de protección y sellado o recubrimiento de vertederos.
- El ángulo de rozamiento máximo es menor en el caso de las muestras de serrín de corte con disco si bien, el valor promedio de 34° podría ser tomado como representativo de todas ellas (serrines de telar y de corte con disco). Por otro lado, los valores de cohesión son muy bajos (~ 21 kPa, en promedio), tal y como corresponde a un material constituido por partículas sueltas no cementadas. Asimismo, los ensayos no han permitido establecer diferencias significativas entre los ángulos de rozamiento máximo y residual.
- El valor medio del ángulo de rozamiento de los serrines obtenidos compara muy bien con los valores de resistencia al corte drenada de minerales que típicamente componen los suelos granulares.
- Los serrines de granito se adscriben, debido a sus características granulométricas, a la categoría de suelos tolerables, lo cual limita, a priori, su uso al núcleo o cimiento de terraplenes. No obstante, los índices CBR obtenidos (≥ 10) permitirían su uso en capas de coronación. En cuanto a su uso para espaldones, habría que tener en cuenta las características específicas de cada proyecto, aunque cabe prever un buen comportamiento.
- El uso de serrines de granito en terraplenes en distintas obras debe ser analizado con mayor detalle. No obstante, no se descarta su uso en el núcleo de terraplenes. No obstante, su empleo en sub-base no sería apropiado dada su escasa capacidad drenante. En cuanto a la capa de forma,

hay que determinar su potencial deformabilidad como resultado de las reacciones de oxidación de la granalla y las expansiones asociadas.

A tenor de los resultados del capítulo anterior, los serrines de granito son un buen material de préstamo para la construcción de rellenos. También parece razonable usarlos como material de terraplén de obras lineales, ya que pueden ejecutarse terraplenes de altura moderada con asientos reducidos y sin limitaciones en el proceso constructivo. Sin embargo sería necesario utilizar aditivos estabilizantes en la zona final de la explanada para que las deflexiones generadas por cargas en superficie sean pequeñas.

No obstante estas conclusiones se basan en hipótesis que hay que verificar:

- Debe comprobarse la preconsolidación que generará la compactación ejecutada en obra, ya que este parámetro determinará la deformabilidad de los rellenos.
- Debe asignarse una rigidez a los serrines en superficie mediante la realización de ensayos de placa de carga. Este parámetro condicionará la respuesta de los serrines ante cargas locales de uso.
- Debe verificarse el modelo del flujo no saturado, aunque el modelo adoptado basado en la experiencia existente respecto a los **silt loam** (USDA Soil Survey Staff, 1994) es un buen punto de partida.
- Debe verificarse el modelo de deformación de los serrines en condiciones similares a las de campo, tanto para la consolidación primaria como para la secundaria.

En todo caso, pese a lo necesario de este trabajo experimental para tener unas bases más sólidas para evaluar el comportamiento de este material como relleno y terraplén, los análisis realizados permiten ser optimistas respecto a la viabilidad de estas aplicaciones.

- De acuerdo con lo comentado en relación con los terraplenes viales, los serrines de granito son susceptibles de empleo como materiales tolerables en rellenos localizados.
- La granulometría de los serrines de granito determina que la fracción que pasa a través del tamiz 0.080 UNE sea del orden del 80 %. Dicho valor es muy superior al exigido para un recebo para macadam aceptable. Por ello, no es un material adecuado para tal fin.
- La experiencia local en la zona de O Porriño con serrines de granito sugiere que pueden ser buenos materiales para estabilizar y mejorar suelos, desde el punto de vista geotécnico.

Por otro lado, este estudio ha dado lugar a distintos artículos y comunicaciones científicas en las que se exponen las conclusiones citadas anteriormente. He aquí una lista de estos trabajos:

“Caracterización de las propiedades morfológicas, físico-químicas y geotécnicas básicas de los serrines de corte de granito de O Porriño, Pontevedra”

AUTORES: V. Barrientos, R. Juncosa, R., A. Vázquez, J. Delgado, V. Navarro

Simposio sobre Geotecnia Ambiental y Mejora del Terreno

“Geochemical assessment of the contaminant potencial of granite fines produced during sawing and related processes associated to the dimension stone industry”

AUTORES: J. Delgado, A. Vázquez, R. Juncosa, R., V. Barrientos (E.T.S. Ingenieros de Caminos, Universidad de La Coruña)

Journal of geochemical exploration

“Final disposal of the waste associated to the oil spill of the tanker Prestige through its stabilization with quicklime and granite fines”

AUTORES: D.Carro, J. Delgado, A. Vázquez, V. Barrientos, R. Juncosa

Proceedings of the International Conference on Energy, Environment and Disasters. (INCEED 2005)

“Fabricación de mortero y hormigón a partir el reciclaje del fuel del Prestige”

AUTORES: D.Carro, B. Fonteboa, I. Martínez, C. Vázquez, F. Martínez, V. Barrientos, A. Vázquez, R. Juncosa, J. Delgado, P. Pardo, M. Barra

Proceedings del III Congreso de ACHE de Puentes y estructuras

“Valoración dos serríns de granito: Comportamiento xeotécnico dos finos de corte de granito en relación coa súa aplicación en construcións de enxeñería civil”

AUTORES: J. Delgado, R. Juncosa, V. Barrientos, A. Vázquez

Informe final proyecto PGIDT03REM01E

“Estudio de las propiedades morfológicas, físico-químicas y gewotécnicas básicas de los serrines de corte de granito de O Porriño, Pontevedra”

AUTORES: J. Delgado, R. Juncosa, V. Barrientos, A. Vázquez

Informe final proyecto REN2001-0832-C02-01/TECNO

6 RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS

6.1 LISTADO DE FIGURAS

6.1.1 INTRODUCCIÓN

Figura 1.3. Destinos del granito gallego. (Fuente A.G.G)

Figura 1.4. Granito elaborado en España (2004) en porcentaje por comunidades. Extraído del Boletín sectorial del FEPN 2004

Figura 1.3. Panorámica de las canteras de O Porriño

6.1.2 FUNDAMENTOS.

Figura 1.1. Bloque extraído de cantera antes de ser cortado en telar

Figura 2.2. Batería de telares

Figura 2.3. Esquema general de un telar de corte de bloques de granito

Figura 2.4. Tanque bajo telar para recirculación de lodos

Figura 2.5. Esquema de filtro-prensa con sus componentes principales

Figura 2.6. Acopio de serrines a la salida de los filtros-prensa de una explotación de O Porriño

Figura 2.7. Taludes con bermas en un vertedero controlado de serrines.

Figura 2.8. Granalla metálica (Cortesía Fabio Murga)

Figura 2.9. Mapa geológico del NO del Macizo Ibérico, con los afloramientos de los distintos plutones. Tomado del CDRom de anexos de Geología de España, 2003

Figura 2.10. Composición química de algunas variedades.

Figura 2.11. Mapa geológico de la provincia de Pontevedra. (Fuente: Carames, 1983)

Figura 2.12. Esquema geológico de la zona de O Porriño a lo largo del cauce del río Louro. (Fuente: Carames, 1983)

Figura 2.13. Mapa de emplazamiento de plutones en Galicia. (Fuente: Bellido, 2005)

6.1.3 CARACTERÍSTICAS HIDROGEO MECÁNICAS DE LOS SERRINES DE GRANITO.

Figura 3.1. Vista general de los serrines de granito a la salida de los filtros-prensa (M3). Las tortas que se observan en primer plano tienen unas dimensiones aproximadas de 40x40 cm. Empresa de transformación de Atios (Pontevedra)

Figura 3.2. Costra de óxihidróxidos de Fe formada a partir de la oxidación de la granalla presente en los serrines cuando estos son expuestos a la atmósfera., manteniendo altos contenidos de humedad.

Figura 3.3. Aspecto al microscopio de las costras, formadas por minerales de neoformación en cristales con aspecto tabular o hexagonal correspondientes a óxidos e hidróxidos de Fe. (McGill et al., 1976; Roh et al., 2000; Legrand et al., 2001; Géhin et al., 2002; Peulon et al., 2003).

Figura 3.4. Comparación entre componentes principales de las muestras. La muestra M3a tiene el mismo origen que M3b pero con más tiempo de exposición al aire. Datos tomados de Krauskopf y Bird.

Figura 3.5. Comparativa entre las composiciones de las muestras y rocas ígneas graníticas. La muestra M3a tiene el mismo origen que M3b pero con más tiempo de exposición al aire. Datos extraídos de Krauskopf y Bird.

Figura 3.6. Concentración de los elementos mayoritarios en los serrines de la parte superior del sondeo. (Vázquez, 2006)

Figura 3.7. Concentración de los elementos mayoritarios en los serrines de la parte inferior del sondeo. (Vázquez, 2006)

Figura 3.8. Histograma de humedades

Figura 3.9. Histogramas de las densidades. De izquierda a derecha en la parte superior, M1 y M2. En la parte inferior, M3 y M4.

Figura 3.10. Distribución de las densidades secas de las muestras

Figura 3.11. Variación de la densidad de las partículas sólidas respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea horizontal (NF) indica la posición del nivel freático en el momento de realizar los sondeos descritos en este estudio. La banda tramada en color gris se corresponde con el valor medio de la densidad de las partículas sólidas de los serrines de telar, a su salida de los filtros-prensa. Los rombos corresponden a muestras del sondeo y los triángulos a las muestras inalteradas.

Figura 3.12. Variación de la densidad seca respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea horizontal (NF) indica la posición del nivel freático en el momento de realizar los sondeos descritos en este estudio. Las bandas tramadas corresponden al rango medio de densidad seca obtenido para los ensayos de compactación tipo Próctor normal y modificado.

Figura 3.13. Análisis granulométrico (% acumulado) de las muestras de serrín de granito de corte con telar (M1, M2, M3(1) y M3(2)) así como de corte con disco (M4). Los recuadros situados sobre el gráfico se corresponden con el límite de tamaño de grano de partículas tipo arcilla (2 mm) así como el rango de diámetros para partículas tipo limo, de acuerdo con distintas referencias. ISSS: Internacional Society of Soil Science; USDA: U.S. Department of Agriculture; ASTM: American Society for the Testing of Materials

Figura 3.14. Análisis granulométrico (% distribuido) de las muestras de serrín de granito de corte con telar (M1, M2, M3(1) y M3(2)), así como de corte con disco (M4). Se observa la bimodalidad de los serrines de corte con disco.

Figura 3.15. Clasificación textural de los serrines de granito, de acuerdo con el esquema de U.S. Department of Agriculture. De acuerdo con la misma, los serrines serían unos limos arcillosos (silt loam). Los círculos de color amarillo corresponden a serrines de telar mientras que el azul es un serrín de corte con disco

Figura 3.16 . Análisis granulométrico (curvas de porcentaje acumulado) de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). El análisis evidencia un cierto incremento del tamaño medio de las partículas que conforman los serrines a medida que la profundidad del relleno es mayor

Figura 3.17 . Variación del coeficiente de curvatura (CC) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea amarilla marca el límite de los 7m.

Figura 3.18 . Variación del coeficiente de uniformidad (CU) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). La línea amarilla marca el límite de los 7m.

Figura 3.19 . Distribución granulométrica de las partículas gruesas del sondeo en relación a la profundidad. La línea azul marca el límite de los 7m.

Figura 3.20 . Gráfico de Casagrande y proyección de los serrines de telar y de corte con disco (ambos valores se superponen)

Figura 3.21 . Variación de los límites de Atterberg (límite líquido, WL y límite plástico, WP) respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño)

Figura 3.22 . Variación del índice de plasticidad respecto de la profundidad para muestras de serrines de granito procedentes del testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño)

Figura 3.23 . Gráfico de Casagrande para la clasificación de los serrines de granito del sondeo de O Cerquido (Porriño). Por comparación también se muestran los valores obtenidos para los serrines de telar muestreados en filtros-prensa.

Figura 3.24 . Resultado de los ensayos de compactación tipo Próctor normal y modificado realizados sobre la muestra M1. En los dos casos, la curva continua representa un ajuste polinómico (3er grado) mientras que las líneas punteadas representan su banda de confianza (95 %). ZAV: Línea de saturación; 90 y 80%: líneas de saturación del 90 y 80 %, respectivamente

Figura 3.25 . Valores de densidad seca obtenidos para las muestras del sondeo de O Cerquido (Porriño), a distintas profundidades. Los puntos rojos corresponden a dos de las muestras inalteradas obtenidas. Es posible que los contenidos de humedad determinados en el laboratorio sean inferiores a los in situ.

Figura 3.26 . Valores de densidad seca respecto del contenido de humedad obtenidos para las muestras del sondeo de O Cerquido (Porriño), a distintas profundidades. La estrella de color azul muestra las condiciones óptimas a un ensayo Próctor modificado ($\pm 10\%$) mientras que la roja se corresponde con el óptimo Próctor normal ($\pm 10\%$). Las líneas punteadas representan isopletas de saturación mientras que las discontinuas son isopícnas aparentes.

Figura 3.27 . Variación del índice CBR con la densidad seca de probetas no saturadas de serrines de granito tipo M1 (serrines de telar)

Figura 3.28 . Curva asiento-tiempo para M1

Figura 3.29 . Curva asiento-tiempo para M2

Figura 3.30 . Curva asiento-tiempo para M3

Figura 3.31 . Curva asiento-tiempo para M4

Figura 3.32 . Curvas edométricas de la muestra M1

Figura 3.33 . Curvas edométricas de la muestra M2

Figura 3.34 . Curvas edométricas de la muestra M3

Figura 3.35. Curvas edométricas de la muestra M4

Figura 3.36 Incremento de deformación, $\Delta\epsilon_v$, asociado a cada uno de los incrementos de carga, $\Delta\sigma_v$, aplicados en los ensayos edométricos realizados

Figura 3.37. Distribución de valores de C^* para M1 tras aplicar modelo de Terzaghi

Figura 3.38. Distribución de valores de C para M2 tras aplicar modelo de Terzaghi.

Figura 3.39. Distribución de valores de C^* para M3 tras aplicar modelo de Terzaghi

Figura 3.40. Distribución de valores de C^* para M4 tras aplicar modelo de Terzaghi

Figura 3.41. Procedimiento de cálculo seguido para identificar la consolidación primaria y secundaria en cada escalón de análisis

Figura 3.42. Frecuencia porcentual del valor de la consolidación secundaria identificada, δ_2 , con respecto el asiento total, δ_{TOT} .

Figura 3.43. Curvas asiento-tiempo correspondientes a distintos escalones de carga. M1, M2, M3 y M4 son las distintas muestras y los números que acompañan cada designación indican la carga ejercida en cada uno de los escalones analizados. Las letras c, d y r indican si se trata de un escalón de carga, descarga o recarga, respectivamente. Los indicadores T1, T2, T3, T4 y T5 hacen referencia a la trayectoria del ensayo tal y como se ha definido en la Tabla 14. Por último, la letra final define si se trata de puntos experimentales (t) o bien resultante de la aplicación del modelo teórico (m)

Figura 3.44. Distribución de valores de C^* para M1 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

Figura 3.45. Distribución de valores de C^* para M2 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

Figura 3.46. Distribución de valores de C^* para M3 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

Figura 3.47. Distribución de valores de C^* para M4 tras aplicar modelo de Navarro y Alonso

Figura 3.48. Variación de la tensión efectiva horizontal respecto de la vertical en un ensayo edométrico realizado sobre una muestra tipo M1 (serrín de telar). Los círculos de color verde indican etapas de descarga. K_0 es el coeficiente de empuje en reposo. La línea discontinua representa el ajuste lineal y las líneas continuas que rodean a esta última corresponde a su banda de confianza (95 %)

Figura 3.49. Variación de la tensión efectiva horizontal respecto de la vertical en un ensayo edométrico realizado sobre una muestra M1. Los círculos verdes indican etapas de descarga. K_0 es el coeficiente de empuje en reposo.

Figura 3.50. Resultados de los ensayos de corte directo realizados sobre las muestras M1, M2, M3 (serrines de telar) y M4 (corte con disco). Las tensiones normales aplicadas fueron 100, 200 y 300 kPa.

Figura 3.51. Comparación de la deformación vertical y la tensión de corte respecto de la deformación horizontal en un ensayo de corte directo sobre una muestra tipo M3, con una tensión vertical de 200 kPa

Figura 3.52. Deformación vertical respecto de la horizontal para diversas muestras tipo M1 (serrín de telar) densificadas con distinta energía de compactación. Se presentan resultados para tensiones normales de 100, 200 y 300 kPa. Con una energía de compactación equivalente a 15 golpes, todas las muestras son contractantes. Para 60 golpes, tan solo la muestra ensayada a menor carga normal es dilatante, siendo las otras dos (200 y 300 kPa) contractantes. Para 30 golpes, el comportamiento es complejo.

Figura 3.53. Tensión de corte respecto de la deformación horizontal para distintos valores de tensión normal y grado de densificación. Las muestras ensayadas han sido de tipo M1 (serrín de telar)

Figura 3.54. Tensiones verticales respecto de corte correspondientes a los distintos ensayos de resistencia al corte directo realizados. La línea discontinua representa un ajuste lineal a los datos experimentales relativos a serrines de telar. El valor del ángulo de rozamiento, cohesión (c), y coeficiente de correlación (R), se indica en la misma figura. Las líneas finas continuas a ambos lados de la recta de regresión representan su banda de confianza del 95%. Las muestras M1, M2 y M3 corresponden a serrines de telar mientras que la M4 son serrines de disco de corte.

Figura 3.55. Comparación entre la curva de ajuste a muestras sin pre-compactación (línea discontinua) respecto de probetas densificadas por compactación. Observar el buen ajuste entre probetas compactadas a 15 golpes y la recta de regresión basada en probetas no compactadas

Figura 3.56. Valores típicos de diversos materiales para IP y ϕ . Extraída de Terzaghi y Peck

Figura 3.57. Valores de ángulo de rozamiento y de cohesión para las muestras de telar.

Figura 3.58. Valores de tensión máxima de las muestras de telar.

Figura 3.59. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 1 (MI-1; cota = 5.675 m) del sondeo de O Cerquido

Figura 3.60. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 2 (MI-2; cota = 9.375 m) del sondeo de O Cerquido

Figura 3.61. Resultado de los ensayos de corte directo realizados sobre la muestra inalterada 3 (MI-3; cota = 17.275 m) del sondeo de O Cerquido

3.62. Variación del número de golpes con la profundidad para los penetrómetros 1 y 2.

3.63. Variación del número de golpes con la profundidad para los penetrómetros 3 y 4.

3.64. Variación del número de golpes con la profundidad para el penetrómetro 5.

Figura 3.65. Esquema general de un ensayo hidráulico tipo Lefranc e identificación de los parámetros de interés

Figura 3.66. Descensos de nivel observados en el sondeo en función del tiempo a lo largo del desarrollo del ensayo Lefranc

Figura 3.67. Variación de la superficie específica de los serrines de granito en función de la profundidad del sondeo. A efectos comparativos se presenta el % de material magnético recuperado a cada profundidad estudiada. Observar la razonable concordancia entre los mayores valores de superficie específica y la proporción de material férreo. La banda horizontal amarilla separa las dos secciones del sondeo. (Vázquez, 2006).

6.1.4 APLICACIÓN DE LOS SERRINES EN TERRAPLENES, RELLENOS Y BARRERAS.

Figura 4.1a. Relleno

Figura 4.1b. Talud con rotura.

Figura 4.2. Ábaco de Hoek correspondiente al caso evaluado. (Nº 5). (Tomado de Hoek y Bray, 1981)

Figura 4.3. Esquema general de un terraplén de carretera

Figura 4.4. Valores obtenidos de E en la simulación junto a la profundidad considerada de terraplén uniforme de serrines de granito.

Figura 4.5. Valores de los índices característicos de la deformación macroestructural (C_c ó C_s) asumiendo las leyes $\Delta e_M \leftrightarrow \Delta \log \sigma'_v$. Los valores están definidos para cada escalón de carga.

Figura 4.6. Curvas de Van Genuchten para los serrines de granito. (Vázquez, 2006)

Figura 4.7. Comparación de la consolidación de una probeta de 20 cm a condiciones iniciales Proctor normal realizada por simulación y experimentalmente.

Figura 4.8. Evolución del asiento para la estrategia S0. El relleno de 16m se marca con un círculo, el de 8 m con un cuadrado, el de 4m con un triángulo y el de 2m con un rombo.

Figura 4.9. Variación de los esfuerzos de hinchamiento π y π_B (curvas P_i y $P_i B$), de la succión s (curva s_c) y del esfuerzo vertical total (curva tsV) a $z=0$. Estas curvas son relativas a la simulación de la construcción de un relleno de 16 m siguiendo S0. Las curvas OEDM perte-necen a la simulación del ensayo edométrico.

Figura 4.10. Evolución temporal de los asientos según cada una de las estrategias seguidas. S0 SAT y S2 SAT se han simulado en condiciones saturadas. S0 SAT no micro sólo considera la consolidación primaria.

Figura 4.11. Variación del coeficiente de permeabilidad (m/s) de los serrines de granito en relación con el índice de huecos, de acuerdo con la ecuación de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). Las muestras M1, M2, M3(1) y M3(2) corresponden a serrines de telar mientras que la M4 es un serrín de corte con disco. La banda tramada en amarillo corresponde al valor medio del índice de huecos bajo condiciones de compactación Proctor normal

Figura 4.12. Variación del coeficiente de permeabilidad, k , respecto del índice de poros de acuerdo con los ensayos edométricos realizados. Las líneas representan ajustes lineales a los datos de cada una de las muestras ensayadas y se acompañan del correspondiente coeficiente de correlación. Las muestras M1 y M3 corresponden a serrines de telar mientras que la M4 procede de discos de corte

Figura 4.13. Criterios requeridos para las barreras de impermeabilización para vertederos de residuos de distinto tipo, de acuerdo con lo establecido en el R.D: 1481/2001

6.2 LISTADO DE TABLAS

6.2.1 FUNDAMENTOS.

Tabla 2.1. Proporciones promedio de agua, cal, granalla y polvo mineral presente en los serrines de granito de telares españoles. Fuente: ANGE (2002)

Tabla 2.2. Valores caracterización de algunas variedades gallegas. (Fuente: A.G.G.)

Tabla 2.3. Aspecto macroscópico de algunas variedades de granito explotados en O Porriño (A.G.G.)

Tabla 2.4. Composición química de las principales variedades de O Porriño (Fuente)

6.2.2 CARACTERÍSTICAS HIDROGEO MECÁNICAS DE LOS SERRINES DE GRANITO.

Tabla 3.1. Resumen de las muestras empleadas en los distintos ensayos y determinaciones del presente estudio. M1 es la muestra de referencia.

Tabla 3.2. Resumen de los ensayos y determinaciones realizadas en el contexto del presente estudio (en negrita) y de la tesis de Ana Vázquez (2006)

Tabla 3.3. Resumen de los ensayos de campo realizados en el relleno de O Cerquido (Porriño)

Tabla 3.4. Composición química (% en peso) de los elementos mayores y algunos elementos traza de los serrines de granito determinados mediante fluorescencia de rayos X. Cinorg: carbono inorgánico; PPC: pérdida por calcinación; n.d: no determinado; M1, M2, M3: serrines de telar; M4: serrines de disco; RP: Rosa Porriño; HC: Hidrato de cal

Tabla 3.5. Determinación de humedad en muestra tipo

Tabla 3.6. Resultados estadísticos de las determinaciones de humedad

Tabla 3.7. Resumen de densidades de las partículas sólidas en g/cm³

Tabla 3.8. Densidad seca de las muestras

Tabla 3.9. Descriptores granulométricos de los serrines de corte de granito. CU: coeficiente de uniformidad; CC: coeficiente de curvatura; D10, D30 y D60 corresponden al diámetro más allá del cual pasa el 10, 30 y 60 % del material, respectivamente. Log kH y Log kK-C representan el valor del coeficiente de permeabilidad (m/s) calculado a partir de la fórmula de Hazen (1892) y la ecuación de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). En el primer caso, se tomó como diámetro representativo D10 y 0.01 para Ce. En el segundo caso, el índice de huecos es aproximadamente igual al del óptimo Próctor normal

Tabla 3.10. Límites de Atterberg e índices de consistencia de los serrines de granito caracterizados. ω_L : Límite líquido; ω_P : Límite plástico; IP: Índice plástico; IF: Índice de fluidez; A: actividad, de acuerdo con Skempton (1953)

Tabla 3.11. Propiedades geotécnicas básicas de las muestras analizadas en el testigo de sondeo de O Cerquido (Porriño). LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; IL: índice de fluidez; ρ_s : densidad de las partículas sólidas; ρ_{ap} : densidad aparente; ρ_d : densidad seca; γ_{ap} : peso específico aparente; σ_v : tensión vertical; u_z : empuje hidrostático; σ'_v : tensión vertical efectiva; n: porosidad; e: índice de poros; w(%): contenido de gravimétrico de agua; MI-1. MI-2 y MI-3: muestras

Tabla 3.12. Resultados de los 3 ensayos Proctor Normal. Los números en rojo indican el óptimo de humedad para cada máximo de densidad seca. El primer ensayo abarca un rango mayor de humedades ya que sirvió de referencia para acotar los ensayos posteriores.

Tabla 3.13. Resultados de los ensayos Proctor modificados. Los números en rojo indican la humedad óptima para cada máximo de densidad seca.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo C.B.R.

Tabla 3.15. Categorías de explanada, de acuerdo con el índice CBR

Tabla 3.16. Resumen de las trayectorias de carga y descarga (en cursiva)

Tabla 3.17. Descripción de los ensayos realizados con cada una de las muestras consideradas

Tabla 3.18. Parámetro de compresibilidad de la microestructura frente a la consolidación secundaria. CV(en %) constituye el coeficiente de variación. CC representa la curtosis de los datos asociados a cada distribución

Tabla 3.19. Parámetros de intercambio de masa entre la macro y microestructura en relación con la consolidación secundaria. CV (en %) constituye el coeficiente de variación. CC representa la curtosis de los datos asociados a cada distribución.

Tabla 3.20. Parámetros C_c identificados en escalón de carga. CV define el coeficiente de variación y CC el de curtosis.

Tabla 3.21. Parámetros C_s identificados. CV define el coeficiente de variación y CC el de curtosis

Tabla 3.22. Contenido de humedad de las muestras ensayadas a corte directo. M1(1), M1(2), M1(3), M2 y M3 son serrines de telar. M4 son serrines de discos de corte

Tabla 3.23. Valores de tensión de corte máxima (en kPa) para distintos valores de tensión vertical, σ_v de los serrines de granito ensayados. w (%) representa el contenido de humedad. M1, M2 y M3 serrines de telar. M4 serrines de corte con disco.

Tabla 3.24. Parámetros resistentes de los serrines de granito obtenidos a partir de los ensayos de corte directo. M1-15g y M1-30g hace referencia a muestras tipo M1 (serrines de telar) compactadas a 15 y 30 golpes, respectivamente

Tabla 3.25. Valores de tensión máxima de corte (en kPa) y parámetros de los ensayos de corte directo realizados con las muestras inalteradas procedentes del sondeo.

Tabla 3.26. Parámetros de las ecuaciones

Tabla 3.27. Correcciones y normalizaciones utilizadas.

6.2.3 APLICACIÓN DE LOS SERRINES EN TERRAPLENES, RELLENOS Y BARRERAS.

Tabla 4.1. Resumen de las características de los serrines de granito

Tabla 4.2. Resultados del ábaco. H es la altura del talud, i el ángulo del talud, c/H ($\tan\phi$) es una expresión que incluye la cohesión y ángulo de rozamiento del material y F es el factor de seguridad.

Tabla 4.3. Criterios establecidos por el PG-3 (artículo 330) en relación a las características que deben reunir los terraplenes para obras viales. Todos los datos en %. Notas: (a) incluyéndole yeso; (b) Si LL > 30, IP > 4; (c) Sales distintas al yeso. El contenido en yeso debe ser < 5%; (d) Si LL>40; (e) Si LL>90

Tabla 4.4 Módulo elástico equivalente obtenido para las explanadas contempladas en la Norma española 6.1 IC (Ministerio de Fomento, 2003), asumiendo el uso de serrines como sustituto de otros materiales marginales.

Tabla 4.5. Parámetros hidráulicos de los serrines

Tabla 4.6. Estrategias de ejecución de los rellenos. En cada caso se han colocado 10 tongadas de 20 cm y se ha tenido en cuenta la sobrecarga de 15 kPa.

Tabla 4.7. Asientos finales para las estrategias de construcción de rellenos de 16m y para las estrategias S0 y S2 en condiciones saturadas.

Tabla 4.8. Tiempo que ha de transcurrir para que el asiento sea permitido

Tabla 4.9. Conductividades hidráulicas medidas en tres muestras tipo M1, de acuerdo con determinaciones realizadas por encargo de la AGG mediante la aplicación de la técnica del permeámetro de carga constante

7 BIBLIOGRAFÍA

A.G.G. (1997). La piedra y su entorno: Galicia. Catálogo de variedades.

AGG, 2004. Documento interno, 9 pp.

Albarrán-Liso, C.; Jordán-Vidal, M.M.; Sanfeliu-Montolio, T.; & Liso-Rubio, M.J. (2006). "Alteration, evaluation and use of extremaduran granite residues". *Environmental Geology*. Vol 4. Num7. pp.1043-1050

Alonso, E. (2002). "Fill Dams", *Small Dams. Guidelines for construction and monitoring*. French Committee on Large Dams, Cemagref Editions.

Alonso, E.E., and V. Navarro, (2004). "Microstructural model for delayed deformation of clay: loading history effects". *Can. Geotech. J.*, 42(2), 381-392.

Alonso, E.E. y Navarro, V. (2005) Effect of loading history on secondary compression of clays. *Canadian Geotechnical Journal* (en revisión)

A.N.G.E. (2002). 5º seminario técnico del granito; Asociación Nacional de Graniteros Españoles; Bilbao

Atterberg, A, (1911). "Über die physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Tone" (On the investigation of the physical properties of soils and on the plasticity of clays), *Int. Mitt. für Bodenkunde*, 1, pp.10-43

Bakken, A.K.; Gautneb, H.; Sveistrup, T. Y Myhr, K. (2000) Crushed rock and mine tailings applied as K fertilizers on grassland; *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, p. 53-57

Bardet, J.P. (1997) *Experimental Soil Mechanics*. Ed. Prentice Hall; Upper Saddle River, New Jersey; 582 pp.

- Barral Silva, E.T.; Silva Hermo, B.; García-Rodeja, E., Vázquez Freire, N. “Reutilization of granite powder as an amendment and fertilizer for acids soils”. *Chemosphere* 61.pp 993-1002.
- Belikov, B.P; Zaleskkii, B.V.; Rozanov, Y.A.; Sanina, E.A. and Timchenko, I.P (1967). “Methods of studying the phisicomechanical properties of rocks”. *Physical and Mechanical Properties of rocks*. Israel Program for Scientific Translation: 1-58. Jerusalem
- Bell (1915): “The lateral pressure and resistance of clay, and the supporting power of clay foundations”. *Pro. Inst. Civil Eng.* 199, 233-272.
- Bellido, F; Monteserín, V; Gumiel; Ferrero, A; Baltuille, J.M y López, M:T. (2005): “Características petrológicas y geoquímicas de las principales variedades de granitos ornamentales del macizo de O Porriño (SO de Galicia)” *Boletín Geológico y Minero*, 116(4): 331-349
- Birch, F. (1966): Compressibility; Elastic constants. in "Handbook of physical constants", 97, *Geol. Soc. Am. Mem.*, 97-173
- Bishop, A.W. (1959). “The principle of effective stress”. *Tekn. Ukebl.* (1883). 106(39), 859-863.
- Bolland, M.D.A. y Baker, M.J. (2000) “Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia”; *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, p. 59-68
- Brell, J. (1972) *Estudio litoestratigráfico del terciario del oeste de Asturias y Galicia*. Tesis Universidad Complutense de Madrid. 341pp. Madrid
- Brooks, R.H., and Corey, A.T., 1964, *Hydraulic properties of porous media: Hydrology Papers*, Colorado State University, 24 p.

- Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculation from size distribution data. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 198: 71-78.
- Burmister, D.M. (1945a). "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I". J. Appl. Phys. 16(2), 89-94.
- Burmister, D.M. (1945b). "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. II". J. Appl. Phys. 16(3), 126-127.
- Burmister, D.M. (1945c). "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. III". J. Appl. Phys. 16(5), 296-302.
- CALTRANS. 1995. Trenching and shoring manual. Construction Manuals Serie. Division of Engineering Service. California Department of Transportation.
http://www.dot.ca.gov/hq/esc/construction/Manuals/TrenchingandShoring/ch6_surcharges.pdf
- Capdevila, R. Y Floor, P. (1970). Les Différents types de granties hercyniens et leur distribution dans le nord-ouest de l'Espagne. Bol. Geol. y Min. t. LXXXI-II-III.
- Carames, M; Galán, E; De Aza, S: (1983) "Contribución al conocimiento de los depósitos caoliníferos de Pontevedra" Cuadernos geológicos de Laxe" nº 4. Seminario Galego de Ciencias
- Carro, D.; Delgado, J.; Vázquez, A.; Barrientos, V.; Juncosa, R. (2005) "Final Disposal of the Wastes Associated to the Oil Spill of the Tanker Prestige through its Stabilization with Quicklime and Granite Fines". Congreso INCEED 2005
- Carro, D.; Fonteboa, B.G.; Martínez, I.; Vázquez, C.; Martínez, F.; Barrientos, V.; Vázquez, A. Juncosa, R.; Delgado, J.; Pardo, P.; Barra, M.; Vázquez E. (2005) "Fabricación de mortero y hormigón a partir del reciclaje del fuel del Prestige". Congreso ACHE 2005
- Carro, D; Martínez-Abella, F.; Pardo, P.; Vázquez, E.; Fonteboa, B.G. (2005) "Recycling of wastes associated with the Prestige oil spill through incorporation into cement based-mixtures". Congreso INCEED 2005

- Carsel R.F., y R.S. Parrish, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24:755-769.
- Casagrande, A., 1932, Research on the Atterberg limits of soils, *Public Roads*, Vol. 13, 121-130 & 136.
- Clark, S.P. (1966): "Handbook of Physical Constants". Geological Society of America.
- Collin, A. (1846): "Landslides in clays" Traducido por W.R. Schriever para Univ. of Toronto Press (1956).
- Conte, E. (2004). "Consolidation analysis for unsaturated soils". *Can. Geotech. J.*, 41 (4), 599-612.
- Cooling y Smith (1935): "The shearing resistance of soils" *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.* Vol.1
- Coroneos, P.; Hisinger, P. y Gilkes, R.J. (1996) Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species; *Fert. Res.* 143-152
- Crawford, C.B. (1986). "State of the art: Evaluation and interpretation of soil consolidation tests". *Consolidation of Soils. Testing and Evaluation, ASTM STP 892*. American Society for Testing and Materials, 71-103.
- Davis y De Weist (1966). "Hidrogeology" Ed. John Wiley & Sons.
- De Jong, G.J. (1968). "Consolidation models consisting of an assembly of viscous elements or a cavity channel network". *Géotechnique* 18(2), 195-228.
- Enciclopedia de Galicia. Tomo XXXVI: Naturaleza. Historia Natural y Geología: Capítulo IV: Las rocas de Galicia. Hércules de ediciones, 216-269.
- Floor, P. (1966). Petrology o fan aegirine-riebeckita gneiss-bearing part of the Heiperian massif: The Galiñeiro and the surrounding areas, Vigo, Spain. *Leids Geol. Mades*. Vol. 36, pp.1-204

- Fraser, J. y McBride, R.A. (2000) The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries; *Land Degradation & Development* 11, p. 1-17
- Freeze, R.A & Cherry, J.A (1979). "Groundwater". Prentice hall. Englewood Cliffs, N.J.
- Géhin A.; Ruby C.; Abdelmoula M.; Benali O.; Ghanbaja J.; Refait Ph. y Génin J. M.R. (2002) Synthesis of Fe(II-III) hydroxysulphate green rust by coprecipitation; *Solid State Science* 4, p. 61–66
- Gillboy (1936): "Improved soil testing material methods" *Engineering News Record*
- González de Vallejo, L. I. (2002): "Ingeniería Geológica". Ed. Prentice Hall
- Goodman (1980), "Methods in geological engineering in discontinuous rock" Wiley & Sons. 472 pp.
- Harley, A.D. y Gilkes, R.J. (2000) Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview; *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, p. 11-36
- Hatch, T. & Choate, S.P. (1929). "Statistical description of the size properties of non-uniform particle substance". *Journal of Franklin Institute*, 207. pp:369-387
- Hayhoe, G.F. (2002). "LEAF – A New Layered Elastic Computational Program for FAA Pavement Design and Evaluation Procedures". *The 2004 Worldwide Airport Technology Transfer Conference*. Atlantic City, New Jersey, USA.
- Hazen, A. (1892) Physical properties of sand and gravels with referente to their use in filtration; Rept. Mass. State Board of Health, p. 539
- Hildebrand, E.E. y Schack-Kirchner, H. (2000) Initial effects of lime and rock powder application on soil solution chemistry in a dystric cambisol – results of model experiments; *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, p. 69-78
- Hoek, E. & Bray, J.W (1981). "Rock Slope Engineering". Institution of Mining and Metallurgy.

- Holtz R.D., and Kovacs, W.D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Huang, Y.H. (1993). *Pavement Analysis and design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- ICAR (2000) An Investigation of the Status of By-Product Fines in the United States; International Center for Aggregate Research Report 101-1
- Instituto Geominero de España (IGME) 2001 Datos de la página web http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/panoramaminero/minerales/piedranatur al03.htm#_ftnref1
- Jardel Pereira (2000). "Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos". (Tesis doctoral). Porto Alegre. 135p. 2000.
- Jiménez Salas, J. A.; De Justo Alpañes, J. L. (1975) "Geotecnia y Cimientos" Vol. I. Ed. Rueda.
- Juncosa, R. (2001). Modelos de flujo multifásico no isoterma y de transporte reactivo multicomponente en medios porosos. Tesis doctoral
- Junta de Andalucía, (2003). *O.C. 1/1999. Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía*, Junta de Andalucía, Conserjería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Carreteras, Sevilla, Spain.
- Krauskopf, Konrad B.; Bird, Dennis (1995) "Introduction to geochemistry" Ed. McGraw-Hill, Earth Science and Geology.
- Le Maitre, R.W. (1976). The chemical variability of some common igneous rocks. *Journal of Petrology* 17: 589-637.
- Legrand L., Abdelmoula M., Géhin A., Chaussé A., y Génin J.M.R. (2001) Electrochemical formation of a new Fe(II)-Fe(III) hydroxy-carbonate green rust: characterisation and morphology; *Electrochimica Acta* 46, p. 1815–1822.

- Leonardos, O.H.; Teodoro, S.H. y Assad, M.L. (2000) Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint; *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, p. 3-9
- Lloret, A. & Alonso, E. E (1980): "Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour". *Geotechnique*, Vol. 30, n° 4, pp. 449-477.
- McGill I. R., McEnaney B., y Smith D. C. (1976) Crystal structure of green rust formed by corrosion of cast iron. *Nature* 259, 1521–1529
- Medus, J (1965) "Contribution palynologique à la connaissance de la flora et la végétation de l'ouest de l'Espagne: étude des sediments recents de Galice" Thèse 3° cycle. Univ. Montpellier
- Menezes, R. R.; Ferreira, H.S.; Neves, G.A. y Ferreira, H.C. (2002) The use of granite wastes as ceramic raw materials; *Cerámica* 48, p. 92-101
- Meyer, P.D., Gee, G.W., and Nicholson, T. J. (1999). Information on hydrological conceptual models, parameters, uncertainty analysis, and data source for dose assessment and decommissioning sites. NUREG/CR-6656. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA.
- Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of soil behavior*, 2nd Ed., John Wiley and Sons Ltd. New York.
- Murad M.A., Guerreiro, J.N., and Loula, A.F.D. (2001). "Micromechanical computational modeling of secondary consolidation and hereditary creep in soils". *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 190 (15-17), 1985 - 2016.
- Navarro, V. y Alonso, E.E, (2000). "Modeling swelling soils for disposal barriers". *Comput. Geotech.* 27, No. 1, pp 19-43
- Navarro, V. y Alonso, E.E, (2001). Secondary compresión of cáliz as a local dehydration process. *Géotechnique* 51, N° 10. pp.859-869

- Nockolds, S., 1954, Average chemical compositions of some igneous rocks: Geological Society of America Bulletin, v. 65, p. 1007-1032.
- Osunade, J.A (2002) “The influence of coarse aggregate and reinforcement on the anchorage bond strength of laterized concrete “Building and environment. Vol 7, Issue 7. pp. 727-732
- Pelletier J.H., Olson, R.E., and Rixner, J.J. (1979). “Estimation of consolidation properties of clay from field observations”. ASTM Geotech. Test. J. 2 (1), 34-43.
- Peulon S.; Legrand L.; Antony H. y Chaussé A. (2003) “Electrochemical deposition of thin films of green rusts 1 and 2 on inert gold substrate”. Electrochem. Comm. 5, p. 208–213.
- Polini, W; Turchetta, S (2004): “Evaluation of diamond tool wear“ Journal of Advanced Manufacturing Technology. Revista electrónica, Springer-Verlag London
- Press, W.H., (editor), Teulowsky S.A., (editor), Vetterling, W.T., and Flannery, B.P. (2002). *Numerical recipes in C++: The art of scientific computing*. 2nd Ed. Cambridge University Press. Cambridge.
- Proctor, R.R. (1933). Four articles on “The Design and Construction of Rolled-Earth Dams, “ Eng. News-Record, 111, pp. 245-248, 286-289, 348-351, 372-376.
- Sánchez Delgado, N.; Rodríguez-Rey, A.; Suárez, L.M.; Díez Sarriá, I.;Calleja, L. y Ruiz de Argandaña, V.G. (2005) The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Sapin); Internacional Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42, p. 161-166
- Satish Kumar, M.R; Kadhivelan, B; Sudhir Kumar, M.R;(1997): “ Utilisation of granite industry waste as a low cost building material “ Journal of the Institution of Engineers” India Civil Engineers Division. Vol.78 (MAI) 27-28
- Sills, G. (1995). “Time dependent processes in soil consolidation”. *Int. Symp. Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Balkema, Hiroshima, Japan, 875-889.

- Silva, S.A. (1998) Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito – Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Tesis Doctoral, Universidade Federal do Espírito Santo; 159 p.
- Skempton, A. W. (1938). Settlement analysis of engineering structures Engineering 146. pp 403-406.
- Skempton, A. W. (1953). “Soil mechanics in relation to geology. Proc. Yorks. Geol. Soc. 29 pp. 33-62
- Soil Survey Staff. (1993) (Soil survey manual. SCS. U.S. Dep. Agric. Handb. 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.
- Terzaghi, K; Peck, R. (1967): “Soil mechanics in Engineering practice “ 2ªEd. Ed. John Wiley and Sons.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils; Soil Science Society of America Journal 44, p. 892-898
- Vázquez A., (2006) “Modelización Geoquímica de los serrines de granito”. Tesis doctoral.
- Wong ,T.T., Fredlund, D.W., and Krahn, J. (1998). “A numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils”. Can. Geotech. J., 35 (6), 926-937.
- Yustres, A. (2003) Refuerzo de firmes y acondicionamiento de la CM-412. Tramo: Villahermosa-Límite de provincia de Ciudad Real. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.

9ª Jornadas de Análisis- Cartel:

“Chemical Fractionation of Heavy Metals in Hazardous Wastes. A Comparison of BCR Scheme, Spanish and DIN 38414 Norms“ Dpto. De Química Analítica, Fac. Ciencias, Universidad de Valladolid.

NORMAS Y LEGISLACIÓN

CMA (2003) Plan de Xestión de Residuos Industriais e Solos Contaminados de Galicia; Consellería de Medio Ambiente; Xunta de Galicia; 152 pp

CMA (2004) Instrucción Técnica de Residuos ITR/01.0/04 de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de la Consellewría d eMedio Ambiente referente a la gestión de residuos de elaboración de rocas ornamentales.

EN 12457-1,2: “Lixiviación: prueba de conformidad de lixiviación de los materiales granulares” Norma europea

Ministerio de Obras Públicas (1976) Orden Ministerial de 6 de Febrero de 1976, por la que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales (PG-3/75). (B.O.E. 07/07/1976)

Ministerio de la Presidencia (1998) Ley 10/1998 de residuos, de 21 de abril. BOE nº 96 (22/4/1998)

Ministerio de Medio Ambiente (2001) Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero; Boletín Oficial del Estado 25, 29/1/2002

NBE AE/88 (Ministerio de Fomento, 2002) Real Decreto 1370/1988, de 25 de Julio por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-AE 88 “Acción en la edificación”. B.O.E. 8 de Octubre de 1988

PG-3 (Ministerio de Fomento, 2002) Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Orden FOM 1382/02 , de 16 de Mayo, por la que se modifican determinados artículos relativos a la construcción de explanadas, drenajes y cimentaciones.

ROM 0.5-94 “Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias”

UNE 103-103-84 “Determinación límite líquido por el método de la cuchara “
Norma española

UNE 103-104-94 “Determinación del límite plástico“. Norma española

UNE 103-405-94 “Consolidación unidimensional de una muestra de terreno“. Norma española

UNE 103-401-98 “Ensayo de resistencia al corte directo“. Norma española

UNE 103-402-98 “Ensayo triaxial “. Norma española

UNE 103-500-94 “Ensayo de compactación Proctor “. Norma española

UNE 103-501-94 “Ensayo de compactación Proctor modificado “. Norma española

UNE 103-300-93 “Humedad mediante secado en estufa “. Norma española.

UNE 103-302-94 “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo“. Norma española.

UNE-EN 22170 (1985) Granitos ornamentales. Características generales; Agencia Española de Normalización, 4 pp.