

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS LOESS DE ARGENTINA¹

Ricardo J. Rocca², Emilio R. Redolfi² y Roberto E. Terzariol²

Resumen: Los suelos loessicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600,000 km² de superficie. Son suelos de origen eólico, que pueden conservar su estructura generada al depositarse (loess primario) o sufrir retransporte o alternación in-situ (loess secundario o loessoides). Los depósitos recientes son principalmente primarios, ML y CL-ML, mientras que los más antiguos, son suelos arcillosos y limosos sub-saturados, CL a CH. Los comportamientos geotécnicos extremos van desde ser suelos colapsables, en el caso de los primarios y la de depósitos preconsolidados por desecación en el caso de los loessoides secundarios. Recientemente se han realizado avances en el conocimiento de los procesos de cementación, las propiedades dieléctricas y las variaciones mecánicas con distintos niveles de deformaciones, en el empleo de nuevos métodos no destructivos, ensayos in-situ y variaciones areales de los parámetros más significativos. Se ha progresado en el modelado de fundaciones y en distintos procesos de infiltración del agua en el suelo. El diseño ingenieril está condicionado al tipo de colapsabilidad. Los criterios empleados en construcciones tratan de anular el ingreso de agua al suelo; eliminar la colapsabilidad mediante el mejoramiento de su estructura inestable o evitar emplearlo como terreno de fundación directa. En las obras hidráulicas predomina el uso de la hidrocompactación combinada con métodos para acelerar el proceso de colapso. Los suelos loessicos son aptos como material de construcción en terraplenes y rellenos, porque la compactación destruye la estructura macroporosa y se comportan como otros tipos de suelos limosos.

Palabras Claves: Argentina, cenizas volcánicas, colapsabilidad, loess pampeano.

GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF ARGENTINEAN LOESS

Abstract: Argentinean loessial soils are the main deposits of this kind of soil in South America, and cover an area of more than 600,000 km². They are eolic soils that can preserve their original structure generated when they were deposited (primary loess) or being transported or altered in place (secondary loess or loessoid). Recent deposits are mainly primary, ML and CL-ML, whereas the older ones are similar to other unsaturated clayed and silty soils, CL and CH. Geotechnical behavior varies from collapsing soils, for primary loess, to overconsolidated by desiccation for the secondary loessoid deposits. Recently, advances have been made in the knowledge of the cementation processes, the dielectric properties and the mechanical variations with different levels of strains, in the use of new nondestructive methods, in-situ tests and spatial variations of the most significant parameters. There has been progress in the modeling of foundations and different infiltration processes of the water in the ground. The engineering design is conditioned by the type of collapsibility. The criteria used in constructions try to eliminate the entrance of water into the ground; to eliminate the collapsibility by means of the improvement of its unstable structure or to avoid using direct foundations. In hydraulic works predominates the use of the hydro-compaction combined with methods to accelerate the collapse process. Loessic soils are apt for using in embankments and fillings, because compaction destroys their macroporous structure and they behave like other types of silty soils.

Keywords: Argentina, collapsibility, loess pampeano, volcanic ash.

INTRODUCCIÓN

Los loess son suelos predominantemente limosos cuyo nombre es indicativo del estado de su estructura interna. Fueron estudiados por primera vez en Alemania en formaciones de la cuenca del Rin, donde surgió su denominación. Esta palabra tiene la misma raíz que “*loose*” en inglés y significa suelto. Si bien ha habido algunas controversias sobre su

¹ Artículo recibido el 29 de agosto de 2005, y aceptado el 6 de febrero de 2006.

² Profesor, F.C.E.F.N. U. Nac. Córdoba. Av.V.Sarsfield 1611. 5016 Córdoba. Argentina. E-mail: rjrocca@efn.uncor.edu

génesis, se acepta que son suelos formados por acción eólica (loess primario) que pueden ser retransportados y redepositados por otros medios (loess secundario o loessoides).

Se ha estimado que un 10 % de la superficie de los continentes está cubierta por estos suelos, con presencias significativas en América del Norte, Europa, Asia y América del Sur. En Sudamérica existen varios suelos de tipo loessicos o loessoides del Cuaternario superior relacionados genéticamente por cinco tipos de transporte y sedimentación de limos eólicos (Iriondo, 1997). De ellos el Tipo Pampeano y el Tipo Chaqueño involucran a Argentina. Su presencia ha sido reconocida desde mediados del siglo XIX, merced a las observaciones de prestigiosos científicos europeos. Se los ha encuadrado, en forma genérica, bajo la denominación de Formación Pampeana o Pampiano, si bien a veces se restringe este nombre, para depósitos Cenozoicos, más antiguos.

La gran extensión que ocupan y sus numerosas facetas hacen que sea un importante tópico de investigación de varias disciplinas relacionadas con las geociencias. Así, actualmente se realizan estudios paleoclimáticos en donde se evalúa, en perfiles estratigráficos, la presencia de las distintas capas de loess y paleosuelos como indicadores de períodos secos y húmedos respectivamente. Con la datación de estas capas, se pueden definir variaciones paleoclimáticas y compararlas con las formuladas para el hemisferio norte (Teruggi y Imbellone, 1992)

En el campo de la ingeniería, la presencia de estos suelos en Argentina fue reconocida en la década de 1930 y ya hay menciones a ellos en el libro clásico de Scheidig (1934). Sin embargo, la clarificación de las ideas sobre el comportamiento se produjo varias décadas después (Bolognesi y Moretto, 1957; Reginatto y Ferrero, 1973; Bolognesi, 1975). En la zona central los loess constituyen el principal suelo regional y por ello existen numerosas publicaciones (Moll, 1975; Moll et al., 1988; Moll y Rocca, 1991).

La principal característica geotécnica está constituida por su colapsibilidad o estado metaestable de su estructura interna que puede destruirse debido a cambios en el contenido de humedad o tensionales. Como consecuencia de ello, se generan variaciones volumétricas bruscas que pueden afectar a las estructuras que sean incapaces de soportar distorsiones y asentamientos diferenciales significativos.

LOCALIZACIÓN

La zona ocupada por loess se extiende en las planicies situadas desde 23 ° a 38 ° S, cubriendo más de 600,000 km² (Figura 1). Hacia el oeste, esta contenida por varias cadenas montañosas que ocupan una faja que se extiende en dirección N-S, a lo largo de Argentina. Recientemente se ha propuesto la subdivisión entre loess pampeano (al sur de 30 ° S) y loess chaqueño, subtropical (al norte de 30 ° S). Hay otros depósitos loessicos en valles montañosos y planicies de altura del oeste del país. En los países limítrofes, se los ha reportado al sur de Brasil, en Uruguay y en el Chaco Paraguayo.

FORMACIÓN

El comienzo de la sedimentación loessoide ha sido relacionada con una fase la orogenia andina del Mioceno Tardío (cerca de 10 Ma, millones de años) que al modificar la cordillera de los Andes, generó una barrera a los vientos húmedos del Pacífico, reteniendo la humedad en su vertiente occidental chilena. Estos son los depósitos antiguos que se encuentran en el subsuelo profundo. Los depósitos más recientes corresponden al Pleistoceno Tardío/Holoceno y constituyen los loess primarios.

Fuentes originarias del loess y medios de transporte (Zárate, 2003)

Fue Teruggi (1957) quien dio la primera explicación comprensible con un esquema que actualmente se considera sobresimplificado. En el caso del Tipo Pampeano, predominan partículas de origen volcánico originadas en los Andes Centrales y en la Patagonia. Ellas fueron transportadas por agentes erosivos como glaciaciones y fluviales hacia el norte de la Patagonia. De allí las partículas fueron transportadas por la acción de los vientos del S - SW hacia el centro del país.

Las partículas arenosas fueron arrastradas por saltación cubriendo una planicie arenosa (arenas eólicas o Mar de Arena de la Figura 1) en ambiente seco y desértico, mientras que los mismos vientos produjeron la sedimentación de partículas de polvo en suspensión, formado en cinturón de loess detrás del Mar de arena de 2,000 Km. de longitud y 250 a 300 Km. de ancho (Krohling 1999) (Figura 2). Los loess del Tipo Chaqueño tienen además otras fuentes de aportes de la zona NW. Las direcciones de los vientos están señaladas en la Figura 1.

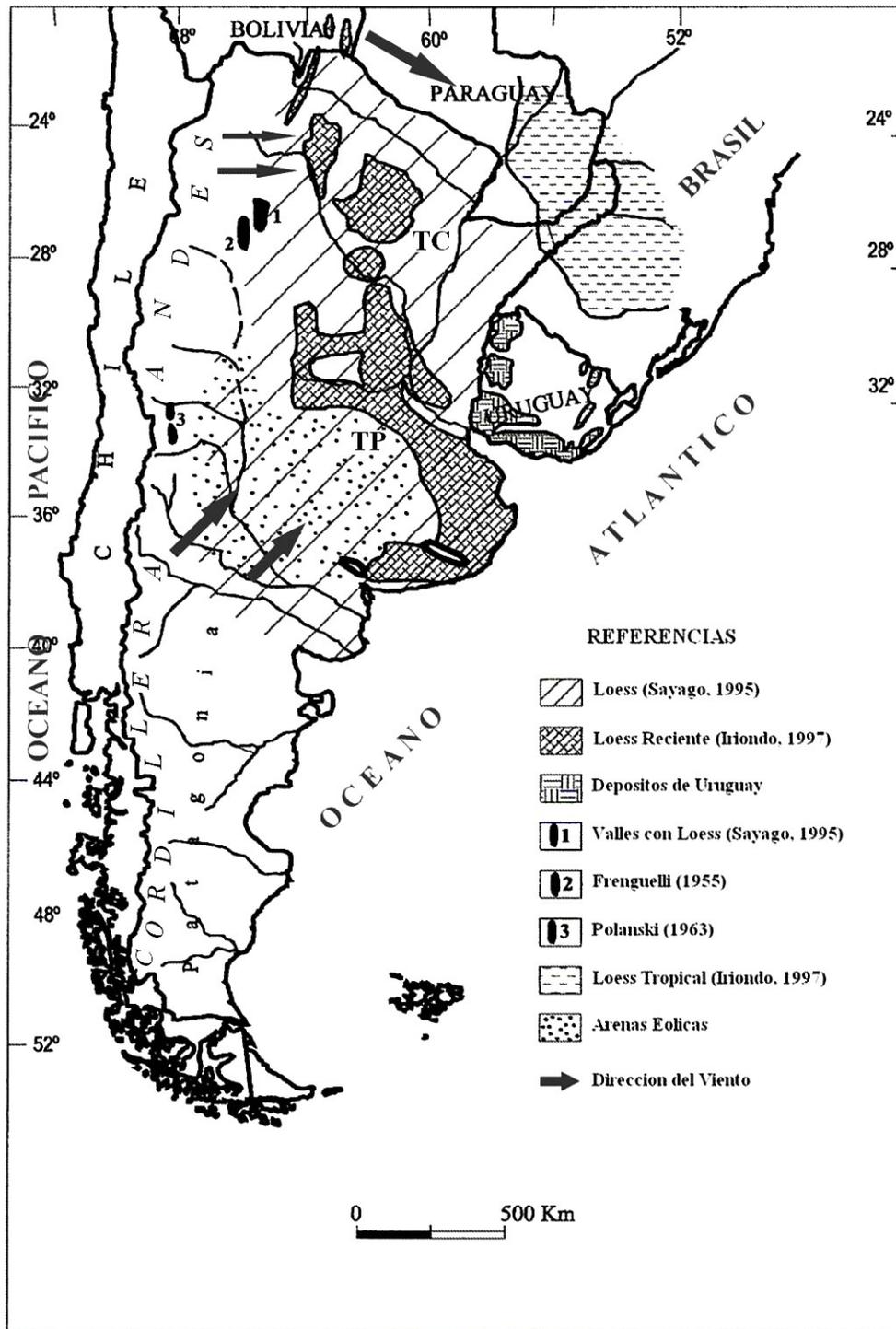


Figura 1: Distribución de Loess y Loessoides (adaptado de Zárate, 2003).
 La superposición de rastras refleja diferencias interpretativas de distintos autores.
 TC: Tipo Chaqueño, al Norte de LAT 30°, TP: Tipo Pampeano al Sur de LAT 30°.
 1,2 y 3: Depósitos en valles en la faja montañosa del Oeste del país.

Las lluvias de cenizas también constituyen una fuente del loess sudamericano. Se ha estimado entre 5 a 10 m de material piroclástico acumulado en el último millón de años. Se calcula que alrededor de un 10% de los loess del Pleistoceno Superior / Holoceno fueron depositados de esa manera. Las alteraciones de esas cenizas generan reacciones de tipo puzolánica con la formación de capas cementadas (tosca). La cementación es variable tanto en la extensión como en sus características mecánicas (Quintana y Redolfi, 2001).

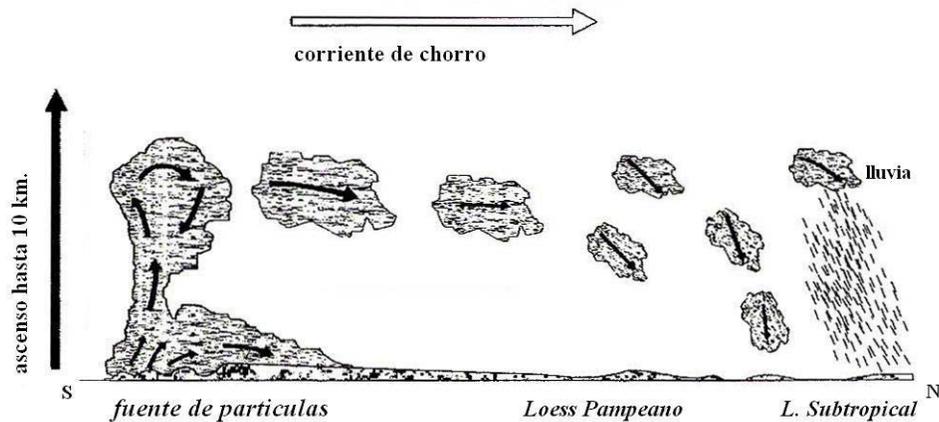


Figura 2: Modos de Transporte de partículas (adaptado de Sayago et al., 2001)

Edades de los loess Pampeano y Chaqueño (Sayago et al., 2001)

Numerosos juegos de datos de los loess Pampeano y del Chaco han confirmado edades del Pleistoceno Tardío/Holoceno en los sedimentos loessicos modernos. Estos resultados sugieren períodos de depositación entre 10 y 30,000 años. Aunque los loess están ausentes en el período Altitermal (8 a 6,000 años) tanto en la Pampa como en el Chaco, hay varios episodios en el Holoceno Medio y Superior. En general, el loess típico Holocénico, pampeano y subtropical, es delgado (< 5 m) y dificultoso de diferenciar del loess del Pleistoceno Tardío, debido a falta de diferenciación en color, características físicas y granulometría.

Mineralogía (Teruggi, 1957; Sayago et al., 2001; Zárate, 2003)

La composición mineralógica de estos sedimentos varía de norte a sur. En los depósitos al norte son predominantemente cuarzo y feldespato, mientras que los depósitos de las pampas del sur son volcanoclásticos. En general la mineralogía de los loess pampeanos se caracteriza por abundancia de plagioclasas (20 a 60%), relativamente poco cuarzo (20 a 30%) y un considerable porcentaje de vidrio volcánico (15 a 30%). En contraste, las bajas proporciones de plagioclasa y vidrio volcánico, en los loess subtropicales se deben a la influencia de factores climáticos (desvitrificación y alteración de feldspatos). La formación de arcilla in-situ es inversamente proporcional al tamaño de grano del material madre.

La illita aparece como el mineral predominante en las secuencias Pleistoceno/Holoceno. Las smectitas y kaolinita son componentes menores, con excepción al loess pampeano descrito como Pleistoceno Temprano en la cual predomina la montmorillonita. En la llanura chaqueña, aunque la illita es predominante en la superficie, la kaolinita y la smectita se incrementan en profundidad. La presencia de minerales alofánicos ha sido reconocida en toda la región.

ESTRATIGRAFÍA

El espesor de los loess recientes aflorante en las pampas del Este es alrededor de 10-15 m. Esta cifra se incrementa, alcanzando 40 m hacia el Sur y al Oeste, en las estribaciones montañosas. En los valles subtropicales preandinos, las capas varían entre 20-60 m. En el Norte, en las llanuras chaqueñas occidentales tiene un promedio de 10-20 m, mientras que en el centro y Este el loess retrabajado alcanza un máximo de 10 m (Sayago et al., 2001). En un perfil detallado de la región pampeana se observan algunas formaciones que se repiten con variaciones laterales en toda la extensión de la pampa (Krohling, 1999).

En la base, la *Formación Tezano Pintos* constituye una unidad típica del cuaternario de las Planicies Pampeanas. Presenta loess primario con perfiles de 8 m de espesor. Esta compuesta por limos eólicos (limos 71-81%, arcilla 13-29 %, arenas 1-6 %) de color pardo brillante húmedo (7.5 YR 5/6) y anaranjado seco (7.5 YR 7/3). Es homogéneo, poroso y permeable, con una fabrica blocosa gruesa a media. Esta cruzada por canalículos. La masa tiene Carbonato de Calcio diseminado y en concreciones de tamaño variable. Es estable en taludes empinados y presenta disjunción columnar.

La datación por Termoluminiscencia arroja edades de 31,900 +/- 1,620 años, en muestras de facies eólicas. Las facies con nódulos dan 35,890 +/- 1,030 años cerca de la base de la formación.

Sobre ella se observa un *Paleosuelo Altitermal*. El techo de la Fm. Tezano Pinto está marcado por un paleosuelo, parcialmente erosionado de 0.30 a 1.10 m. de espesor, que representa un horizonte Bt. La fracción limosa baja al 55% y la fracción arcillosa se incrementa al 40%.

Finalmente, hacia la superficie aparece la *Formación San Guillermo (Fm. Cordobense)*. Es un limo eólico grisáceo (10 YR 5/1) que cubre con un manto continuo la Fm. Tezano Pintos y forma el techo de la secuencia sedimentaria de la Pampa. El espesor típico es de 0.3 m con máximos de 0.55 m. Los limos son el 70%, con arcillas y coloides (25%) y arena muy fina (< 5%). Se presenta intestratificado, poroso, friable, permeable y con algunas estructuras prismáticas. Estos depósitos carecen de nódulos pero contiene abundantes macroporos, y canalículos generados por bioturbación. La masa sedimentaria no es calcárea. Esta unidad es un producto parcial de la deflación del horizonte A del paleosuelo inferior. Se depositó en el Holoceno tardío, con datación entre 3,500 y 1,400 años.

PROPIEDADES ÍNDICES

Las características de los depósitos de los loess son una función de la distancia a la región fuente de las partículas. En la transecta de la Figura 3, se muestra la variación espacial de tamaños desde la Pampa al Chaco.

Los loess arenosos son característicos de las Pampas del sur, mientras que las arcillas limosas son dominantes en el Chaco.

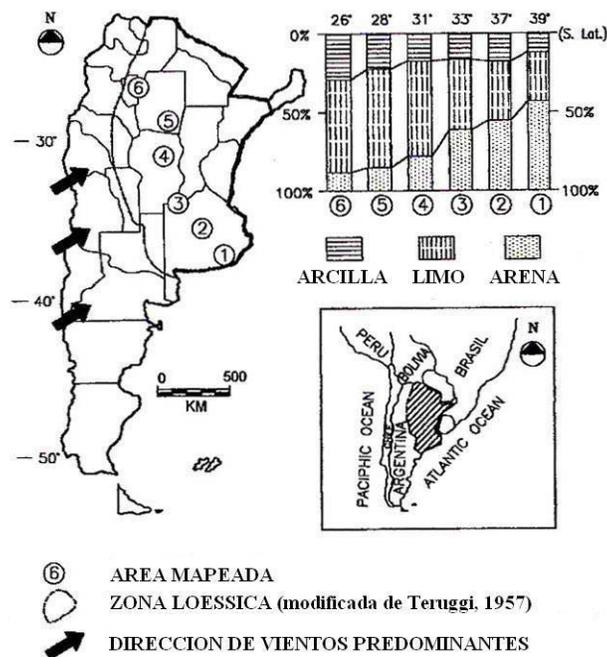


Figura 3: Influencia del transporte en las propiedades de sedimentos (Sayago et al., 2001).

Propiedades de loess antiguos

En el análisis de las propiedades de importancia ingenieril se pueden observar algunas secuelas de la historia geológica. Los depósitos de la Fm Pampeano pertenecen al Pleistoceno y soportaron las consecuencias de las últimas glaciaciones. Las sucesivas variaciones del nivel del mar fueron significativas, alcanzando una disminución desde la cota actual, de alrededor de 110 m. El efecto más importante fue la sobreconsolidación por desecación al bajar el nivel. Estas formaciones han sido extensamente estudiadas por Bolognesi, Moretto y colaboradores en la Universidad de Buenos Aires.

Los depósitos presentan en su base suelos arcillosos de origen fluvial con montmorillonita, caolinita y cuarzo abundantes (Zona II de Bolognesi, 1975) sobre los cuales se han depositado los loess con illita y plagioclasa abundantes (Zona I). En un perfil generalizado próximo al Río Paraná (cota 0), en la Zona I se distinguen tres Subzonas:

- Vidrio volcánico relativamente escaso, variable. Desde la superficie a cota +10.00. Con muy pocas excepciones los suelos son arcillas (CL ó CH).
- Vidrio volcánico abundante. Cota +10.00 a cota - 5.00. El suelo predominante es ML, que posee además cementación calcárea y una estructura con cavidades y poros abundantes.
- Vidrio volcánico escaso, excepto en horizontes aislados. Plagioclasa más abundante que en a). Cota - 5.00 a cota - 10.00. Entre - 5.00 y - 8.00 predominan las arcillas CL. Entre - 8.00 y -10.00 el suelo tiene las mismas características de la subzona b) y constituye el manto de limo cinerítico que separa las zonas I y II.

La Tabla 1 resume las principales propiedades índices promedio de estos estratos.

Tabla 1: Propiedades Promedios de los Loess Pampeanos Antiguos (Bolognesi, 1975).

Zona	Prof. (m)	Cota (m)	e_o	ω (%)	ω_L (%)	ω_P (%)	IP (%)	Cc	$\frac{C_s+C_r}{2}$	γ	
										(kN/m ³)	
Ia)	10.16	15.00	0.848	32.0	67.0	30.0	37.0	0.32	0.024	25.98	18.53
Ia)	12.16	13.00	0.888	33.5	67.0	31.5	35.5	0.33	0.025	25.98	18.33
Ib)	20.00	5.16	0.826	31.4	41.3	27.8	13.5	0.15	0.010	25.78	18.53
Ib)	27.20	-2.04	0.848	32.0	51.0	30.0	21.0	0.18	0.012	25.98	18.53
Ic)	32.70	-7.54	1.180	44.5	69.0	33.5	35.5	0.28	0.020	25.98	17.25

Las cotas se refieren al nivel del Río Paraná. Las zonas están descriptas en el texto.

Propiedades de loess recientes

Los depósitos recientes son los que constituyen los materiales loessicos sensu-stricto y presentan como principal propiedad su inestabilidad antes cambios de humedad, produciendo el colapso de la estructura. Han sido estudiados especialmente en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba. En un estudio realizado en 420 perfiles de la ciudad de Córdoba, se han distinguido los loess primarios (Complejo Litológico, CL 2A) que son las formaciones más recientes, incluidas dentro de la Fm. Cordobense, y en los cuales hay estratos cementados con carbonatos (CL 2Ax). Por debajo de ellos y separados generalmente por estratos granulares, se encuentran las formaciones de loess secundario del Pleistoceno Superior (CL 2B) equiparables con la Fm. Tezano Pintos y más antiguas Pleistoceno Medio (CL 2C).

Estos suelos presentan abundante cantidad de vidrio volcánico sus fracciones limosas y presencia de illita en su fracción arcillosa. Existen nódulos y microcristales de Carbonato de Calcio insoluble dentro de la masa (menos del 8%) formados por procesos de ciclos de humedecimiento y secado debido al ascenso capilar de bicarbonato, seguido por cristalización. Frecuentemente se encuentra Yeso en cantidades variables (Rinaldi et al., 1998).

Los iones adsorbidos más comunes son Calcio y Sodio. En el fluido de poros, el Sodio es el catión más abundante. El Ca y Na solubles varía entre 0.4 y 1.2%. Los aniones más comunes son Sulfatos y Cloruros. La superficie específica está controlada por la fracción arcillosa y puede variar entre 1 m²/gr a más de 10. La Tabla 2 presenta alguno de los valores más característicos de los mismos. La variabilidad espacial se hace significativa en los depósitos que presentan cementación. Esta se deriva principalmente de algunas capas de cenizas volcánicas que se encuentran por debajo de CL 2A.

La distribución granulométrica consiste en arena (5 al 15%), limos (40 al 60%), partículas arcillosas (20 al 35%). La fracción gruesa tiene baja coordinación. La fracción arcillosa forma puentes de conexión entre partículas gruesas y contrafuertes de arcilla floculada en los contactos ente limos y arenas. Estas estructuras arcillosas y sales precipitadas le confieren estabilidad y cohesión al suelo.

En tanto, el límite líquido varía entre 22.0 % y 30.0 %, y el límite plástico entre 16.0 % y 20.0 %. Tanto el Límite Líquido como el Índice Plástico se incrementan con el contenido de arcilla. Con lo cual, según la Clasificación Unificada, se los clasifica como suelos ML ó CL-ML.

El peso unitario seco de estos suelos en general es bajo, y varía entre 11.0 y 14.0 kN/m³, mientras que el contenido de humedad natural lo hace entre el 8.0 % y el 25.0 %. La gravedad específica es 2.65. Los correspondientes rangos de

porosidad varían alrededor de 0.5. La distribución de tamaño de poros involucra vacíos submicroscópicos 5 a 25% (en términos de volumen de vacíos), vacíos de a 1 a 20 micrones (30 a 80%) y macroporosidad milimétrica que a menudo está tapizada por carbonatos recristalizados.

Tabla 2: Propiedades de los Loess recientes.

	ω (%)	ω_L (%)	IP (%)	PT4 (%)	PT10 (%)	PT40 (%)	PT200 (%)	γ_d KN/m ³
CL 2A								
PROMEDIO	16.08	24.25	4.58	99.93	99.49	96.98	90.64	12.9
STD	5.15	2.84	1.93	0.50	1.81	4.95	10.53	1.07
CL 2Ax								
PROMEDIO	17.37	24.50	4.84	99.62	99.34	95.48	87.82	13.9
STD	4.74	3.32	1.76	3.11	1.58	6.51	15.22	5.00
CL 2B								
PROMEDIO	22.07	26.54	6.71	99.79	98.54	93.39	84.17	14.8
STD	7.78	5.34	3.52	1.04	3.13	13.00	15.55	8.33
CL 2C								
PROMEDIO	28.66	35.02	10.86	100.00	99.63	96.61	88.55	13.4
STD	11.16	10.40	6.77	0.00	0.86	6.27	9.87	1.17

Promedios y Desviación Standard (STD) calculados en análisis de 420 perfiles.

CL: Complejo Litológico. Tipos descriptos en el texto.

COMPORTAMIENTO – PROPIEDADES

Para caracterizar el comportamiento y las propiedades de los loess, el primer aspecto a considerar es diferenciar si los suelos corresponden a loess primario o si han sufrido procesos que han alterado su estructura metaestable. A medida que los depósitos son más antiguos, menor es la inestabilidad que sufren y por consiguiente las dificultades que pueden ocasionar a las obras. Como casos extremos se puede considerar por una parte, los depósitos cenozoicos, loessoides de la Fm. Pampeano que han sufrido sobreconsolidación por desecación y por otra, los depósitos loésicos recientes, por ejemplo, los de la Fm. Cordobense que son colapsables.

El rol del contenido de humedad en los loess primarios

El agua tiene un rol muy importante en la formación y comportamiento posterior del loess (Rinaldi et al., 1998). A medida que el contenido de humedad decrece, las partículas finas se desplazan hacia el menisco, la concentración iónica en los fluidos de los poros se incrementa, el espesor de la doble capa disminuye y las fuerzas de atracción de Van der Waals prevalecen sobre las fuerzas de repulsión de la doble capa. Cuando las fuerzas de atracción interpartículas dominan, las partículas arcillosas flocculan formando puentes de arcilla y contrafuertes en los contactos entre granos de arena y limo.

Una mayor reducción del contenido de humedad, hace que los cationes hidratados de la doble capa se deshidratan y se vinculen iónicamente a las partículas arcillosas contiguas. Mientras tanto, la concentración de sales alcanza la saturación y las sales precipitan como cristales que robustecen la estructura del suelo. El aumento contemporáneo de la succión aumenta también la resistencia, que es más efectiva entre partículas arcillosas en los puentes y contrafuertes, que en los meniscos entre partículas gruesas. El efecto combinado de estos procesos confiere a los loess alta resistencia cohesiva que permite cortes verticales y la aptitud para soportar cargas importantes.

El incremento del contenido de humedad revierte los procesos: las sales solubles se hidratan y debilitan, y la concentración iónica en el fluido continúa decreciendo con el incremento del contenido de humedad. Al disminuir la concentración de iones se incrementa la doble capa que se forma alrededor de las partículas. La rigidez al corte y la resistencia de las formaciones arcillosas decrece a medida que se incrementa la capa hidratada. Las fuerzas de repulsión se vuelven dominantes y las partículas arcillosas se dispersan. También, la succión gradualmente disminuye a medida que se incrementa el grado de saturación.

Eventualmente, la estructura se debilita y colapsa aún sin alcanzar la saturación. Muy poca carga externa se requiere para alcanzar el colapso final, y a veces el propio peso de la masa del suelo es suficiente. Los loess no colapsan cuando son permeados por fluidos no polarizados. Esto señala la importancia de las arcillas y las sales de hidratación en el comportamiento metaestable.

La resistencia, la rigidez y el grado de colapso están condicionados por la relación de vacíos inicial y el contenido de humedad del suelo. Otros parámetros relevantes son la fábrica, la composición química del fluido saturante, la cantidad de sales solubles, la cantidad de agentes cementantes no solubles, la profundidad y el nivel de cargas externas.

La colapsibilidad de los loess primarios

La colapsibilidad se puede estudiar por medio de ensayos edométricos. En la curva de compresibilidad en condición saturada, se observa un límite denominado "presión inicial de colapso" o "presión de fluencia saturada" ($\sigma_{F,SAT}$), a partir del cual se producen cambios significativos en los vínculos de la estructura del suelo (Figura 10).

La relación entre la presión de fluencia saturada, que es una propiedad del suelo, y el estado de tensiones in-situ (σ_0), conducen a la división en dos tipos de suelos:

- *Loess potencialmente colapsables*: cuando la presión de tapada es menor que la presión de fluencia luego de humedecimiento, $\sigma_0 < \sigma_{F,SAT}$. La estabilidad dependerá de la magnitud de una carga externa al suelo.
- *Loess autocolapsables*: cuando la presión de tapada es mayor que la presión de fluencia saturada. $\sigma_0 > \sigma_{F,SAT}$. En este caso la masa de suelo colapsará espontáneamente sin la necesidad de una carga exterior.

Cuando se grafican estas relaciones en profundidad, se generan los perfiles de colapsibilidad, en los que se compara la tensión in-situ ($\sigma_0 + \Delta\sigma$), con la presión de fluencia saturada ($\sigma_{F,SAT}$) (Figura 4). Durante un proceso de incremento de humedad, se producirán asentamientos por colapso, en aquellos sectores en donde la presión actuante sea mayor que la presión de fluencia. Estos perfiles permiten definir la cota de fundación de las fundaciones profundas y los sectores en donde son probables procesos de fricción negativa. El espesor de estos mantos autocolapsables depende de las características regionales. En general son mantos superficiales, pero pueden también ser capas intermedias, por ejemplo de 5.0 a 7.0 metros de profundidad.

En ensayos realizados en el centro de Argentina, los valores promedios de la relación $\sigma_{F,SAT}/\sigma_0$ para los suelos autocolapsables varían entre 0.72 para los primeros tres metros y 0.60 para los suelos más profundos. En el caso de los suelos potencialmente colapsables la relación $\sigma_{F,SAT}/\sigma_0$ oscila entre 1.49 superficialmente y 1.40 en profundidad.

En los últimos años se ha incrementado el esfuerzo para ensamblar el comportamiento tenso deformacional de estos suelos dentro de alguno de los modelos de suelos no saturados, como por ejemplo, el propuesto por Alonso et al. (1990). Este modelo que utiliza dos variables de tensión independientes:

- la presión neta definida como la diferencia entre la presión total (σ_m) y la presión del aire (p_a), por ejemplo $p = \sigma_m - p_a$,
- la succión, definida como la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua (p_w), por ejemplo $s = p_a - p_w$.

Los parámetros de compresibilidad del modelo se pueden determinar mediante ensayos edométricos a succión controlada, y predecir procesos de carga, humedecimiento y secado (Redolfi y Oteo, 1994). La colapsibilidad está también influenciada por las características del fluido percolante. Estos interactúan químicamente con los vínculos internos pudiendo acelerar o retardar el proceso de destrucción de ellos. Las aguas con alto pH tienden a ser más nocivas (Reginatto y Ferrero, 1973).

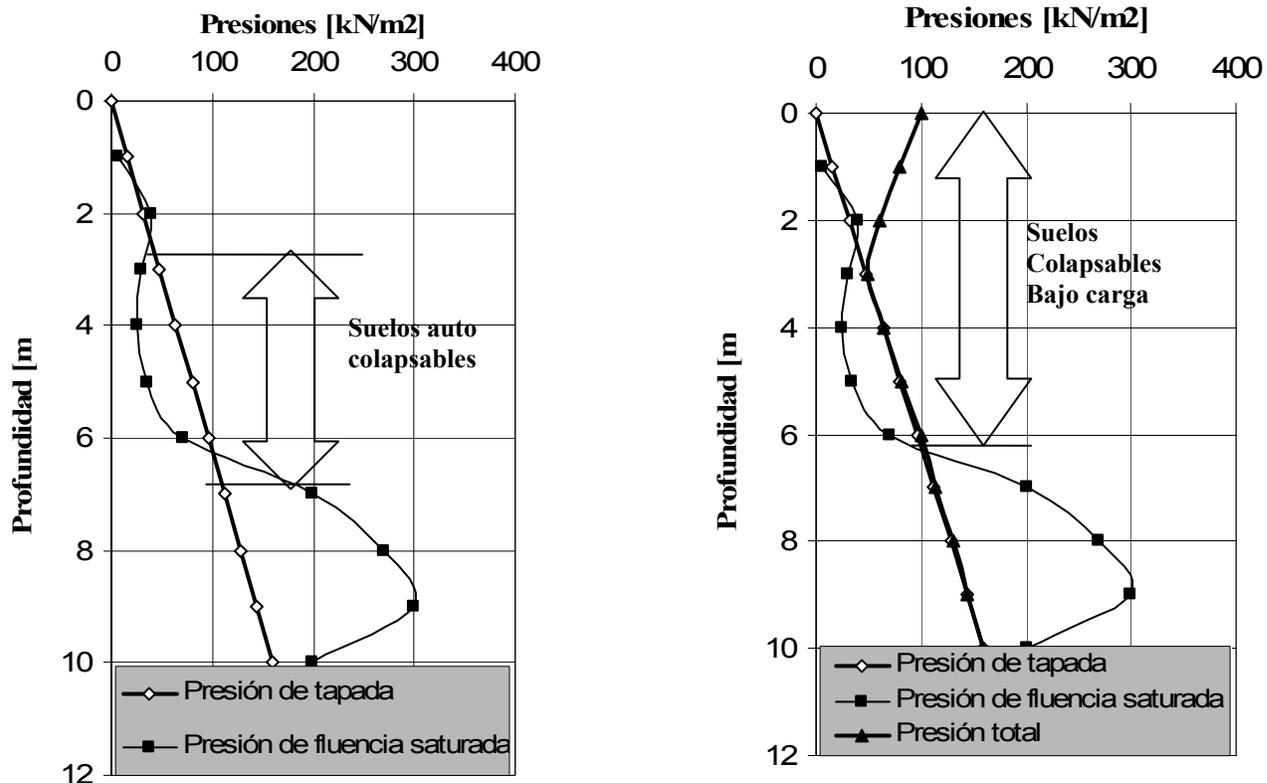


Figura 4: Perfiles de colapsibilidad a) Presiones tapada b) Presiones de tapada + Incremento de presión.

Resistencia al corte

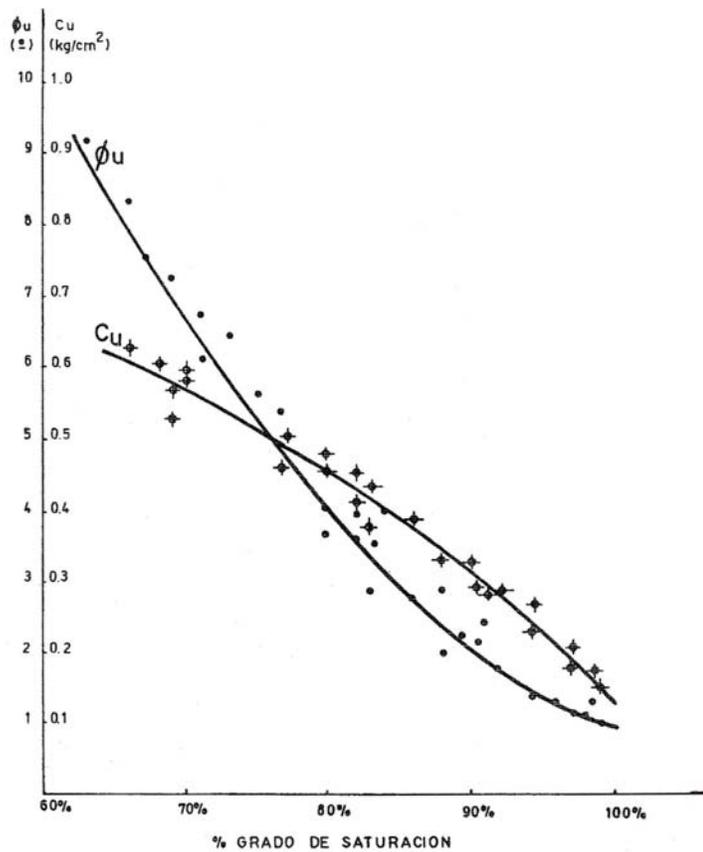


Figura 5: Variación de los parámetros de ensayos triaxiales no consolidados no drenados con el grado de saturación. 1 kg/cm² = 98.1 KN/m² (Núñez et al., 1970).

La resistencia al corte medida varía sustancialmente con el grado de saturación, producto del colapso de la estructura interna. En la Figura 5 se presenta la variación de los parámetros corte no drenado obtenidos a partir de ensayos triaxiales realizados con diferentes grados de saturación. Del mismo modo que sucede con la compresibilidad, la succión es una variable importante. En general, la cohesión es el parámetro que mayor variación tiene, no así el ángulo fricción interna. En ensayos triaxiales drenados sobre muestras saturadas, el ángulo de fricción interna medio está en el orden de 24° .

En ensayos de plato de carga, al saturarse se observan bruscos descensos con valores de asiento 10 a 20 veces al que corresponde en condiciones de humedad natural (Nuñez et al., 1970). En los suelos preconsolidados de Buenos Aires, los valores de Φ_u varían entre 5 y 12° aumentando notablemente cuando se encuentran cementados (toscas).

Conductividad hidráulica

Los suelos loésicos presentan singularidades en cuanto a la anisotropía de la conductividad hidráulica, donde el coeficiente de permeabilidad vertical (k_v) es mayor que el coeficiente de permeabilidad horizontal (k_h). Los niveles superiores de limos arcillosos presentan estructuralmente una red de fisuras y microfisuras visibles. Esta red incrementa el valor de la permeabilidad, que se detecta en los ensayos. Esta situación no es observada en una muestra similar ensayada en laboratorio. En estado natural los suelos se encuentran generalmente, en condición subsaturada, con la intervención de tres fases, y la estructura sólida es metaestable y susceptible al colapso cuando circula el agua.

El modelo empleado para interpretar distintos ensayos de infiltración realizados en estos loess, analiza la solución de la ecuación de continuidad de flujo no saturado unidimensional (Terzariol et al., 2003). Como flujo transitorio, y en suelos no saturados, la permeabilidad (k_ψ) del medio es dependiente de la succión matricial (s), la cual está condicionada por la humedad volumétrica (θ).

Para la aplicación del algoritmo de cálculo se requiere el conocimiento de la vinculación entre la humedad volumétrica del suelo y la succión matricial, las denominadas curvas características suelo-agua. En la Figura 6 se presenta una de estas curvas obtenidas en un loess de la provincia de Córdoba (Zeballos et al., 2002).

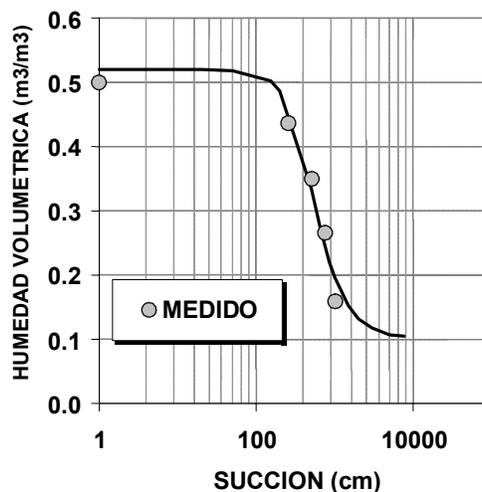


Figura 6: Relaciones características agua – suelo (Zeballos et al., 2002).

Parámetros geofísicos

Los métodos no destructivos basados en el uso de parámetros geofísicos tales como la velocidad de propagación de onda sísmica, permitividad dieléctrica, y conductividad eléctrica han permitido el estudio de la estructura del loess y sus modificaciones bajo distintos procesos de carga, y para el estudio de distintos procesos en el suelo, tales como humedecimiento, densificación, contaminación, etc.

Velocidad de propagación de Ondas

La velocidad de propagación de ondas de corte está vinculada fundamentalmente a la rigidez de la estructura del suelo, densidad y las tensiones de contacto entre partículas.

En la Figura 7 se muestra como aumenta la velocidad de propagación de ondas de corte con la presión y decrece con el contenido de humedad. Las curvas no siguen un comportamiento hiperbólico como en los suelos no cementados, del tipo $V_s = k(\sigma)^\alpha$. Por el contrario muestran un quiebre en coincidencia con la presión de colapso. Este quiebre es menos marcado en el caso de la muestra saturada.

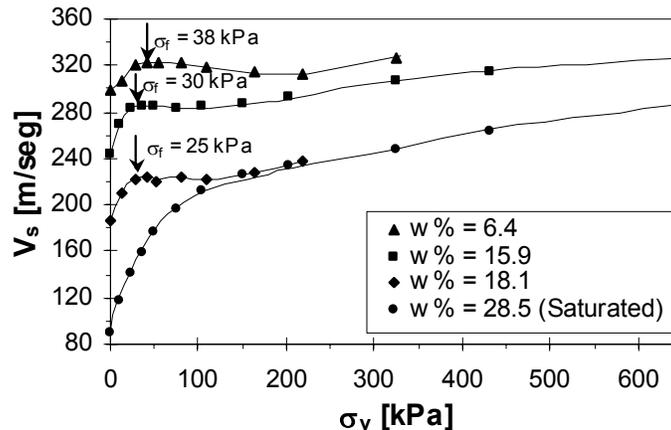


Figura 7: Velocidad de propagación de ondas de corte medidas durante la ejecución de un ensayo edométrico para muestras a distintos contenidos de humedad. Sobre las curvas se indica la presión de fluencia (Rinaldi et al., 2001).

A partir de diversos ensayos de down-hole realizados a humedad natural, se determinó una ley de variación promedio de la velocidad de onda de corte (V_s) en función de las presiones de confinamiento geostáticas (σ_0) (Rinaldi et al., 1998).

$$V_s = 161.1(\sigma_0)^{0.19} \quad (1)$$

En donde σ_0 está expresada en kPa y V_s en m/s.

La expresión (1) sólo es válida, si se considera que las presiones geostáticas no superan la presión de colapso. Se observa que el valor de la constante de rigidez resulta mayor a valores publicados en la literatura para arcillas, y que el exponente muestra que el efecto de succión y cementación genera baja dependencia de la velocidad respecto al confinamiento.

Propiedades Dieléctricas

La propagación de ondas electromagnéticas en los materiales está controlada por las propiedades dieléctricas del medio donde se difunden. La constante dieléctrica o permitividad relativa de un medio es un valor complejo $k^* = k' + k''$ en donde k' es la componente real y k'' la componente imaginaria relacionada con la conductividad eléctrica del medio.

En la Figura 8 se muestra la variación de la permitividad dieléctrica del loess medida en laboratorio, en función de la frecuencia de medición y el contenido volumétrico de agua. Los valores medidos tanto de la componente real como de la componente imaginaria resultan muy elevados. Este comportamiento es el responsable de la poca penetración que tiene la onda electromagnética en el loess (Rinaldi y Francisca, 1999).

Los estudios muestran que la profundidad de penetración es menor al metro a los contenidos de humedad naturales en loess, lo cual hace poco factible el empleo de georadar. Por otro lado los mismos resultados indican que existe una marcada tendencia de incrementar el valor de la constante dieléctrica con el contenido de humedad, lo cual muestra que los métodos eléctricos, tienen un buen fundamento para el mapeo de frentes de humedad en loess. Para frecuencias

mayores a 200 MHz la relación entre la permitividad real y el contenido volumétrico de agua θ_v , puede asumirse como (Rinaldi et al., 1997):

$$k' = 1.682 + 0.42 \theta_v + 0.002 \theta_v^2 \quad (2)$$

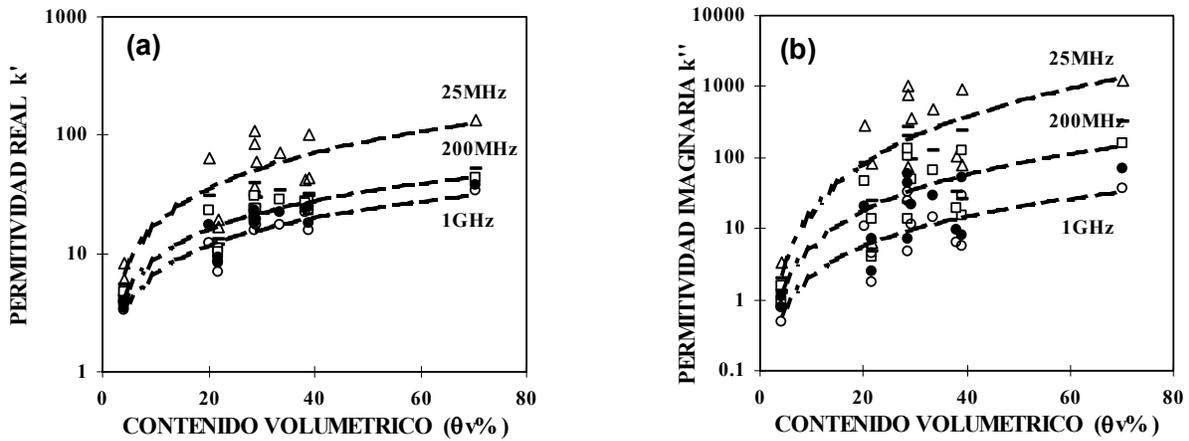


Figura 8: a) Permitividad dieléctrica real y b) Permitividad dieléctrica imaginaria.

Conductividad eléctrica

En el caso de suelos semisaturado, Rinaldi y Cuestas (2002), determinaron la siguiente expresión para el Índice de Resistividad F_s :

$$F_s = \frac{\sigma_w}{\sigma_s} = a n^{(p-m)} \theta_v^{-p} \quad (3)$$

donde σ_w y σ_s son la conductividad del fluido y de la muestra de suelo ; a y m son constantes y el parámetro p es una función del peso unitario seco γ_d y se determina por:

$$p = \gamma_d^{0.5} \quad (4)$$

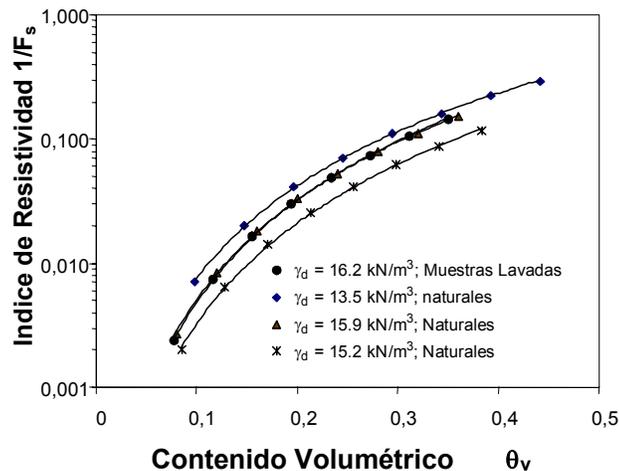


Figura 9: Relación entre el Índice de Resistividad y el contenido volumétrico de agua para distintas muestras de loess argentino.

En la Figura 9 se muestra la valoración experimental de estas relaciones (3) y (4). Las expresiones anteriores muestran que la relación entre la conductividad del suelo y el contenido volumétrico de agua, es una relación directa. Por lo cual para un sector de loess determinado donde la conductividad del fluido σ_w es posible asumirlo constante al igual que su densidad, la medición de la resistividad es un parámetro que sólo depende del contenido volumétrico de agua. Esta conclusión resulta de importancia para el monitoreo de frentes de propagación de agua mediante métodos geoelectrónicos por rotura de conductos de provisión del fluido, que tanto daño provocan.

RECOMENDACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN

Ensayos de campo

La velocidad de propagación a baja deformación y la resistencia a largas deformaciones dependen del confinamiento y de la humedad. A menor contenido de humedad es menor el efecto del confinamiento, y viceversa.

Los ensayos in-situ tradicionales como el SPT tienen serias limitaciones, pues la resistencia y la rigidez de los loess primarios dependen fuertemente del contenido de humedad a la que se realiza el ensayo, y no puede medir o evaluar la principal característica geotécnica de estos suelos. Asimismo, la estructura desmoronable del suelo se puede compactar dentro del sacamuestras, lo cual produce un incremento artificial de resistencia (Reginatto, 1971).

En la década de 1990 se han desarrollado ensayos in-situ específicos para determinar la colapsibilidad. Alguno de ellos se han aplicado en los loess colapsables (Terzariol y Abbona, 1999). Esto permite cuantificar el comportamiento en forma directa, con las ventajas de los métodos in-situ sobre los de laboratorio, y con la desventaja de los costos involucrados. En general, se los reserva para los casos en donde no es posible conservar la estructura de las muestras para ensayarlas en laboratorio. También ha habido intentos de empleo de métodos indirectos, como los geofísicos, empleando tanto ondas mecánicas como GPR (Rinaldi et al., 1998).

Ensayos de laboratorio

La caracterización del colapso de los loess se realiza desde hace varias décadas mediante ensayos edométricos, sobre muestras inalteradas. El empleo de propiedades índices produce resultados equívocos (Redolfi et al. 1986). El ensayo clásico, lo constituye el ensayo doble edométrico, realizado sobre muestras gemelas en condiciones de humedad natural y saturada. (Figura 10). En la práctica argentina se utiliza principalmente el ensayo edométrico en una sola probeta, realizado en estado saturado.

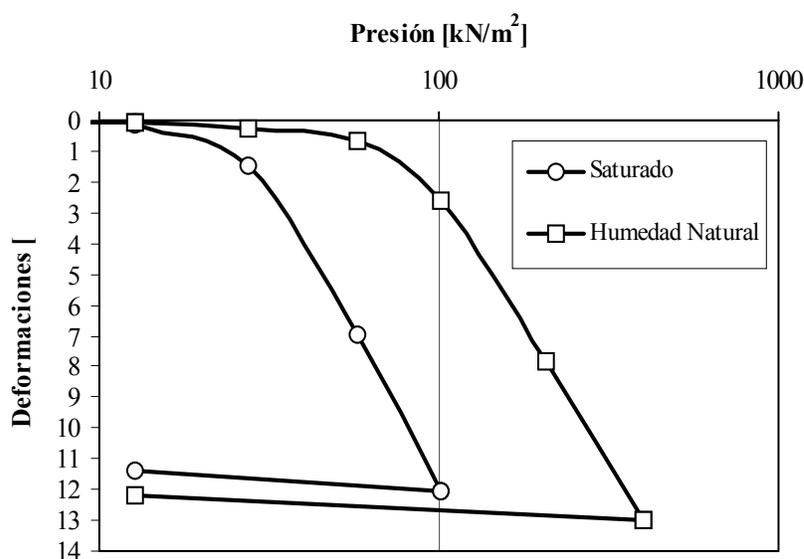


Figura 10: Ensayo doble edométrico o de compresión confinada a humedad natural y saturada.

La diferenciación entre los distintos tipos de comportamiento, autocolapsante y potencialmente colapsante, se puede hacer mediante el empleo de criterios de tipo deformacional o de tipo tensional. En la práctica argentina predomina este último. (Rocca et al., 1992; Redolfi y Oteo, 1994). Para valores menores a la presión de fluencia saturada, el suelo tiene un

comportamiento elástico, con baja deformabilidad y magnitudes pequeñas del colapso relativo. En cambio, para valores mayores a la presión de fluencia saturada el suelo tiene un comportamiento elasto – plástico y la magnitud del colapso relativo es alta.

Asimismo, se han estudiado en profundidad las variaciones del módulo de elasticidad tanto en materiales a humedad natural, como saturado (Claria y Rinaldi, 2000; Rinaldi y Claria, 1999; Rinaldi et al., 2001). Empleando una columna resonante, los valores obtenidos para el módulo de Poisson correspondientes a bajas deformaciones del loess indican valores de 0.31, independientemente de la presión de confinamiento y del contenido de humedad para muestras con grados de saturación inferiores al 70% (Claria y Rinaldi, 2004)

DESEMPEÑO DEL SUELO PARA EFECTOS DE DISEÑO Y DE CONSTRUCCIÓN

Depósitos preconsolidados de loess antiguos.

Estas formaciones de 30 a 45 m. de espesor se encuentran parcialmente saturadas por encima del nivel freático y saturadas por debajo de el mismo. Han sido generadas por distintos ciclos de ascenso y descenso del nivel del mar durante las glaciaciones. Este efecto de preconsolidación por desecación se reduce en profundidad. (Nuñez, 1975)

Sobre estos suelos es común que las estructuras transmitan presiones a través de bases aisladas de 300 a 600 kN/m² o a través de plateas con valores de 300 a 400 kN/m². Los ensayos de consolidación unidimensional no permiten definir adecuadamente el valor del módulo de compresibilidad aun cuando se los realice con doble ciclo, debido a las incertidumbres de definir el valor de preconsolidación. Es común predecir asentamientos mayores a los reales observados en las estructuras. Las fundaciones de las estructuras se calculan a rotura, utilizando los parámetros c_u y Φ_u obtenidos en ensayos triaxiales no drenados.

En los limos y arcillas preconsolidados es posible ejecutar excavaciones profundas con cortes verticales y reducidas estructuras temporarias de sostén. El estudio de algunas fallas indica que el suelo responde a las teorías establecidas para suelos cohesivos y suponiendo un agrietamiento del orden de la mitad de la profundidad del corte. Para formaciones típicas, la altura crítica es del orden de 20 metros. Los cortes sin sostén fallan al cabo del tiempo, por la generación de grietas. Las cuñas de rotura tienen un espesor del orden del 10 a 20% de la altura del corte, verticales en la parte superior y luego curvas. No se observan en general levantamientos en el fondo de la excavación.

Depósitos recientes de Loess (Fm. Cordobense)

Fundaciones directas de obras de arquitectura

Cuando los suelos son autocolapsables ninguna estructura fundada sobre ellos, tiene comportamiento satisfactorio.

Para realizar fundaciones directas en este tipo de formaciones pueden seguirse diversos caminos. El primero de ellos es la disminución de las posibilidades de colapso mediante el cambio o mejoramiento de las características intrínsecas de los suelos. Se logra por disminución de la porosidad (compactación hidráulica, dinámica, por voladuras, por hincas de pilotes, etc.), o el refuerzo de los vínculos entre partículas (silicatización, cocción, jet grouting, etc.) Otro camino es la minimización de las condiciones que favorecen el colapso de los suelos. Para ello se pueden adoptar medidas que impidan el humedecimiento del suelo (revestimiento de cañerías enterradas, veredas perimetrales, correcto diseño de desagües pluviales, etc.) o bien disminuir la presión actuante sobre el terreno. Finalmente el tercer camino es mitigar los efectos del colapso en las estructuras fundadas en estos suelos. Ello implica la adopción de medidas estructurales (encadenado de las fundaciones y muros, empleo de tabiques estructurales, estructuras isostáticas, etc.) o disminuir la carga litostática mediante aliviamientos por excavación.

Las compactaciones hidráulicas o dinámicas han mostrado buenos resultados para obras de gran escala y relativamente deformables como presas, caminos, etc. y efectos menos alentadores en el caso de obras puntuales como ser edificaciones arquitectónicas. En estas últimas, suele dar mejor resultado la adopción de medidas de diseño que minimicen el riesgo de ingreso de agua al terreno, o mejoras en el terreno mediante sustitución de suelo combinados con plateas que disminuyan significativamente las presiones en el suelo. El mejoramiento de suelos mediante inyección de productos químicos o la cocción han dado buenos resultados ante problemas localizados pero resultaron en general, onerosos. Por su parte, el empleo de rigidización de elementos estructurales o isostatizar estructuras son soluciones que han logrado controlar los daños (fisuras, distorsiones, etc.) y minimizar el riesgo de colapso estructural.

En muchas localidades, el aumento del nivel freático trae aparejado importantes asentamiento de las construcciones, debido al colapso y cuando baja el nivel freático (o se abate por bombeo), se generan asentamientos por variación de tensiones efectivas (Zeballos et al., 1999).

Fundaciones sobre pilotes

Con los antecedentes que tienen los suelos loessicos, existe una propensión a fundar las construcciones mediante pilotes. De esa manera se trata de evitar los asentamientos por colapso de la masa de suelo. Sin embargo, existen numerosos casos donde este tipo de solución no ha sido satisfactoria (Abbona et al., 1990).

El estudio más importante en este tema se ha realizado considerando las variaciones de la interfase entre el suelo loessico y el pilote (Redolfi y Oteo, 1992). La experiencia muestra que aún estructuras fundadas sobre pilotes han sufrido daños de importancia al colapsar el suelo que las rodea. Esta problemática está asociada a problemas de disminución de capacidad friccional, con la consiguiente transferencia de carga a la base del pilote y al fenómeno de fricción negativa, por un colapso generalizado de estratos de suelo autocolapsable.

La historia más probable de un pilote inmerso en un suelo colapsable, es la indicada en la Figura 11 (Redolfi y Oteo, 1992). En la misma se aprecia que, al humedecerse el suelo alrededor del pilote disminuye la capacidad friccional y la carga exterior comienza a transmitirse a la parte inferior del pilote. Esta transferencia de carga está asociada a una deformación del suelo subyacente y un asentamiento en el pilote. Si el humedecimiento se generaliza y el suelo autocolapsa, esa variación de deformaciones relativas genera una recarga en el pilote, con el correspondiente aumento de los asentamientos.

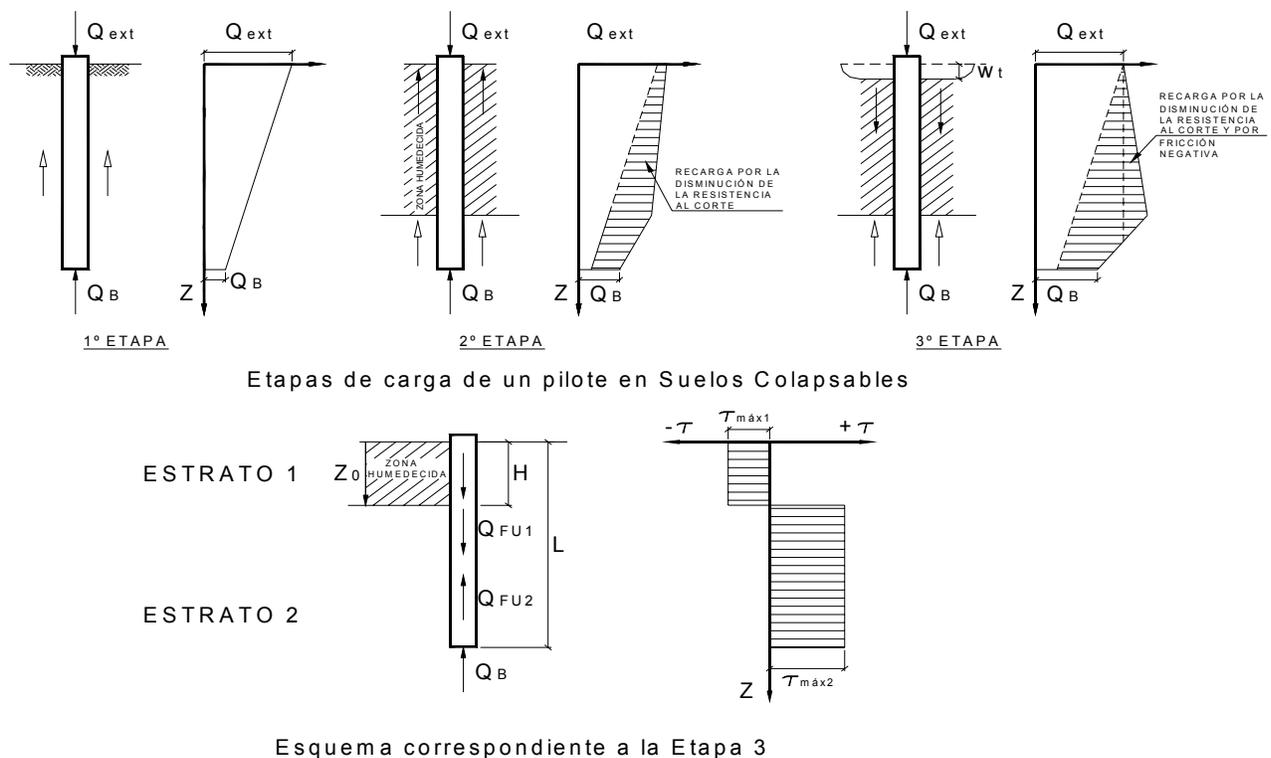


Figura 11: Variaciones tensionales de la interfaz entre el pilote y el suelo colapsable (Redolfi y Oteo Mazo, 1992).

En general, los pilotes tienen dimensiones mínimas controladas por los procesos constructivos, que no se compadecen con las reales necesidades resistentes. Es decir, pilotes con pequeña carga exterior resultan “sobredimensionados”, en especial en cuanto a su capacidad friccional, mientras que pilotes con elevada carga externa tiene dimensiones más acordes a sus necesidades estructurales y consecuentemente, una mayor compatibilidad entre capacidad friccional y de punta. Esta situación lleva a que, para el caso de humedecimientos localizados, en estructuras de baja carga fundadas sobre pilotes se vean seriamente afectadas al humedecerse el suelo lateral, ya que para transmitir la carga a los estratos inferiores deben sufrir asentamientos significativos. Por otra parte, estructuras con cargas más importantes, ante igual

situación, pueden mostrar un comportamiento menos comprometido, debido a que la carga ya está siendo tomada por la base del pilote y el incremento en la misma puede ser despreciable en términos de asentamientos. En cualquiera de las dos alternativas, el humedecimiento general de un estrato con la aparición de fenómenos de fricción negativa, lleva a problemas estructurales importantes. Por ello la elección de este tipo de fundación debe contemplar el tipo de edificación y su estructura, además de tomar medidas conducentes a minimizar el riesgo de ingreso de agua.

Fundaciones de conducciones, canales, presas y otras obras hidráulicas

Este tipo de obras es particularmente peligroso ya que transporta o almacena el agente que provoca el colapso del suelo, es decir el agua. En superficies lineales, se generan varios tipos de procesos erosivos superficiales que afectan obras de ingeniería, desde desagües hasta canales. En el caso de canales u obras lineales puede emplearse la presaturación del suelo por inundación. Hay que tener en cuenta las condiciones estratigráficas particulares a lo largo de la traza, tales como capas de distinta permeabilidad, etc, de manera que se cumplan los requisitos del diseño de la hidrocompactación (Nuñez, 1975). En la provincia de Córdoba existen antecedentes de canales construidos en este tipo de suelos (Moll et. Al., 1979). En los mismos se emplearon técnicas de sustitución de suelo (excavación y compactación con adición de cementantes) con resultados relativamente buenos. Las fallas se detectaron por la formación de erosiones tubificadas por debajo del canal relacionadas a la falta de control del flujo superficial del agua externa al mismo.

Las estructuras construidas a lo largo del canal deben proyectarse de manera que sus fundaciones no se vean afectadas, o tomar los requerimientos para mitigar el problema. Para puentes es común el uso de pilotes y presaturación debajo de los terraplenes de acceso. Las obras de conexión al canal deben estar preparadas para asentamientos diferenciales, con uniones flexibles o juntas adecuadas. Son necesarias cunetas de guarda que controlen los procesos erosivos y la ejecución de obras de arte en la zona de paso de agua de una margen a la otra del canal.

En el caso de tubos conductos y obras conexas a las observaciones del apartado anteriores para obras lineales, hay que agregar el comportamiento estructural de los conductos. Algunos de ellos carecen de resistencia a las fuerzas de tracción que se generan en los vértices de cambio de dirección, cámara de válvulas, etc. Por esa razón se establecen puntos fijos que sean capaces de resistir grandes fuerzas laterales, como pilotes de gran diámetro, o en casos considerar el reemplazo o tratamiento del suelo colapsable. En la ciudad de Córdoba, recientemente se han construido conductos de abastecimiento de agua y de desagües pluviales en zonas afectadas por suelos colapsables. Las soluciones de fundación, han contemplado desde el empleo de pilotes en las cámaras y zonas de empalme, hasta colocar suelo muy permeable a modo de dren, rodeando la cañería dentro de un envoltorio de material geotextil impermeable, con cámaras de control que permitiesen la detección temprana de pérdidas, antes que las mismas afecten el suelo natural. En cualquier caso, ha resultado más conveniente el empleo de cañerías de tramos rígidos que no precisan una fuerte colaboración del suelo circundante para tomar los esfuerzos externos, pero con juntas flexibles (water stop) que permiten un cierto acomodamiento de las mismas sin pérdidas de fluido.

Para el caso de obras de almacenamiento (cisternas, tanques, etc.), se han empleado con buen resultado fundaciones profundas combinadas con medidas que permitan observar el estado de la obra a lo largo de su vida útil. Para ello se han ejecutado compartimientos interconectados debajo de la cisterna para verificar posibles pérdidas del piso de ella y sistemas de captación laterales para detectar pérdidas en las paredes o juntas.

En el caso de presas de embalse y estructuras conexas, cuando se fundan sobre suelo loessico, es necesario prevenir los asentamientos que se producirán al llenar el reservorio. Si el espesor de suelo es relativamente pequeño, lo mas económico será su remoción y reemplazo por el suelo compactado. Si el espesor es considerable, se procede a la hidrocompactación de la fundación. El principal problema será la predicción de los asentamientos y movilización de la resistencia al corte para el diseño de la presa. En Argentina existen experiencias que se remontan a la década de 1960 cuando se construyó la presa de río Hondo, emplazada en la región loessica chaqueña, donde se realizaron investigaciones sistemáticas sobre la dotación de agua, períodos de aplicación, estudios de las características de compresibilidad y resistencia al corte (Moretto et al., 1963).

Suelos loessicos como material de construcción

Cuando los suelos loessicos son empleados como material de construcción, pierden su estructura y se comportan como suelos limosos en condiciones no saturadas. Su resistencia en términos de presiones totales es una función del grado de saturación (Nuñez, 1975). Si bien el módulo de deformación varía con la humedad, no presenta problemas de colapso. Cuando están compactados exhiben buenas características de resistencia y poca deformabilidad. Esto posibilita

su utilización en terraplenes para caminos, rellenos o para la construcción de presas de tierra. Una de las limitaciones es el contenido de sales que puedan deflocular la fracción arcillosa.

La gama de problemas ingenieriles descripta, señala la trascendencia de una buena caracterización de las características del comportamiento colapsable de los loess. De su resultado dependerá el buen desempeño futuro de las obras.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo compila algunas investigaciones realizadas con el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba y de la Agencia Córdoba Ciencia.

REFERENCIAS

- Abbona P.V., Terzariol R.E. y Redolfi E.R. (1990) "Fallas de Viviendas Fundadas con Pilotes Cortos en Loess", *XI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*, Vol. II, pp. 198-212.
- Alonso E.E., Gens A. y Josa A. (1990) "A Constitutive Model for partially saturated soils". *Geotechnique*, Vol. 40, No 3, pp. 405-430.
- Bolognesi A.J. (1975). "Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano", *V Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Vol. V, pp. 253-300.
- Bolognesi A.J. y Moretto O. (1957). "Properties and behavior of silty soils originated from loess formation.", *V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol. 1, pp. 9-12.
- Clariá J.J. y Rinaldi V.A. (2000). "Velocidad de onda en loess compactado e inalterado en estado de compresión confinada", *XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Vol. 1, pp. 123-132.
- Clariá J.J. y Rinaldi V.A. (2004). "Relación de Poisson en loess inalterado determinado mediante análisis multimodal", *XVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Vol. 1, pp.185.
- Iriondo M.H. (1997). "Models of deposition of loess and loessoids in the upper quaternary of South America", *Journal of South America Earth Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 71-79.
- Krohling D.M. (1999). "Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa, Argentina", *Quaternary International*, Vol. 62, pp. 49-55.
- Moll L.L. (1975). "Análisis del problema de los suelos colapsables", *V Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Sesión Suelos Especiales, Vol. V, pp.359-368.
- Moll L.L., Ruscalleda A.E., Redolfi E., Quiroga R. y Marchetti C. (1979). "Experiencias de compactación de estratos en suelos colapsables", *VI Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lima, Vol. II, pp. 433-448.
- Moll L., Rocca R. y Terzariol R. (1988). "Loess soils: engineering practice in Argentina", *International Conference of Special Problems on Regional Soils*, Beijing, Intl. Academic Publ. pp. 283-289.
- Moll L.L. and Rocca R.J. (1991). "Properties of loess in the center of Argentina", *XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Viña del Mar, Chile, Vol. I, pp. 1-14.
- Moretto O., Bolognesi A.J.L., López A. y Núñez E. (1963) "Comportamiento de un suelo limoso de baja plasticidad". *II Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sao Pablo-Rio de Janeiro-Belo Horizonte. Vol. II, pp. 131-146.
- Núñez E. (1975). "Suelos Colapsables y preconsolidados por desecación", *V Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Vol. IV, pp. 43-73.
- Núñez E., Micucci C.A., Vardé O.A., Bolognesi A.J.L. y Moretto O. (1970). "Contribución al conocimiento de los suelos loessicos", *II Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*, Vol.1, pp 10.
- Quintana E. y Redolfi E.R. (2001). "Evaluation of Pozzolanic Activity of Pampean Loess", *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul. Vol. 1, pp. 243-246.
- Redolfi E.R., Rocca R.J. y Terzariol R.E. (1986) "Estudio comparativo de diferentes métodos para evaluar el potencial de colapso en suelos loessicos argentinos", *Simposio Argentino de Suelos Colapsables*, Vol. 1, pp.46-66.
- Redolfi, E.R. y Oteo Mazo, C. (1992). "A Model of pile Interface in Collapsible Soils", *VII International Conference on Expansive Soils*, Texas, Vol. 1, pp. 483-488.
- Redolfi, E.R. y Oteo Mazo, C. (1994). "Relative Collapse of a Loess Soil", *XIII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, New Delhi, India, Vol. 3, pp.1119-1122.
- Reginatto A. (1971) "Standard Penetration Test in collapsible soils". *IV Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Puerto Rico. Vol. II, pp. 77-84.
- Reginatto A. y Ferrero J.C. (1973) "Collapse potential of soils and soil-water chemistry", *VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol. 2.2, pp. 177-183.

- Rinaldi V.A., Redolfi E.R. y Santamarina (1997) "Propiedades dieléctricas del loess y su influencia en las mediciones con georadar", *XIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Vol 1, pp.10.
- Rinaldi V.A., Redolfi E.R. y Santamarina J.C. (1998). "Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing", en: Robertson and Mayne Eds., *Geotechnical Site Characterization*, Balkema. Rotterdam, Vol. 1, pp. 581-588.
- Rinaldi V.A. y Clariá J.J. (1999). "Low strain dynamic behavior of Collapsible soil", *XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 835-841.
- Rinaldi V.A. y Francisca F.M. (1999) "Impedance Analysis of Soil Dielectric Dispersion (1 MHz-1 GHz)". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No 2, pp. 111-121.
- Rinaldi V.A., Clariá J.J. y Santamarina J.C. (2001) "The small strain shear modulus (G_{max}) of Argentinean loess". *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Vol.1, pp. 495-499.
- Rinaldi V.A. y Cuestas G. (2002) "The Ohmic conductivity of compacted silty clay". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No 10, pp. 824-835.
- Rocca R.J., Reginatto A. y Redolfi E. (1992). "Determination of collapse potential of soils". *VII International Conference on Expansive Soils*, Texas, Vol. I, pp. 73-77.
- Sayago J.M., Collantes M.M., Karlson A. y Sanabria J. (2001). "Genesis and distribution of the Late Pleistocene and Holocene loess of Argentina: a regional approximation". *Quaternary International*, Vol. 76/77, pp. 247-257.
- Scheidig A. (1934). *Der loess un seine geotechnischen eigenschatten*. T. Steinkopff. Dresden, 233 pp.
- Teruggi M.E. (1957). "The nature and origin of Argentina loess", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 27, pp. 322-332.
- Teruggi M.E. y Imbellone P.A. (1992). "Loess deposits and palaeosols of the Argentine Pampa", en E.Derbyshire Ed. *Loess and the Argentine Pampa*. Leicester U., Occasional Paper 23, pp. 6-11.
- Terzariol R.E. y Abbona P.V. (1999). "Determinación del Potencial de colapso mediante ensayos in-situ", *XI. Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Iguazú, Vol. I, pp. 201-207.
- Terzariol R., Redolfi E., Rocca R y Zeballos M.(2003). "Modelo de flujo no saturado aplicado a suelos loessicos", *XII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Boston, Vol. I, pp.1317-1322.
- Zárate M.A. (2003). "Loess of southern South America", *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 1987-2006.
- Zeballos, M.; Redolfi, E. y Blundo, M. (1999) "Settlement generated by fluctuation in the freatic level". *XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Iguazú, Vol II, pp. 999-1005.
- Zeballos M., Redolfi E.R., Terzariol R y Rocca R. (2002). "Characterization of the permeability of the loessic soils in the center of Argentina". *IIIrd International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, Vol. I, pp. 401-404.