



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ARQUEO POR DESECACIÓN EN ARCILLAS

Treball realitzat per:

Andres Eduardo Blanco Torrell

Dirigit per:

Pere Prat Catalan

Alberto Ledesma Villalba

Josbel Cordero Arias

Grau en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, **octubre 2020.**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental.

TREBALL FINAL DE GRAU

Abstract

The analysis of soil behavior, more specifically the phenomenon of curling that occurs during drying processes, has gained importance in the last decade due to the fact that it involves the study of a phenomenon which has not been deeply studied yet. However, as it will be seen in this essay, curling has a significant effect in the final behavior of the soils. The analysis of different types of samples in controlled environmental conditions in the laboratory will help to understand the soil's drying process or, in other words, soil water evaporation with time, which is a complex behavior, without any human intervention. Curling is a mechanism that occurs when the shrinkage process starts, ending up in a concave or convex shape, which will depend on certain factors (Kodikara et al, 2004; Bui et al, 2019) that will be profoundly analyzed in the following chapters. The experimental study is focused on analyzing the samples by an exhaustive and periodical monitoring, which will be conveniently organized in order to determine which parameters have consequences in the development of this process. Furthermore, a study of the soils' characteristics will be carried out in order to have a better knowledge about the material properties that will be used along the experimental process.

Resumen

El estudio del comportamiento de suelos, más específicamente el fenómeno que ocurre en el proceso de desecación denominado arqueo, ha ganado importancia en el transcurso de la última década ya que supone el análisis de un fenómeno del cual no se posee un conocimiento tan profundo. Sin embargo, como se verá a continuación, posee un efecto crucial en el comportamiento final de los suelos. El análisis de diferentes tipos de muestras en condiciones ambientales controladas dentro del laboratorio ayudará a profundizar la comprensión del proceso de desecación o, en otras palabras, la pérdida de humedad sin intervención alguna del hombre y que se desarrolla de una forma complicada, ya que está asociada a una deformación compleja. El arqueo, concepto que también es conocido como “curling” derivado del inglés, es un mecanismo que ocurre en el transcurso de la retracción del suelo, cuando la muestra adopta una forma de arco, ya sea cóncava o convexa, dependiendo de ciertos factores (Kodikara et al, 2004; Bui et al, 2019) que serán posteriormente explicados con mayor detalle. El estudio experimental se centra en analizar las muestras a través de una observación exhaustiva y un seguimiento periódico, el cual será tabulado convenientemente con el fin de determinar de qué modo y que parámetros están implicados en el desarrollo de este fenómeno. Además, se estudiarán las características de los suelos, para así conocer más acerca de las propiedades de los materiales con los que estaremos tratando a lo largo del proyecto.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis tutores Josbel Cordero, Pere Prat y Alberto Ledesma por haber realizado un trabajo fantástico, haberme ayudado a enfrentar este trabajo tan importante tanto para mi carrera profesional, como a lo personal, demostrando un interés e implicación enorme desde el primer momento que se me adjudicó el tema hasta el último día, tanto en las instalaciones de la universidad como a partir de un seguimiento a distancia debido a los inconvenientes que se produjeron a causa del Covid-19.

Gracias a toda mi familia que me apoya en todo momento, a mi madre, mi hermano que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme y han sido indispensables durante la elaboración del proyecto.

Gracias a la Sección de Ingeniería del Terreno del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental por haberme brindado y ayudado en todas las cuestiones que he necesitado durante este trabajo. A todos los compañeros del laboratorio, por ser tan amables y haberme ayudado a adaptarme al ambiente de trabajo que se encuentra en las instalaciones de los laboratorios.

A los docentes y a mis amigos, que han sido en gran parte un pilar importante en la formación de mis estudios en la universidad desde el primer momento de llegar como a estas altura.

Andrés Blanco Torrell

Barcelona, Septiembre 2020.

Índice

ABSTRACT	i
RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Objetivo.....	2
1.3.- Metodología.....	2
1.4.- Complejidad y Variabilidad.....	2
CAPÍTULO 2.- ESTADO DEL ARTE.	4
2.1.-Descripción de los suelos arcillosos.....	4
2.1.1- Contexto y aplicaciones.....	4
2.1.2- Mineralogía.....	5
2.1.3.- Estructura.....	6
2.1.4.- Tipos de arcilla.....	6
2.1.4.1.- El caolín.....	7
2.1.4.2- La bentonita.....	8
2.1.5.- Propiedades físico-químicas de la arcilla.....	10
2.2.- El fenómeno del arqueo.....	11
2.2.1.- Concepto.....	11
2.2.2.- Factores influyentes.....	11
2.2.3.- Procesos.....	12
CAPÍTULO 3.- INVESTIGACIÓN SOBRE EL ARQUEO DE SUELOS BASADO EN PUBLICACIONES CIENTÍFICAS.	13
3.1.- Artículos documentados.....	13
3.2.- Ensayos.....	15
3.2.1.- Suelos.....	15
3.2.1.1.- Arcilla Werribee.....	15
3.2.1.2.- Arcilla del norte de Altona.....	15
3.2.1.3.- Caolín de NY.....	16
3.2.2.- Instalación.....	17
3.2.3.- Resumen de ensayos realizados.....	18
3.2.3.1.-Arcilla Werribee.....	18
3.2.3.2.-Caolín.....	18
3.2.3.3.-Arcilla del norte de Altona.	19
CAPÍTULO 4.- ENSAYOS DE LABORATORIO	20
4.1.- Suelos.....	20
4.2.- Propiedades físicas.....	21
4.2.1.- Límites de Atterberg.....	21
4.2.1.1.- Límite líquido.....	21
4.2.1.2.- Límite plástico.....	23
4.3.- Instalación.....	24
4.4.- Ensayos.....	26
4.4.1.- Mezclas de arcilla pura. (Ensayos 1-4).....	26
4.4.2.- Mezclas con proporciones arcilla/arena. (Ensayos 5-10).....	29

4.5.- Cálculo del contenido de agua inicial (%) de las muestras.....	32
4.6.- Cálculo del contenido de agua durante el proceso de secado de las muestras.....	34
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	35
5.1.-Introducción.....	35
5.2.- Pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo.....	35
5.3.- Retracción por secado en las muestras.....	41
5.3.1.- Retracción en el eje y.....	41
5.3.2.- Retracción en el eje x.....	46
5.3.3.- Deformación volumétrica.....	50
5.4.- Análisis cualitativo del arqueo.....	52
5.4.1.- La humedad o contenido inicial de agua de las muestras.....	54
5.4.1.1.- Caolín.....	54
5.4.1.2.- Arcilla Werribee.....	56
5.4.1.3.- Bentonita.....	57
5.4.1.4.- Comparación.....	59
5.4.2.- Las condiciones ambientales.....	62
5.4.2.1.- Arcilla Werribee.....	62
5.4.2.1.1.- La temperatura.....	62
5.4.2.1.2.- La humedad relativa.....	64
5.4.3.- La micro y la macroestructura de las mezclas.....	67
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	75
6.1.- Conclusiones.....	75
6.1.1.- Retracción.....	75
6.1.2.- Arqueo.....	75
6.2.- Recomendaciones.....	77
CAPÍTULO 7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
CAPÍTULO 9.- ANEXOS.....	80

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción.

En la desecación de los suelos, por lo general, ocurre una retracción que provoca una reorganización de las partículas y como consecuencia, un cambio en el estado de tensiones del suelo (Zielinski et al., 2014). A medida que el suelo pierde agua por la desecación se pueden producir fisuras y arqueado de la muestra o incluso en la naturaleza se llega a ver que de las grietas y el arqueado se forma una especie de costra superficial.

El comportamiento mecánico de los suelos posee una dependencia lineal de ciertos factores físicos y químicos que han sido estudiados en el campo de la Ingeniería del Terreno durante décadas. Muchos autores han intentado predecir la conducta de los mismos a través de métodos empíricos, no obstante, aún no existe un método general preestablecido para la predicción de estos patrones. Para algunos de los entendidos en la materia, el proceso del arqueado cada vez posee una mayor importancia debido al peso que están teniendo los cambios de las condiciones ambientales que la tierra está experimentando a causa del cambio climático, en donde la temperatura aumenta de manera significativa, aumentando el riesgo en elementos donde el fenómeno del arqueado no se haya tenido en cuenta (Al-Jeznawi et al., 2019).

En la mayoría de los suelos se produce un mecanismo que ocurre en el transcurso de la retracción del suelo en donde la muestra del mismo adopta una forma de arco, tras padecer otros fenómenos como la fisuración. Específicamente se estudiará el proceso de desecación de los tipos de arcillas más comerciales, la Bentonita y el Caolín, enfocándose concretamente en el fenómeno del arqueado. Además, una serie de arcillas (arcilla de Werribee, Australia; caolín de NY y arcilla de Altona North) serán estudiadas a partir del análisis de documentos realizados por otros autores.

Todas las deformaciones que presente el suelo en cuestión tendrán efectos en las características del mismo; la permeabilidad, la retención de agua, la compresibilidad y la resistencia son algunos de estas características que se verán afectadas al pasar por estas series de alteraciones (Al-Jeznawi et al., 2019).

Por otro lado, el “curling” se verá influido por ciertos parámetros como la distribución del tamaño de partículas, la dimensión de las muestras que está directamente relacionada con las dimensiones de los moldes, las condiciones de contorno, el tipo de arcilla, el contenido de sales, entre otros (e.g. Ward, 1923; Kindle, 1917, 1923; Bradley et al., 1933; Minter, 1970; Zielinski et al., 2014).

1.2.- Objetivos.

El presente trabajo de final de grado tiene como objetivo principal analizar el arqueado por desecación en una serie de mezclas arcillosas y estudiar la relación que existe tanto de las propiedades físico-químicas de los suelos como de los factores o condiciones externas con la intención de ampliar el conocimiento relacionado con la respuesta de los

mismos. Por otra parte, se intentará establecer una relación del efecto que producen unas deformaciones sobre las otras a lo largo del proceso de secado de manera que se pueda adquirir un mejor conocimiento de la conducta de estos tipos de materiales tan comunes de encontrar en el campo de la Ingeniería civil.

Las actividades a desarrollar para cumplir el objetivo principal están relacionadas, por una parte, con el estudio de artículos científicos realizados por una serie de autores externos y, por otra parte, el análisis de datos obtenido a partir de la ejecución de ensayos basados en los artículos documentados. Como objetivos secundarios, que se podrían entender como la ampliación o la continuación del presente trabajo, se plantean ideas de cómo se podrían obtener unos resultados más precisos y representativos del comportamiento de las muestras.

1.3.- Metodología.

Para poder realizar un correcto desarrollo del presente trabajo se recurre a la complementariedad de diversos recursos que van desde una descripción y mineralogía de los materiales, hasta enfocarse en cómo se han venido realizando los diferentes ensayos y estudios a lo largo de los años por parte de diversos de autores para tratar de obtener respuesta al complejo comportamiento, en términos de retracción y arqueo, de los suelos arcillosos propuestos para el trabajo y que, hasta ahora, no se ha definido completamente, para finalizar con una pequeña aportación o interpretación a lo que se ha venido estudiando a lo largo del último siglo.

El trabajo se dividirá siguiendo un orden en donde en primer lugar se explicarán las propiedades y características de los materiales que se usarán en los experimentos. En segundo lugar, el método o procedimiento que se realizará con el fin de poder ejecutar los ensayos de laboratorio. Más adelante, se presentarán y discutirán los resultados y, finalmente, las conclusiones principales del trabajo.

1.4.- Complejidad y Variabilidad.

Como se ha mencionado anteriormente, el fenómeno del arqueo se presenta de una manera muy compleja y es, por tanto, indispensable un análisis exhaustivo pero simple, con datos válidos y congruentes para obtener un resultado significativo y que pueda acrecentar la información acerca del comportamiento de los suelos arcillosos.

La dificultad de estudiar la respuesta de los suelos, además de muchas otras características, viene dado debido a que representan un sistema multifases, con la posibilidad de que cada fase se presente en diferentes estados. Cuando, además, nos enfrentamos al estudio de suelos arcillosos, este puede pasar fácilmente de una fase totalmente extrema a otra y, a su vez, cambiar todas las características físicas. (Levatti, 2012)

El estudio del proceso de desecación y del arqueo es complejo y muy sensible a pequeños cambios de cualquier característica. Por lo tanto, unos de los grandes desafíos de este proyecto es intentar que las condiciones se mantengan durante todo el proceso,

que las proporciones sean las definidas con un margen de error ínfimo, evitar impurezas en las muestras que puedan tener consecuencias en el estudio y realizar un proceso metódico y simple el cual sea fiable.

Otra complejidad es la disponibilidad y efectividad que existe al momento de realizar los ensayos experimentales, dado que al ser ensayos con proporciones, condiciones y equipos que requieren precisión, el error humano juega un papel fundamental y, por tanto, es importante tenerlo en cuenta al momento de llegar a las conclusiones finales.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1.-Descripción de los suelos arcillosos.

2.1.1.- Contexto y aplicaciones.

La arcilla se define como una serie de minerales originados en un proceso natural que perdura decenas de miles de años, que reúnen características peculiares y que han venido siendo usadas desde la prehistoria por el ser humano como una herramienta muy efectiva en muchos ámbitos, ya sean de construcción (véase figura 1), producción de cerámicas, medicina, cosmética; debido a las propiedades que posee tanto cuando está en contacto con el agua como el comportamiento cuando sufre el proceso de desecación, además de ser muy simple de emplear y de obtener. A lo largo de los años, el beneficioso uso de este material no ha cambiado, así como el interés de adquirir un mayor conocimiento acerca del comportamiento del mismo tampoco lo ha hecho.

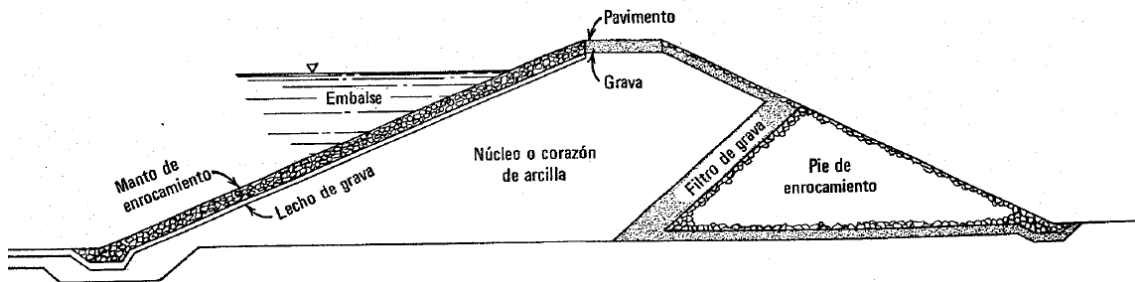


Figura 1. Presa de tierra con núcleo de arcilla. (Lambe y Whitman, 1969)

El conocimiento de la naturaleza, así como de la estructura de la arcilla, empezó a progresar hacia el principio del siglo pasado, gracias a un avance en el conocimiento acerca de los rayos X, que dieron lugar a la cristalografía por difracción de rayos X (ley de Bragg) para sólidos en estado cristalino, el cual permite obtener información acerca de la estructura interna de los materiales, en posición y tipo de átomos encontrados en el camino. Por otra parte, no fue sino hasta 1931, gracias al físico alemán Ernst Ruska y su diseño del primer microscopio electrónico, que fue necesario para poder examinar los tamaños tan ínfimos de sus partículas, que se pudo observar directamente los cristales minerales, su forma y su geometría. La tabla 1 presenta diferentes sistemas de clasificación del suelo según su tamaño de partícula.

Existen gran cantidad de aplicaciones masivas de las arcillas relacionadas con la actividad sobre el terreno. Los suelos arcillosos, específicamente ciertos tipos, se utilizan como lodo bentonítico para soportar las paredes de las excavaciones, para crear membranas impermeables en la construcción o en material de sellado, en los tratamientos de suelos, en la estabilización y soporte de la construcción de túneles, como sellado de capas de vertederos o residuos nucleares, entre muchas aplicaciones.

Una pequeña anécdota de la gran importancia del uso de la arcilla se presenta después de que una de las catástrofes más importantes de la historia ocurriese en Chernóbil, Ucrania; unas de las medidas usadas para prevenir que este desastre continuará expandiéndose fue la utilización de toneladas de arcilla roja por científicos rusos con el fin de evitar que las radiaciones se siguieran extendiendo a lo largo de sus alrededores.

NOMBRE DE LA ORGANIZACIÓN	TAMAÑO DE PARTÍCULAS en mm			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	≥2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	≥2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.003
American Association of State Highway and Transportation (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.004
Unified Soil Classification System (US)	75 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (limos y arcillas) < 0.075	

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo, según diferentes sistemas existentes. (Das, 1998)

2.1.2.- Mineralogía.

La formación de los minerales que se encuentran en la estructura de las arcillas proviene de la consolidación del magma, es decir, se originan a alta temperatura con una estructura desordenada pasando, por enfriamiento, a un estado más ordenado de menor temperatura. La arcilla surge de la meteorización de rocas con alto contenido de feldespato, como por ejemplo el granito. Por esta razón, se consideran como constituyente esencial de gran parte de los suelos y sedimentos.

Físicamente se consideran un coloide, de partículas extremadamente pequeñas, con diámetro inferior a 0.002mm aproximadamente y, además, se caracteriza por tener una superficie lisa.

La arcilla es un mineral del grupo filosilicatos que se definen como agregados de silicatos de aluminio hidratados derivados del proceso de descomposición de distintos minerales. Esto quiere decir que desde un punto de vista químico, está compuesta por elementos como el silicio (Si), el aluminio (Al), el oxígeno (O) y el hidrógeno (H).

Para entender cómo se origina este material es indispensable conocer las propiedades de los feldespatos. Los feldespatos se definen como un grupo de minerales tectosilicatos, es decir, se basan en un esqueleto de tetraedros de SiO₄ unidos entre sí compartiendo oxígenos, formando un armazón tridimensional con enlaces fuertes; formados por silicatos dobles de aluminio, calcio, sodio y potasio. Este grupo corresponde a uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre presentes en un 60% de las rocas terrestres.

Se conoce que los minerales arcillosos, tales como la montmorillonita y la caolinita, son responsables de la plasticidad de los suelos. Las propiedades de la montmorillonita están determinadas en gran medida por el tamaño y carga de los cationes fijados entre las capas elementales formadas por tetraedros de sílice y octaedros de alúmina. Así, las montmorillonitas hidrogenadas y sódicas son muy expandibles; las de

calcio y magnesio presentan una expansibilidad moderada; y los cationes de amonio tienden a estabilizar el espaciamento debido a su tamaño igual al espacio entre los bloques de sílice. (Spangler & Handy, 1982)

2.1.3.- Estructura de las arcillas.

Generalmente todos los tipos de arcillas tienen una estructura relativamente similar aunque no del todo. Es importante tener en cuenta la manera en la que está ordenada la estructura atómica de una arcilla. Su estructura consiste básicamente de una red octaédrica y una tetraédrica. La red octaédrica está comprendida de oxígeno e hidroxilo, los cuales rodean átomos de aluminio, hierro y magnesio ordenados en una manera octaédrica. Por otra parte, la red tetraédrica de silicio, en la cual el átomo de silicio es equidistante de cuatro átomos de oxígeno o hidroxilos, con el átomo de silicio en el centro. El arreglo de estas dos cadenas y su composición son las variables que más influyen en los distintos comportamientos de las arcillas (Murray, 2007). La representación gráfica de los mencionados arreglos se puede ver en la Figura 2.

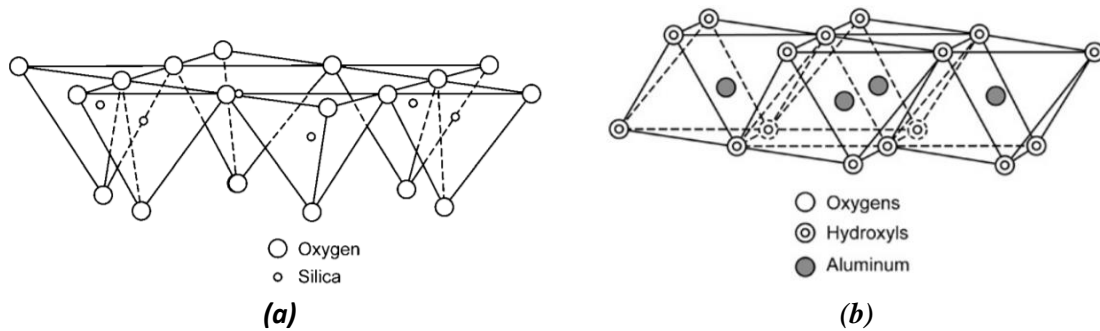


Figura 2. Representación gráfica de a) tetraedro de silicio. b) Octaedro de alúmina. (Murray, 2007)

2.1.4.- Tipos de arcilla.

Las arcillas se clasifican dependiendo de según como se encuentren en la naturaleza:

- Arcillas primarias, las cuales se depositaron en la misma cuenca de la roca madre, es decir, aquellas que no han sufrido ningún proceso de transporte a lo largo del tiempo desde la meteorización de la roca. Hasta el día de hoy solo se conoce de una única arcilla primaria pura, denominada caolín.
- Arcillas secundarias, consideradas como las más comunes ya que se forman a partir de la descomposición y el transporte de las rocas de origen que se sedimentan y trasladan por fuerzas físicas o químicas.

La tipología de este material viene definida basándose en una gran cantidad de variables que podemos encontrar en ellas: la plasticidad, la proporción y tipo de impurezas, punto de fusión, entre otras. Esta clasificación es debida a que las arcillas surgen a partir del proceso de descomposición de formaciones rocosas y, además, por la acción de otros factores como movimientos sísmicos o por la acción de la erosión. No obstante, el color y las diferentes impurezas de origen mineral también vienen dadas debido al proceso de transporte que sufren a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se pueden definir una innumerable cantidad de tipos de arcilla, ya que cada una de ellas posee características particulares.

Por otra parte, las arcillas se dividen en 3 grandes grupos dependiendo de la estructura reticular que esta posea. Se dividen en caolinita, montmorillonita e ilita. Las dos tipologías de arcillas que se analizarán con mayor detalle a lo largo del proyecto serán Caolín y Bentonita, son arcillas comerciales derivadas del grupo de la caolinita y de la montmorillonita respectivamente.

2.1.4.1.- El Caolín.

El caolín está formado normalmente por minerales (filosilicatos) de la dickita, nacrita, la halloysita pero principalmente de caolinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). La caolinita está formada por una lámina tetraédrica silícica y otra octaédrica alumínica, las cuales se superponen indefinidamente creando cadenas. La Figura 3 muestra el diagrama de la estructura de la caolinita. La unión entre todas las retículas es tan firme como para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción) y por tanto es una de la tipología de las arcillas más estables ante la acción del agua. El tamaño de grano es relativamente grande y grueso en comparación con la bentonita y por tanto presenta una baja plasticidad. Teóricamente, la composición química de una caolinita es de SiO_2 , 46.54%; Al_2O_3 , 39.50%; and H_2O , 13.96%.

Por otro lado, se define como una arcilla primaria, aunque también se pueden encontrar caolines secundarios, y es el mineral de arcilla más común de tipo silicato básico de aluminio. Debido a no haber padecido ningún tipo de transporte del lugar del yacimiento, posee muy poco contenido de impurezas en su composición. El contenido de Sílice y Alúmina es considerablemente alto y por tanto esta tipología presenta una elevada resistencia térmica (alrededor de los 1800 grados centígrados).

En los ensayos realizados por otros autores, lo cuales se explicarán más adelante se utilizará un caolín que, según rayos X, posee un porcentaje de 97% caolinita, un tamaño de partícula de 1.36mm y un peso específico de 2.65Mg/m³.

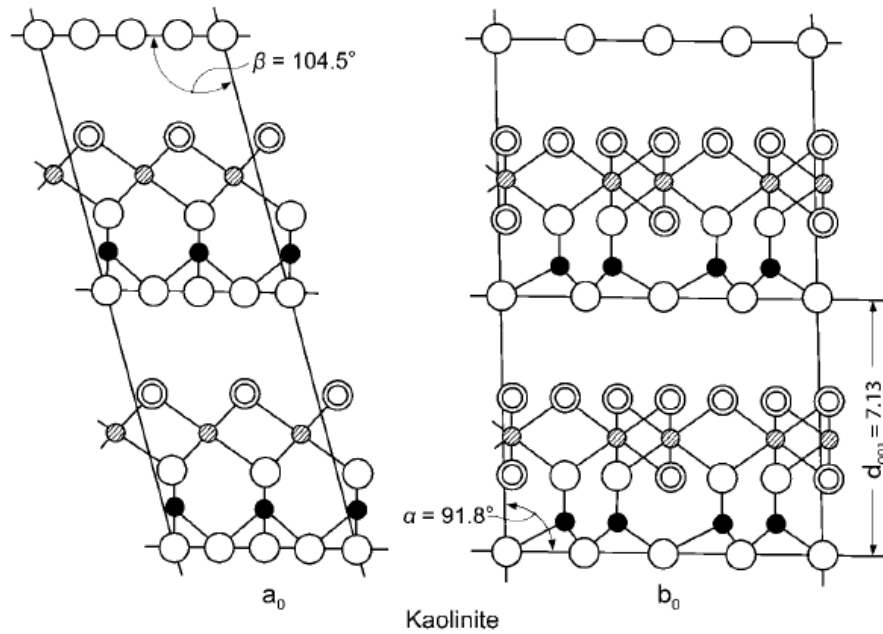


Figura 3. Diagrama de la estructura de la caolinita. (Murray, 2007)

2.1.4.2.- La bentonita.

La bentonita o arcilla activa es una tipología de origen volcánico de grano muy fino constituida principalmente en minerales de esmécticas $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$, normalmente montmorillonita sódica o cálcica. Grim y Guven (1978) usaron el término bentonita para cualquier tipo de arcilla principalmente la formada del mineral de esmectita sin tener en cuenta su origen. Los minerales de la esmética están compuestos de dos cadenas de tetraedros de silicio con una red central de octaedros. Las moléculas y cationes ocupan el espacio interlaminar entre las cadenas. La Figura 4 muestra el diagrama de la estructura de la esmectita.

Debido a la gran importancia que tiene su uso en muchas actividades de diferentes sectores e industrias, la arcilla bentonítica ha sido profundamente analizada y sus propiedades están bastante definidas. Normalmente suele tener una composición química principalmente de Óxido de Sílice, Aluminio y Hierro, además, existe una pequeña proporción de Óxido de Sodio, Magnesio, Calcio, Potasio y volátiles. Por otra parte, mineralógicamente hablando, está constituida mayoritariamente de Montmorillonita (alrededor de un 85%), el resto se divide en Calcita, hierro y Pirita.

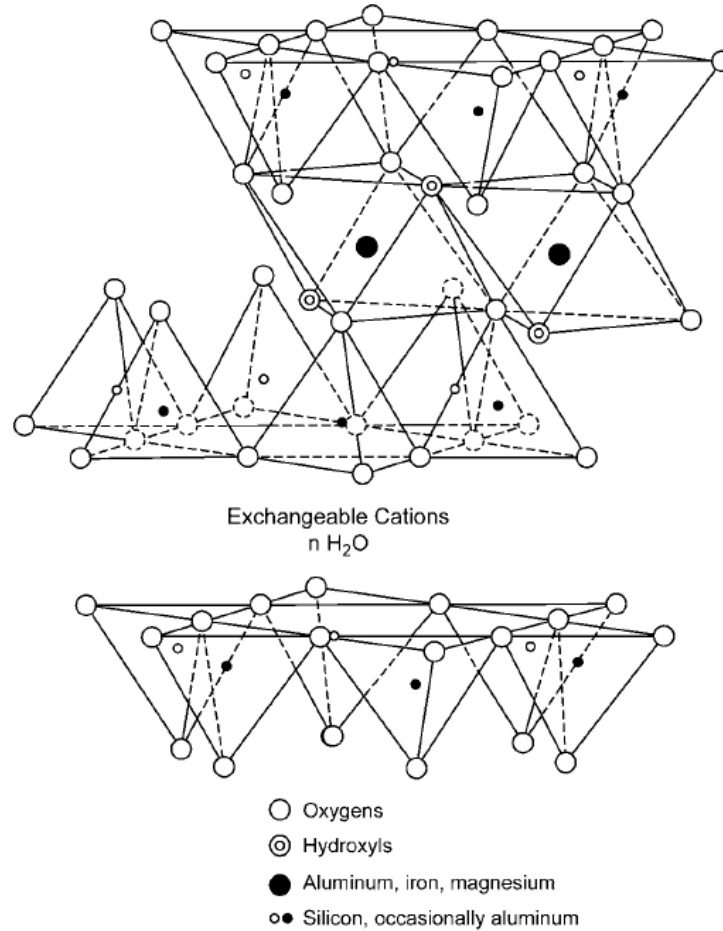


Figura 4. Diagrama de la estructura de las esmécticas. (Murray, 2007)

El tamaño de las partículas es inferior a un 0,03% al del grano medio de la caolinita, por tanto posee una mayor superficie específica y permite la entrada de una gran cantidad de agua, mayor a la caolinita, antes de llegar a saturarse. En otras palabras, posee límite líquido bastante alto, alrededor de 100 - 110%.

Este tipo de arcilla ha llamado la atención a lo largo de los años debido particularmente a una cierta característica que la hace diferente del resto, el gran hinchamiento que padece al entrar en contacto con el agua, proporcionando así una masa voluminosa. A su vez, existen distintos tipos de bentonitas, dependiendo del origen natural: cálcica natural, sódica natural y las activadas por sodio. Las más comunes de encontrar son las bentonitas de calcio natural.

En la Tabla 2 se muestra un resumen que se obtuvo de la bibliografía consultada donde se exponen algunas propiedades físicas o características más relevantes tanto de la caolinita como de la montmorillonita.

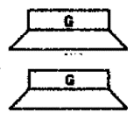
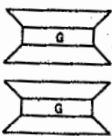
Mineral	Representación simbólica	Substitución isomorfa (tipo y porcentaje)	Enlace entre capas (tipo y resistencia)	Superficie específica (m ² /gr)	1/Densidad de carga (A ² /ion)	Capacidad de cambio potencial (me/gr)	Capacidad de cambio real (me/gr)	Forma de las partículas	Diámetro de las partículas y espesor
Caolinita		Al por Si 1 de 400	Enlace de H + valencia secundaria	10-20	83	3	3	Aplana da	d = 0.3 a 3 μ e = 1/3 a (1/10)·d
Montmorillonita		Mg por Al, 1 de 6	Valencia secundaria + enlace del ion de cambio	800	133	100	100	Aplana da	d = 0.1 a 1 μ e = (1/100)·d

Tabla 2. Propiedades físicas de la caolinita y la montmorillonita. (Lambe y Whitman, 1969)

2.1.5.- Propiedades físico-químicas de la arcilla.

En suelos gruesos, las fuerzas gravitacionales son las más influyentes en el comportamiento mecánico e hidráulico de los mismos. Por esta razón, la mayoría de los suelos gruesos tienen una conducta bastante similar. Por otra parte, en suelos muy finos, como lo es la arcilla, otras fuerzas predominan ya que la relación entre el área y el volumen alcanza valores muy altos y por las fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales cobran significación.

La superficie de las partículas del suelo poseen cargas eléctricas negativas y así, atraen a los iones positivos del agua (+H) y a los cationes de diferentes elementos químicos, tales como el sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio, hierro y entre otros. Esto trae como consecuencia que la partícula individual de la arcilla se vea rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida) (Badillo y Rodríguez, 1973). Las propiedades mecánicas pueden variar radicalmente al cambiar los cationes contenidos, puesto a que el espesor de la película varía, trayendo como consecuencia diferencias en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo. Industrias utilizan esta característica de intercambio catiónico forzado para tratar y mejores las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos.

En los suelos con un tamaño de partícula inferior a los 0.002mm, el tipo de fuerzas electromagnéticas influenciarán el comportamiento final. El tipo y la cantidad de minerales arcillosos, con sus cationes intercambiables asociados, controlan la plasticidad de los mismos. Winterkorn y Baver (1935) estudiaron la magnitud de presiones de adsorción entre la película de agua y la partícula de arcilla y observaron que se encuentra alrededor de unos 20.000 Kg/cm².

Debido al tamaño tan diminuto de las partículas, y la considerable relación área volumen, el agua es fuertemente atraída por la superficie específica de los minerales de arcilla dando como resultado la plasticidad. Por otro lado, partículas no arcillosas presentan menor afinidad con el agua y trae como consecuencia una disminución en la plasticidad del suelo.

Otro parámetro a tener en cuenta en cuanto a la afinidad de las partículas de arcilla por el agua es el desequilibrio de cargas eléctricas en la superficie de las mismas. El posible desequilibrio tiene que ser compensado por la adsorción de cationes en la superficie, los cuales pueden ser cambiados por otros en solución en el agua intersticial, estos se denominan cationes intercambiables. Por esta razón el comportamiento final del suelo dependerá de los minerales arcillosos que contenga.

2.2.- El fenómeno del arqueo.

2.2.1.- Concepto.

Como ya su nombre lo indica, se refiere a cuando el suelo adopta una forma de arco, tanto cóncavo como convexo. Como ya se ha mencionado anteriormente, el suelo arcilloso se comporta de una manera muy compleja y depende de muchas variables. En algunos casos se presenta curling como un leve levantamiento en los extremos o el centro, en uno que otro caso es inexistente y, por otro lado, tiende a llegar a extremos muy llamativos.

Realmente el proceso consiste en la evolución de un suelo, que se puede entender como un sistema termodinámico abierto en contacto directo con el medio ambiente, el cual busca alcanzar un estado de equilibrio. Generalmente, todos los tipos de suelos arcillosos, con un cierto contenido de agua inicial, en tiempo de secado y de cocción, sufren un proceso de encogimiento. Esta retracción es mayor a medida que menor sea el contenido de materias no plásticas de la arcilla en cuestión. Luego, el arqueo de las muestras es debido a una retracción diferencial bajo condiciones de gradiente de succión debida al estar sometidas a secado.

La forma de arco que adapta como resultado final puede ser explicado como el desarrollo de un cierto momento debido a la distribución no uniforme de fuerzas horizontales generadas por el desarrollo de fuerzas capilares y la diferencia del contenido de agua a lo largo de la altura de la muestra.

2.2.2.- Factores influyentes.

En la última década, autores han estudiado este fenómeno relativamente moderno. No obstante, la información que se posee actualmente es relativamente escasa y superficial como para llegar a conclusiones puntuales del proceso del arqueo. Es cierto que los parámetros influyentes son evidentes y directos: el tipo de mineral de la arcilla, la temperatura de secado, el porcentaje de agua inicial, el contenido de sales y su distribución en todo el material, la distribución de las partículas del suelo, condiciones de humedad relativa, entre otros. (Sánchez et al., 2019)

Es evidente que este proceso no ocurrirá de la misma manera en la realidad, ver Figura 5. El medio ambiente es un sistema muy complejo de modelar. Normalmente la acción del medio ambiente es cíclica, siguiendo una alternancia de épocas cálidas y secas, que inducen la evaporación del agua contenida en la masa de suelo y por tanto la

retracción, con épocas lluviosas, en las que se aporta agua al suelo y se favorece su hinchamiento. Por otro lado, la interacción con la atmosfera no es el único factor en la eliminación de agua del sistema, la presencia de vegetación, por ejemplo, también contribuye a disminuir el contenido de humedad a través de procesos de transpiración, entendiéndose como la extracción de humedad mediante las raíces. (Levatti, 2012).



Figura 5. Arqueo pronunciado en un desierto de suelo arcilloso. Utah, Estados Unidos.

2.2.3.- Procesos.

Es de gran utilidad intentar dividir el proceso en fases para tener una idea más sencilla y evidente del comportamiento de un espécimen en términos de arqueo. Según Sánchez et al., 2019 cuando una muestra es secada desde su cara superior, el arqueo cóncavo ocurre en dos etapas (I y II) mientras que, por otro lado, el arqueo convexo en cuatro (I, II, III y IV):

- I.** Retracción en todas las direcciones. Las partículas se reordenan y la muestra empieza a separarse del molde.
- II.** La retracción continua y sus extremos empiezan a arquearse formando un arqueo cóncavo. Este proceso continua hasta que alcance su máxima elevación.
- III.** Los extremos elevados se retraen hacia abajo hasta estar en contacto con el molde. Luego, el suelo se retrae predominantemente en la dirección longitudinal y lateral.
- IV.** La muestra se levanta aproximadamente en el centro para formar un arqueo convexo y este proceso continua hasta que el contenido de agua es relativamente nulo.

Todo esto teniendo en cuenta que existe un contenido de agua inicial suficiente como para que se creen fuerzas capilares que traigan como consecuencia un levantamiento por arqueo.

CAPÍTULO 3.- INVESTIGACIÓN SOBRE EL ARQUEO DE SUELOS BASADO EN PUBLICACIONES CIENTÍFICAS.

A partir de estudios, relacionados con la retracción y el fenómeno del arqueo realizado en diferentes muestras y distintas condiciones, que han sido desarrollados por diferentes autores es posible llegar a un rango de conclusiones e hipótesis que remarcarán de qué manera se produce este tipo de comportamiento. Cuatro artículos, con un valioso aporte de resultados, de diferentes o, en algunos casos, mismos autores han sido comparados con el fin de estudiar el arqueo relacionado en diferentes tipos de muestras. Numerosos ensayos con valiosos resultados fueron llevados a cabo tanto de manera experimental como numérica. A continuación se referencian los trabajos, cuyas características están representadas en la tabla 3 (Kodikara et al., 2004; Zielinski et al., 2014; Al-Jeznawi et al., 2019; Sánchez et al., 2019).

3.1.- Artículos documentados.

Otros artículos, además de los citados en el párrafo anterior, fueron analizados con el fin de ampliar más la información. Sin embargo, los artículos utilizados explícitamente como fuente de datos experimentales para el análisis de los resultados, además de los ejecutados en este trabajo, son los denominados en la tabla 3 como artículo 2, 4, 5 y 6. Como se puede observar, el interés por este fenómeno ha aumentado desde la primera década de este siglo y, por tanto, la información existente todavía no es tan amplia.

Algunos de los artículos se han enfocado más o menos en ciertos parámetros, los cuales han sido definidos en el capítulo 2.2.2., que ellos consideran importantes a tomar en cuenta. La idea, por tanto, es dividir y agrupar aquellos ensayos que, por una parte tengan características similares entre ellos y, por otra parte, tengan pequeñas variaciones entre los mismos para estudiar la influencia de estos factores ya mencionados.

En cada artículo se utiliza un material distinto, normalmente el tipo de arcilla que sea fácilmente adquirible en la zona en donde se encuentren los autores, cuyas características serán definidas posteriormente.

Artículo	Nombre	Descripción	VARIABLES/Parámetros	Moldes	Número de tests
T1	Estudio experimental y análisis numérico de la desecación en suelos arcillosos	Héctor Ulises Levatti, 2015. (Tesis doctoral).	Tamaño de partícula, secado.	Rectangulares y circulares de distintas dimensiones.	-
T2	Modelling of curling in desiccating clay	NRC Canada, 2004.	Temperatura, humedad inicial-final de la muestra y la fricción con el molde.	Rectangulares.	3 de observación y 3 destructivos para medir humedades.
T3	Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils	Lakshmikantha, M. R., 2009 (Tesis doctoral).	Grosor de las muestras, parámetros de fractura.	Rectangulares y circulares de distintas dimensiones.	-
T4	Precise observation of soil surface curling	Geoderma, 2014.	Temperatura, humedad relativa del laboratorio, relación de arcilla/arena (tamaño de partículas) y la ordenación de partículas.	Rectangulares pero principalmente circulares.	6 con diferente relación arcilla/arena y contenido de agua inicial (%) y 6 para estudiar la influencia del tamaño y ordenación de partículas.
T5	Experimental studies on curling development of artificial soils	Jrmge, 2019.	Relación arcilla/arena, contenido de agua, granulometría, succión	Circulares pero principalmente rectangulares.	16 con diferente relación arcilla/arena y contenido de agua inicial (%).
T6	Soil curling process and its influencing factors	NRC Canada, 2019.	Diferentes tipos de arcillas, contenido de agua inicial, temperatura de secado, relación arcilla/arena.	Rectangulares.	19 con diferente relación arcilla/arena y contenido de agua inicial (%).
T7	Analysis of soil drying incorporating a constitutive model for curling	Acta Geotechnica, 2020.	Relación arcilla/arena, contenido de agua inicial, condiciones de fricción/no fricción con el molde, permeabilidad de las muestras.	Rectangulares.	-

Tabla 3. Artículos científicos analizados y publicados por autores externos.

3.2.- Ensayos.

3.2.1.- Suelos.

Las muestras estarán dispuestas en diferentes tipos de condiciones ambientales, porcentajes de mezclas, tipo de moldes y otros factores determinantes que se discutirán más adelante. En total suman una cantidad de 36 ensayos, algunos enfocándose específicamente en una o más variables que han sido tabuladas, dependiendo del tipo de suelo utilizado, en las tablas 4, 5 y 6. Por otro lado, se utilizan suelos con propiedades conocidas definidas a continuación,

3.2.1.1.- Arcilla de Werribee.

En primer lugar, se ha llevado a cabo el estudio de muestras de una tipología de arcilla bastante plástica denominadas Arcilla de Werribee. La “Werribee Clay” se encuentra en el oeste de Australia y se define como una arcilla altamente activa, propensa a experimentar una gran retracción e hinchamiento (expansiva) y que, además de ser plástica, presenta un límite líquido elevado del 127%.

Specific gravity	2.66
Clay content (%)	62
Atterberg limits	
Liquid limit, LL (%)	127
Plastic limit, PL (%)	26
Plasticity index, PI (%)	101
Linear shrinkage (%)	22
Mineralogy	
Quartz (%)	30
Feldspars (albite) (%)	8
Illite (%)	10
Kaolinite (%)	10
Ca-smectite (%)	42

Tabla 4. Propiedades y mineralogía de la Arcilla Werribee. (Kodikara et al., 2004)

3.2.1.2.- Arcilla del norte de Altona.

En segundo lugar, se ha utilizado un tipo de Arcilla menos plástica que la anterior, pero con propiedades igualmente interesantes. Esta arcilla es denominada “Altona North Clay” o Arcilla del norte de Altona y se trata de una arcilla localizada en Victoria, Australia.

Liquid limit, LL (%)	70.2
Plastic Limit, PL (%)	21.8
Plasticity Index, PI (%)	48.4
Linear Shrinkage (%)	16.0
Shrinkage Limit (%)	-
Soil Classification	CH
Specific Gravity	2.61
Smectitie	31
Quartz	59
Kaolinite	2
Orthoclase	3
Feldspars (Albite)	2
Calcite	3
Illite	—

Tabla 5. Propiedades y mineralogía de la Arcilla del norte de Altona. (Shannon, 2013)

3.2.1.3.- Caolín de NY.

Por último se encuentran dos tipos de caolines, el caolín común y, además, también hacen uso de una arcilla mucho menos plástica en comparación a las anteriores denominada Caolín de NY.

Liquid limit, LL (%)	54.8
Plastic Limit, PL (%)	26.0
Plasticity Index, PI (%)	28.8
Linear Shrinkage (%)	6.9
Shrinkage Limit (%)	29.4
Soil Classification	CH
Specific Gravity	2.62
Silica (SiO ₂)	46.7
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	36.1
Magnesia (MgO)	0.4
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.4
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.1
Calcium Oxide (CaO)	0.7
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.9
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.8
Loss on Ignition	14.0

Tabla 6. Propiedades y mineralogía del caolín de NY. (Shannon, 2013)

3.2.2.- Instalación (set-up).

En general, la instalación de todos los ensayos se ha basado en una similar para todos los ensayos, representada en la gráfica 6. Consiste en una balanza, una cámara de alta resolución posicionada de forma frontal a la muestra, una lámpara que puede alterar las condiciones ambientales y, a su vez, un sensor que mide estas variaciones de humedad relativa (%) y temperatura (°C).

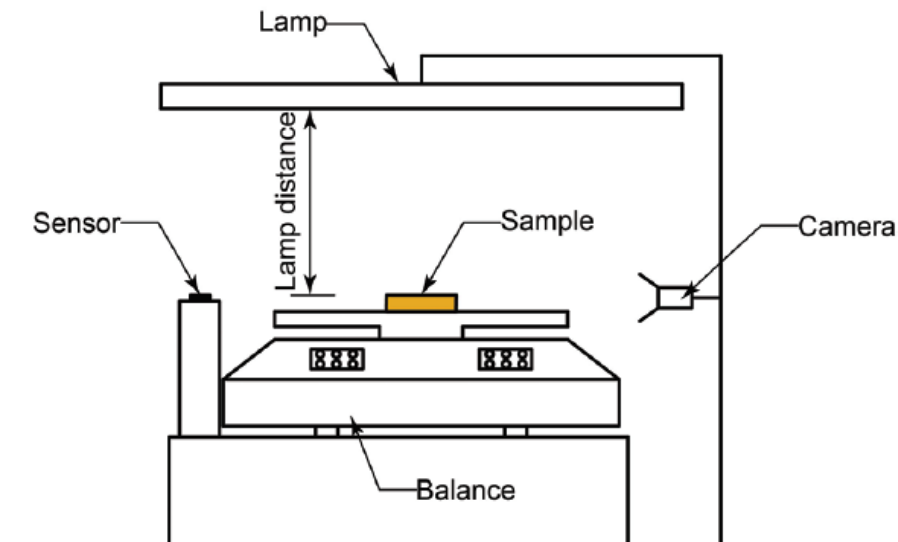


Figura 6. Representación esquemática de la instalación (set-up) de los ensayos propuestos (Sánchez et al., 2019).

Sin embargo, una de las variaciones, indispensable a tomar en cuenta, que existe entre ensayos es la diferencia entre las dimensiones entre los moldes cuyos valores son apreciables en la tabla 7. Aunque ambos moldes sean rectangulares, el tamaño de los lados varía levemente. Esto es un parámetro que se considerará al realizar suposiciones en los análisis. En algunos casos las muestras están dispuestas en moldes circulares pero, debido al hecho de que son muy pocos, estos no se tomarán en cuenta para el análisis de los ensayos.

Molde	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	159	29	14.3
2	251	25	12.4

Tabla 7. Dimensiones de ambos moldes utilizados en los ensayos propuestos.

3.2.3.- Resumen de ensayos realizados.

3.2.3.1.-Arcilla Werribee.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
T2/T1	Arcilla Werribee	LL	1.0	∅	<1
T2/T2	Arcilla Werribee	LL	1.0	∅	<1
T2/T3	Arcilla Werribee	LL	1.0	∅	<1
T6/T6	Arcilla Werribee	130.76	1.0	∅	42.7
T6/T7	Arcilla Werribee	131.47	1.0	∅	41.97
T6/T9	Arcilla Werribee	172.47	1.4	∅	36.42
T6/T8	Arcilla Werribee	174.48	1.4	∅	33.63
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	1.5	∅	53.96
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	1.5	∅	33.9
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	1.5	∅	32.51
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	1.5	∅	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	1.5	∅	18.69
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	1.6	∅	54.544
T6/T14	90 Werribee / 10 Arena	172.76	1.4	∅	31.86
T6/T15	90 Werribee / 10 Arena	172.92	1.4	∅	32.29
T6/T16	80 Werribee / 20 Arena	174.35	1.4	∅	16.43
T6/T17	80 Werribee / 20 Arena	171.76	1.4	∅	15.63
T6/T18	70 Werribee / 30 Arena	165.33	1.3	U	28.77
T6/T19	70 Werribee / 30 Arena	166.65	1.3	U	25.64

Tabla 8. Ensayos realizados propuestos por los artículos mencionados con respecto a la arcilla Werribee.

3.2.3.2.-Caolín.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
T6/T5	Caolín de NY	87	1.6	U	3.77
T4/T2	Caolín	52	2	U	<1.0
T4/T3	Caolín	65	2.5	No arqueo	0
T4/T4	Caolín	78	3	U	<2.0
T5/T8	Caolín	126	3	U	<2.0
T5/T9	Caolín	210	5	U	<6.0
T5/T7	95 Caolín / 5 Arena	126	3	U	12.5
T4/T5	90 Caolín / 10 Arena	52	2	U	0
T4/T6	90 Caolín / 10 Arena	65	2.5	U	<1.0
T4/T7	90 Caolín / 10 Arena	78	3	U	<2.0
T5/T6	90 Caolín / 10 Arena	126	3	U	20-24
T5/T1	85 Caolín / 15 Arena	105	2.5	No arqueo	0
T5/T2	85 Caolín / 15 Arena	115.5	2.75	U	20-25
T5/T3	85 Caolín / 15 Arena	126	3	U	35-40
T5/T4	80 Caolín / 20 Arena	105	2.5	U	25-30
T5/T5	80 Caolín / 20 Arena	126	3	U	60-65

Tabla 9. Ensayos realizados propuestos por los artículos mencionados con respecto a la arcilla Caolín.

3.2.3.3.-Arcilla Altona.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
T6/T3	Arcilla de Altona North	104.11	1.5	Ω	22.04
T6/T4	Arcilla de Altona North	106.18	1.5	Ω	24.17

Tabla 10. Ensayos realizados propuestos por los artículos mencionados con respecto a la arcilla Altona.

CAPÍTULO 4.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

Con el objetivo de ampliar la información acerca de este complejo fenómeno se han realizado una serie de ensayos con distintas características, basándose en los datos y resultados realizados por los otros autores mencionados en el capítulo anterior. Los ensayos han sido definidos de manera que se profundice el conocimiento, además de que al aplicar desarrollos experimentales propios se pueda realizar un análisis experimental más fundamentado basado en la experiencia personal en ensayos de laboratorio.

4.1.- Suelos.

Para empezar, se utilizarán dos tipos de muestras arcillosas, mencionados en los capítulos 2.1.4 con una estructura interna distinta y, por tanto, un comportamiento completamente variable. Por otro lado, para mezclas con un porcentaje de arena, se usa una arena de sílice muy fina.

Ambas arcillas y la arena fueron obtenidas de la empresa *Anper Ceramics* debido a su relativa cercanía con respecto a laboratorio de la UPC. La empresa *Anper Ceramics* señala que la bentonita *“es una arcilla muy pegajosa con un alto grado de encogimiento (los enlaces entre las capas unitarias permiten la entrada de una cantidad superior de agua que en la caolinita) y tiene tendencia a fracturarse durante la cocción y el enfriado. Por ese motivo no conviene trabajarla sola o como materia predominante de una masa. Su gran plasticidad puede servir de gran ayuda a cuerpos del tipo porcelana, en un 2% a 3 % sustituye en esta a un 9 o 10 % de arcilla plástica evitando así el contenido que generalmente introducen en la pasta estas, mejorando la blancura”* mientras que, por otro lado, el caolín es sencillamente mencionado como *“El caolín o caolinita, es una arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de refractarios”*.

Por otro parte, la arena de sílice es definida como una *“Piedra natural de aristas redondeadas, limpia de arcillas y materias orgánicas. Compuesta por granos comprendidos entre 0 y 0,5 milímetros”*. Posee un 98% de SiO₂, un Al₂O₃ < 0,5%, un Fe₂O < 0,04%, CaO < 0,05% y K₂O < 0,50%.

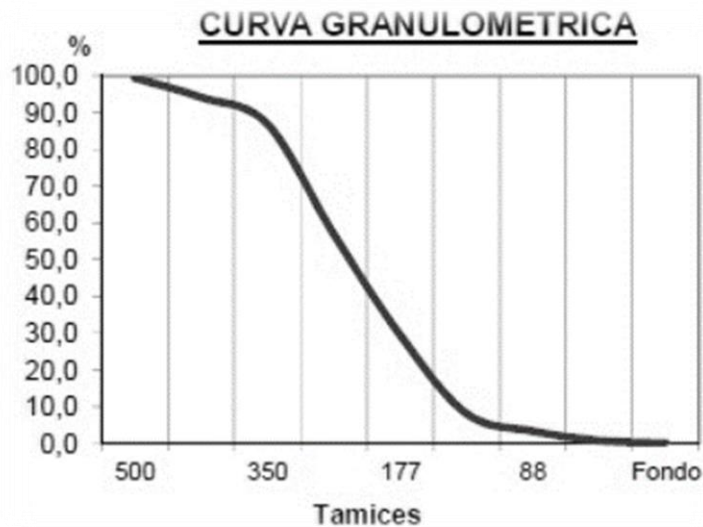


Figura 7. Curva granulométrica de la arena de sílice. (Anper ceramics. OX841105 Arena de Sílice Fina 0-0,5mm)

4.2.- Propiedades físicas.

4.2.1.- Límites de Atterberg.

Ahora bien, es indispensable conocer cuáles son las propiedades básicas de estos materiales, haciendo énfasis en los límites Atterberg (límite líquido y plástico). Los límites de Atterberg, límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, basándose en que estos solo pueden tener 4 estados de consistencia según su humedad: sólido, semisólido, plástico y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

4.2.1.1.- Límite líquido:

Para obtener el límite líquido, definido como la humedad (%) en la cual el suelo pasa de estado plástico a líquido, se utiliza la cuchara de Casagrande:

1. Añadir agua destilada a la muestra hasta llegar por debajo del límite líquido.
2. Con una espátula verter una muestra de unos 50-70 gramos en la cuchara de Casagrande a una altura de 10mm.
3. Con el acanalador se hace un “surco” en medio de la muestra sin que haya ningún desprendimiento.
4. Revisar que la altura de la cuchara con respecto a la superficie de contacto sea de 1 centímetro.
5. Se realiza el procedimiento con una cadencia de 2 golpes por segundo hasta que el surco se cierre en el fondo en una longitud de 12,7-13 centímetros.

6. Retirar aproximadamente 10 gramos del fondo del surco para determinar su humedad, secándola en el horno a 60 grados hasta masa constante. Esto es una diferencia en peso menor 0,1% de la muestra inicial.

$$w = (M_h - M_s) / (M_s - M_r) * 100 (\%)$$

7. Se repite varias veces este proceso, variando la humedad del suelo, registrando el número de golpes requeridos para así, con la gráfica %Humedad - #Número de golpes, poder llevar estos datos y encontrar cual es el valor de la humedad si los golpes fueran 25, este valor de la humedad es el límite líquido. (Repitiendo cada vez de más húmedo a más seco).

Así pues, siguiendo estos procesos con ambas arcillas se obtiene la tabla,

Límite Líquido						
Material	nº golpes	T	T+S+W	T+S	W (%)	LL (%)
Bentonita	10	63.18	76.38	68.14	166.13	159.65
	25	68.31	77.17	71.73	159.06	
	44	51.77	62.99	56.22	152.13	
Caolín	12	77.42	87.51	83.96	54.28	44.25
	22	59.16	69.93	66.42	48.35	
	41	53.62	64.03	60.87	43.59	

Tabla 11. Datos obtenidos para el cálculo del límite líquido de la bentonita y el caolín a partir de la cuchara de Casagrande.

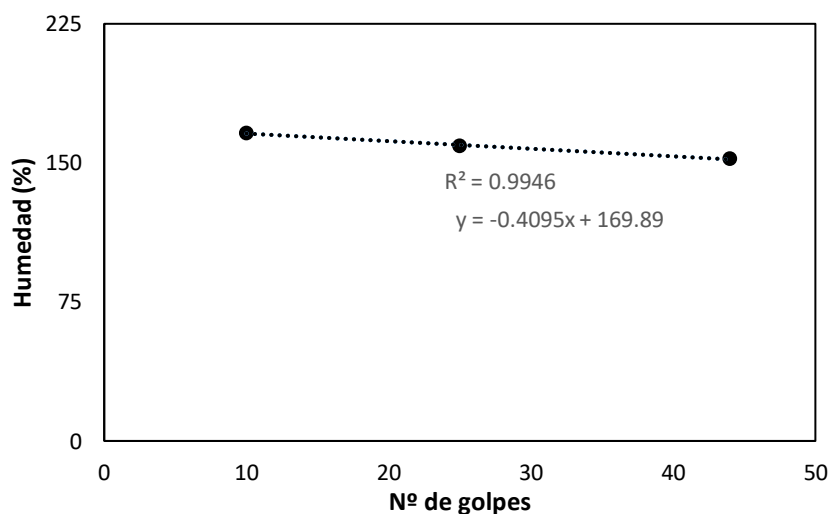


Figura 8. Cálculo del límite líquido de la bentonita.

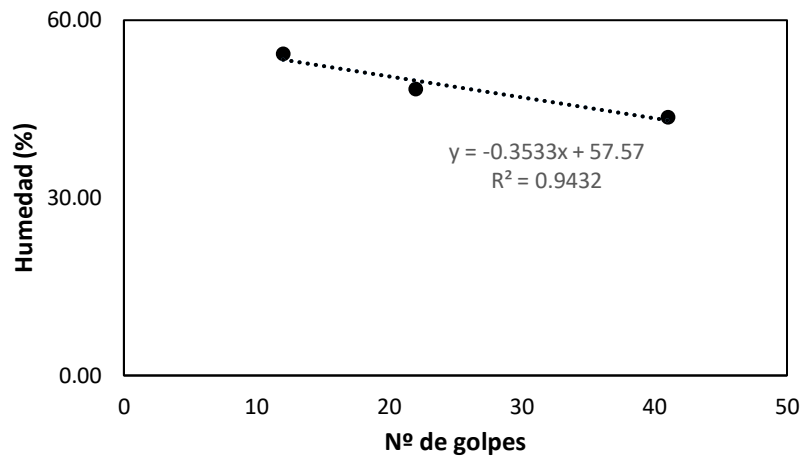


Figura 9. Cálculo del límite líquido del caolín.

4.2.1.2.- Límite plástico:

Para obtener el límite plástico, definido como aquella humedad (%) en la cual el suelo pasa de estado semisólido a plástico. Se define el límite plástico como la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros presenten grietas.

1. Se utilizan 20 gramos de material.
2. Se pesan los recipientes.
3. Se añade un poco de agua a la muestra del material.
4. Se le da forma de cilindro a las muestras de 6 gramos hasta llegar a un diámetro de aproximadamente 3mm / 1/8' hasta poder observar fisuras.
5. Calcular la humedad a partir de secarlo a una temperatura de 110 grados.

De esta manera, se realizan estos procesos en ambos suelos nuevamente y se obtiene la tabla 12.

Límite Plástico					
Material	T	T+S+W	T+S	LP (%)	IP (%)
Bentonita	13.89	19.97	17.89	52.00	107.65
Caolín	12.55	21.16	19.29	27.74	16.50

Tabla 12. Datos obtenidos para el cálculo del límite plástico de la bentonita y el caolín a partir de la cuchara de Casagrande.

4.3.- Instalación (Set-Up).

Una vez se han definido qué tipos de suelos a emplear, así como la obtención de sus propiedades físicas, es importante realizar un esquema de los tipos de ensayos que se tomarán en cuenta y de qué manera se distribuirán. En primer lugar, es importante recalcar las dimensiones del molde en el cual se van a realizar las muestras. El estudio consta de un molde rectangular con una forma y dimensiones definidas en la tabla 13.

Con la finalidad de no restringir el libre movimiento debido a la retracción de las mezclas a lo largo del proceso de secado, se utiliza vaselina en todas las caras del molde de manera que se eviten grietas que pudieran ser producidas por la obstrucción del movimiento y, así, favorezca el arqueado final.

Forma	Rectangular
Relación L/A	2.8
Largo (cm)	13.1
Ancho (cm)	4.6
Alto (cm)	1.8
Área (cm ²)	60.3
Volumen (cm ³)	108.5

Tabla 13. Dimensiones del molde utilizado para todos los ensayos.

La instalación, representado en las figuras 10, 11 y 12, propuesto para la realización de los ensayos consiste en dos balanzas con una precisión de 0.01g conectadas a un ordenador con un software dedicado a contabilizar periódicamente el peso de las muestras, dos cámaras de alta resolución para el seguimiento de las muestras y un sensor que mide las condiciones de humedad relativa y temperatura en las que se encuentra el laboratorio. De esta manera todos los procesos que experimenten las muestras serán medidos con un intervalo de 10min con el fin de obtener un análisis más preciso.

La utilización de distintos tipos de softwares ha tomado un papel fundamental tanto para la toma de datos como para el análisis de los resultados. Por una parte, para un control periódico (10min.) de los pesos de ambas muestras, se ha utilizado un software llamado Simple Data Logger (SDL). Por otro lado, para una de las cámaras, se ha utilizado un software para la toma fotográfica remota con un intervalo el cual ha sido proporcionado por la marca Canon y se denomina EOS utility. Sin embargo, ambas cámaras no pueden ser conectadas a la misma aplicación, por lo que se ha optado por la compra de un disparador remoto que ofrece las mismas funciones que la aplicación. Luego, para el análisis de datos a partir de imágenes fotográficas se ha utilizado un código en un software de cómputo numérico bastante comercial llamado Matlab que ha ayudado a calcular distancias para así, conocer de qué manera se da el proceso de retracción y, más importante, el cálculo de las alturas de arqueado. Por otro lado, las condiciones de humedad han sido medidas a partir de un sensor denominado “ATMOS 14 Temp & Humidity” y

un lector de información llamado “EM50 Data Logger”, productos pertenecientes a la compañía ITC international.



Figura 10. Fotografía de la instalación utilizada.

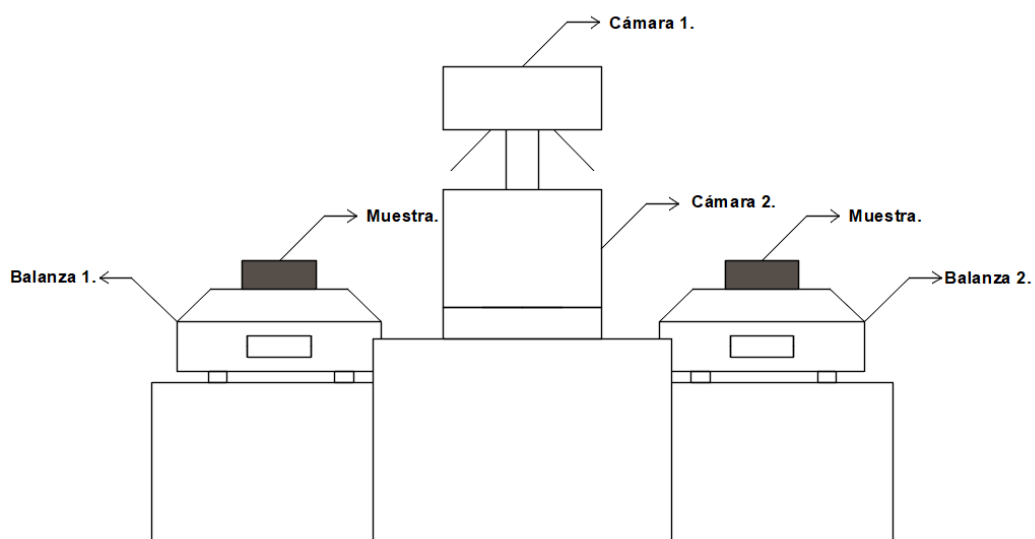


Figura 11. Esquema gráfico del set-up.

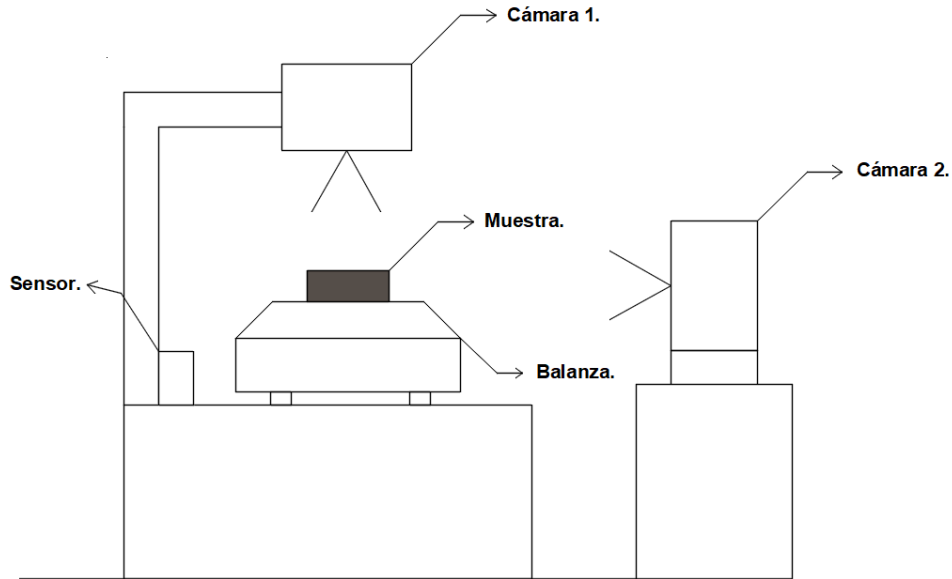


Figura 12. Esquema gráfico en vista lateral del set-up.

4.4.- Ensayos.

El estudio consiste en el análisis de distintas muestras que se dividirán dependiendo de ciertas características, relacionadas exclusivamente con la humedad inicial de agua (%), proporciones de arcilla/arena y la combinación de ambos factores. Para hacer de este trabajo una mejor base para futuros estudios, se ha decidido investigar detalladamente, a partir de los artículos científicos citados anteriormente, cuáles serían los ensayos relevantes a producir evitando duplicar el contenido que ya ha sido descrito en los documentos de autores internacionales que fueron consultados.

4.4.1.- Mezclas de arcilla pura. (Ensayos 1-4)

En primer lugar, es indispensable saber cuál será el contenido inicial de agua de las muestras. Según los ensayos realizados, apreciables en la tabla 9, no hay existencia de una mezcla de caolín al límite líquido y 1.5 veces el límite líquido. Por tanto, para la complementariedad de los ensayos se ha decidido llevar a cabo estas primeras mezclas con un 100% de caolín al LL y a 1.5xLL.

Por otra parte, para el caso de la bentonita los estudios se han comparado con la denominada arcilla de Werribee, la cual se asemeja en propiedades a la bentonita por el hecho de ser tan plástica y poseer una mineralogía similar. Según la información aportada en los artículos, se han realizado mezclas únicamente desde el límite líquido hasta 1.5xLL aproximadamente. Sin embargo, como se verá más adelante, a tan poca relación humedad inicial (%) / Límite líquido (1, 1.2, 1.5,...) la arcilla Werribee padece de un comportamiento que acaba en una retracción y presenta forma de arco, cuyo estudio es el objetivo del trabajo. Como ya se ha visto, la plasticidad de las muestras es una propiedad

fundamental que presenta una relación directa en el comportamiento de las muestras y, además, según los resultados obtenidos estas alturas de arqueo son más significativas a menor relación W/LL para este suelo tan plástico, por lo que se ha concluido que sería de gran importancia estudiar si el comportamiento de esta arcilla Werribee se asemeja a la bentonita comercial.

Por tanto, los primeros cuatro test consistirán de dos muestras de bentonita y dos muestras de caolín, unas al límite líquido y las otras a 1.5 veces el límite líquido. La cantidad necesaria a priori de suelo/agua para la humedad considerada será calculada con las fórmulas derivadas del modelo trifásico (agua, vacíos, suelo), ajustándolo así al ensayo y luego procediendo a realizar una cuantificación directa de la humedad inicial conseguida a partir del secado en horno para calibrar el modelo de manera precisa. De esta manera se intenta ampliar la información consultada en las divulgaciones científicas ya citadas para, así, ampliar el conocimiento del comportamiento del arqueo por desecación de los suelos arcillosos.

Como ya se ha visto, las condiciones ambientales traen como consecuencia cambios en el comportamiento sumamente importantes. Aunque los efectos que estas condiciones puedan variar ligeramente dependiendo de la micro y macroestructura de la muestra, en general se mantienen dentro de una misma tendencia para todos los tipos de suelos arcillosos. A partir de la información desarrollada en las citaciones anteriores, ha sido posible llegar a conclusiones prácticamente generales. Por esta razón, no se variarán las condiciones ambientales y se trabajará con las que se mantiene el laboratorio de la UPC. Se ha trabajado en un área del laboratorio que es una habitación que se mantiene cerrada la mayor parte del tiempo con la intención de conservar la temperatura y humedad relativa en torno a 20° y 50% respectivamente. La medición de estas dos variables ha sido llevada a cabo mediante un sensor proporcionado por el laboratorio de la universidad. Durante todos los ensayos estos datos se han guardado con un intervalo de 10 minutos entre medición. Para una mejor interpretación, se pueden observar en las figuras 13 y 14 los valores obtenidos y, además, el promedio que se obtiene, tanto de la temperatura (°C) como de la humedad relativa (%) para los ensayos del 1 al 4.

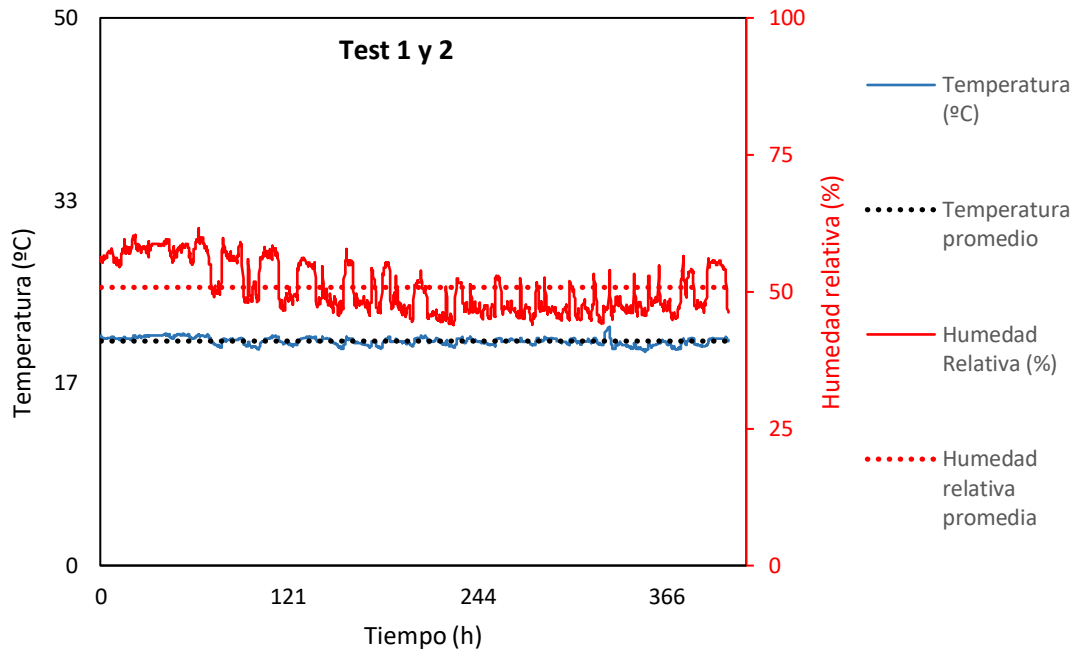


Figura 13. *Temperatura (°C) y humedad relativa (%) a lo largo del tiempo de los tests 1 y 2.*

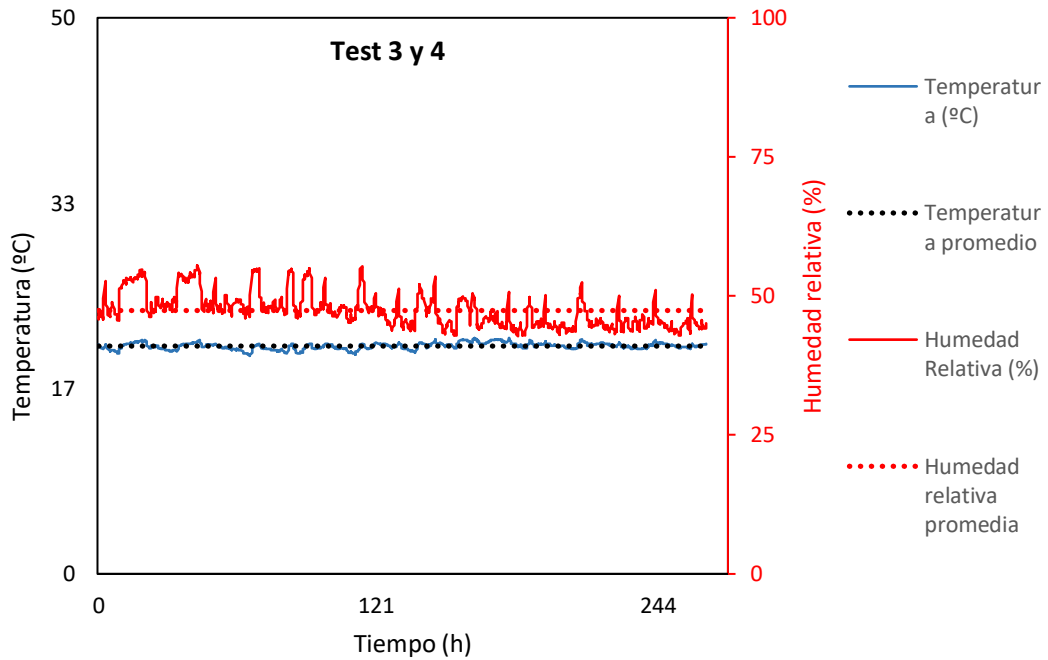


Figura 14. *Temperatura (°C) y humedad relativa (%) a lo largo del tiempo de los tests 3 y 4.*

4.4.2.- Mezclas con proporciones arcilla/arena. (Ensayos 5-10)

Ahora bien, como ya se ha citado en capítulos anteriores, la micro y macroestructura juegan un rol fundamental y por tanto serán un factor influyente en la toma de decisiones para la realización de las mezclas. Normalmente, la proporción de gruesos y finos utilizadas en los artículos van desde el 100/0 hasta el 70/30 para todos los suelos.

Se ha observado que para que las muestras se comporten de igual forma que una mezcla con un 100% de suelo arcilloso, o por lo menos para los tipos de arcillas que se utilizan, se tiene que llegar a una proporción inferior a los 15-25% de gruesos. Es indiscutible que una mezcla pura con 100% de arcilla, independientemente del tipo que sea, proporcionará una información valiosa a partir de su estudio. Ahora bien, al momento de decidir las proporciones de gruesos, teniendo en cuenta que el tiempo es limitado y que ya existe información relevante publicada, es indispensable hacer un filtro para producir información que sea relevante.

En el caso del caolín se han realizado proporciones de 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 y 80/20. De cualquier modo, existe una falta de datos con proporciones inferiores al 100% en general y con humedades iniciales relativamente bajas, se pueda apreciar en la tabla 14. Por otro lado, en el caso de la arcilla de Werrabee, solo se tuvo en cuenta un solo valor de la humedad para valores de relación arcilla y arena inferiores al 100%, cuyos valores han sido representados en la tabla 15. De igual manera, es muy difícil intentar dar una explicación o deducir la tendencia del comportamiento de muestras con tan pocos valores de distintas humedades como datos. Es por eso que para este trabajo se ha hecho una propuesta de realizar las mezclas, por un lado, con una proporción del 20% de arena y, por otro lado, del 10% a una humedad inicial que va desde el límite líquido hasta 1.5 veces el límite líquido, ya que será interesante comparar estos ensayos que poseen una micro y macroestructura distinta pero el mismo contenido inicial que los tests que van del 1 al 4.

		Proporción (%)				
		100/0	95/5	90/10	85/15	80/20
LL=26%	2xLL	1mm	No info.	0mm	No info.	No info.
	2.5xLL	0mm	No info.	1mm	No info.	No info.
	3xLL	2mm	No info.	2mm	No info.	No info.
LL=42%	2.5xLL	No info.	No info.	No info.	0mm	27.5mm
	2.75xLL	No info.	No info.	No info.	22.5mm	No info.
	3xLL	2mm	12.5mm	22mm	37.5mm	62.5mm
	5xLL	6mm	No info.	No info.	No info.	No info.

Tabla 14. Valores de altura de arqueo de todos los ensayos de caolín/arena en función de la relación entre el contenido inicial de agua (%) y su límite líquido y la proporciones, obtenidos a partir de los artículos T2, T4, T5 y T6.

		Proporción (%)			
		100/0	90/10	80/20	70/30
LL=126%	1xLL	42.7mm	No info.	No info.	No info.
	1xLL	41.97mm	No info.	No info.	No info.
	1.3xLL	No info.	No info.	No info.	28.77mm
	1.3xLL	No info.	No info.	No info.	25.64mm
	1.4xLL	No info.	No info.	15.63	No info.
	1.4xLL	36.42mm	No info.	No info.	No info.
	1.4xLL	No info.	31.86mm	No info.	No info.
	1.4xLL	No info.	32.29mm	No info.	No info.
	1.4xLL	No info.	No info.	16.43mm	No info.
	1.4xLL	33.63mm	No info.	No info.	No info.
	1.5xLL	53.96mm	No info.	No info.	No info.
	1.5xLL	33.9mm	No info.	No info.	No info.
	1.5xLL	32.51mm	No info.	No info.	No info.
	1.5xLL	13.15mm	No info.	No info.	No info.
	1.5xLL	18.69mm	No info.	No info.	No info.
1.6xLL	54.54mm	No info.	No info.	No info.	

Tabla 15. Valores de altura de arqueo de todos los ensayos de arcilla Werribee/arena en función de la relación entre el contenido inicial de agua (%) y su límite líquido y la proporciones, obtenidos a partir de los artículos T2, T4, T5 y T6.

De igual forma que en los ensayos anteriores, se intentan mantener las condiciones ambientales en las que se encuentra el laboratorio sin ninguna modificación y evitando la variación de las mismas para que haya una menor influencia en la respuesta de las muestras. Las condiciones ambientales durante todo el proceso de los ensayos desde el 5 al 8 se pueden apreciar en las figuras 15 y 16, las cuales han variado levemente con respecto a los ensayos anteriores.

Las condiciones ambientales que han sufrida las muestras 9 y 10 no han sido posible de obtener debido a que, por razones de cuarentena debida al Covid-19, no ha sido posible recuperar los datos al finalizar en ensayo. De cualquier modo, como se

pueden observar en la figura #, el promedio de temperatura (°C) y humedad relativa (%) permanece más o menos constante y, por tanto, se supondrá que se ha mantenido de esta manera durante todo el ensayo.

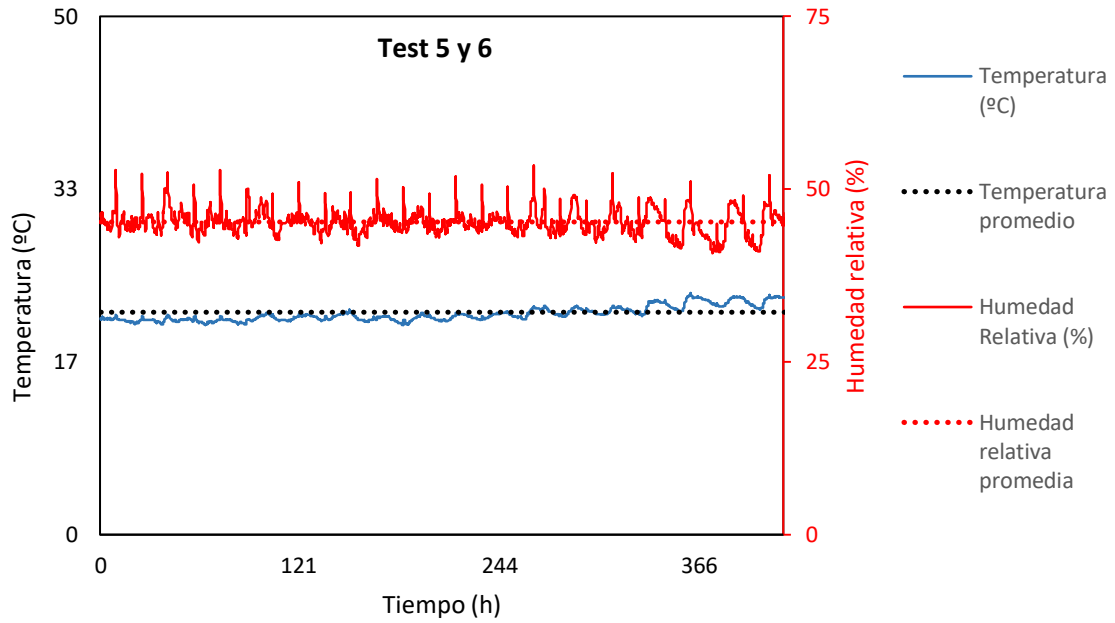


Figura 15. Temperatura (°C) y humedad relativa (%) a lo largo del tiempo de los tests 5 y 6.

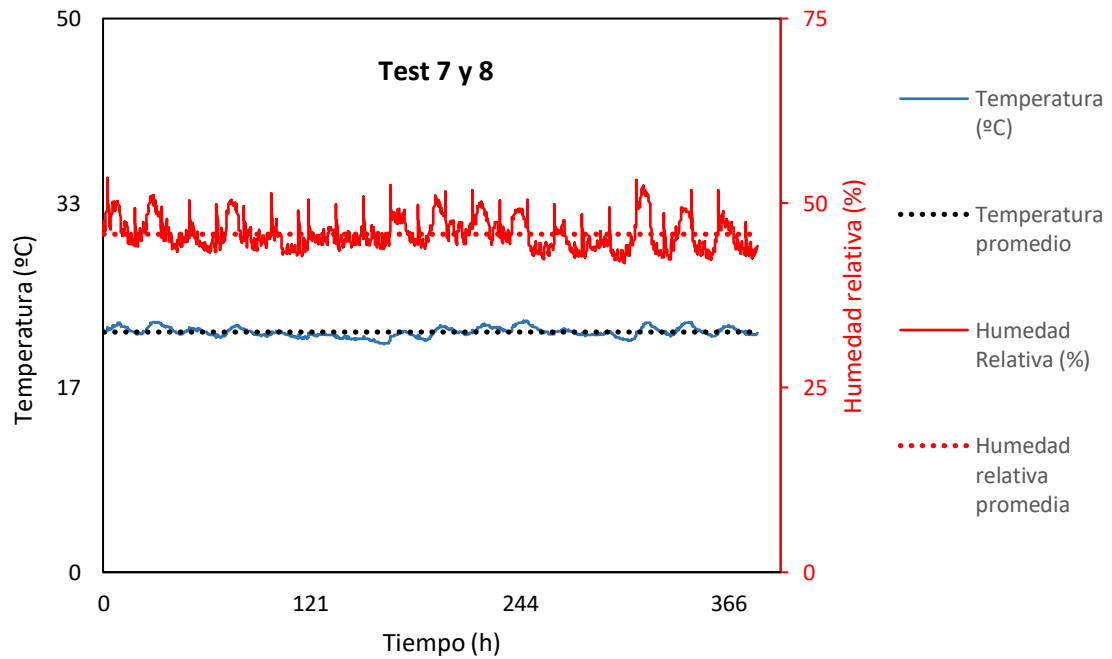


Figura 16. Temperatura (°C) y humedad relativa (%) a lo largo del tiempo de los tests 7 y 8.

En resumen, el trabajo experimental constará del siguiente número de ensayos, cuyas características están definidas en la tabla 16.

2 Porcentajes de humedades.

X

2 mezclas de Caolín + 3 mezclas de Bentonita

10 muestras totales.

Ensayo	Material	Humedad In. (%)
1	Bentonita	160 (LL)
2	Bentonita	239 (1.5xLL)
3	Caolín	44 (LL)
4	Caolín	66 (1.5xLL)
5	Bent./arena (80/20)	160 (LL)
6	Caol./arena (80/20)	44 (LL)
7	Bent./arena (80/20)	239 (1.5xLL)
8	Caol./arena (80/20)	66 (1.5xLL)
9	Bent./arena (90/10)	160 (LL)
10	Bent./arena (90/10)	239 (1.5xLL)

Tabla 16. Ensayos a realizar con su contenido de agua inicial característico.

4.5.- Cálculo del contenido de agua inicial (%) de las muestras.

Ahora bien, uno de los pasos más indispensables, una vez se han propuesto que ensayos se llevaran a cabo, es el cálculo del material necesario, suelo y agua, dado un contenido de agua inicial (%) definido. Estos cálculos son posibles gracias a las ecuaciones que provienen del denominado modelo trifásico de Suelos + Vacíos (Aire + Agua). Gracias a la simplificación de los suelos como el esquema definido en la figura 17 es posible llegar a la siguiente formulación,

$$W_s = \gamma_s \cdot \frac{\left(\frac{\gamma_w \cdot S \cdot V_t}{w}\right)}{\left(\gamma_s + \frac{\gamma_w}{w} \cdot S\right)} \cdot w \quad (1)$$

El parámetro de la densidad de los suelos (γ_s) se calcula experimentalmente en el laboratorio a partir del uso del picnómetro. Para la simplificación de este trabajo se han utilizado valores ya obtenidos por otros autores, teniendo en cuenta que los suelos usados son muy comerciales y, por tanto, las propiedades físicas ya están bien definidas. Por un lado, los valores encontrados relacionados con la densidad de suelos de la bentonita han sido de 2.5g/cm^3 , mientras que para el caso del caolín ha sido de 2.6g/cm^3 . Por otra parte, los parámetros de los que depende el Volumen de Sólidos (V_s) son datos ya conocidos o se suponen un valor racional.

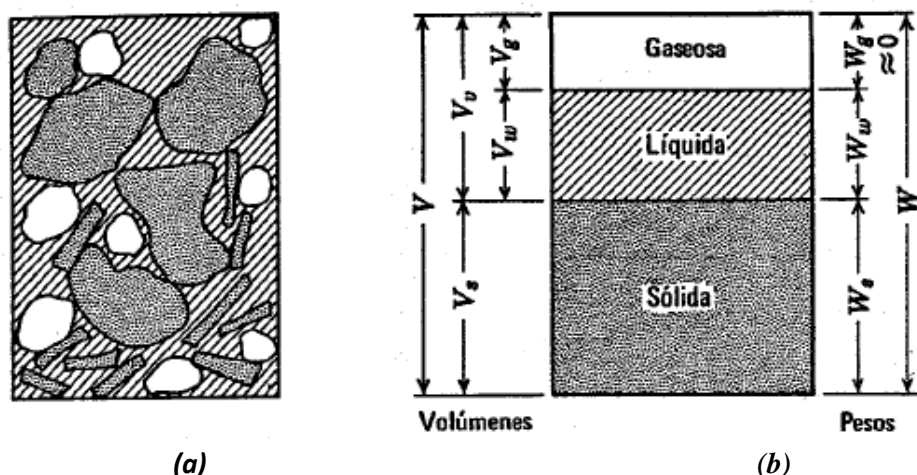


Figura 17. Representación gráfica del suelo como un modelo trifásico a) elemento de suelo natural. b) División de un elemento en fases. (Lambe y Whitman, 1969)

Además de esto, se ha intentado obtener un 5% de mezclas adicional con el fin de calcular la humedad inicial real (%) para así obtener un análisis de datos más preciso. Se intenta trabajar de la forma más precisa posible con el fin de obtener resultados exactos. Sin embargo, al tratarse de un trabajo experimental, el error humano es un factor clave a tomar en consideración en el momento del análisis de resultados. Probablemente el contenido de agua inicial real obtenido (%) variará del esperado por estos errores de apreciación humana. Por esta razón se realiza el cálculo de la humedad inicial de cada muestra, definido en la tabla 17. Aunque exista un error apreciable en los resultados finales, se procederá a continuar con los mismos ya que se encuentran en un rango relativamente admisible y, además, por el tiempo que implica la repetición de cada ensayo. Es importante destacar que el proceso de retracción acaba cuando la muestra haya estabilizado, en términos de peso y, por tanto, en las muestras exista un contenido de agua muy cercano a cero.

Ensayo	Material	Humedad In. (%)	W(%) inicial real	Error relativo (%)
1	Bentonita	160 (LL)	191.41	19.63%
2	Bentonita	239 (1.5xLL)	280.60	17.41%
3	Caolín	44 (LL)	46.04	4.64%
4	Caolín	66 (1.5xLL)	67.46	2.21%
5	Bent./arena (80/20)	160 (LL)	196.90	23.06%
6	Caol/arena (80/20)	44 (LL)	41.66	5.31%
7	Bent./arena (80/20)	239 (1.5xLL)	243.96	2.08%
8	Caol/arena (80/20)	66 (1.5xLL)	63.13	4.34%
9	Bent./arena (90/10)	160 (LL)	182.10	13.81%
10	Bent./arena (90/10)	239 (1.5xLL)	274.64	14.91%

Tabla 17. Humedad inicial deseada y real (%) obtenida de los 10 ensayos realizados.
4.6.- Cálculo del contenido de agua durante el proceso de secado de las muestras.

Una vez se calcula el valor inicial del contenido de agua inicial por el método de secado al horno, se usa este valor como referencia para el cálculo de los valores de humedad a lo largo de todo el ensayo. En primer lugar, el cálculo del peso de los sólidos (véase ecuación 2), posible gracias a las ecuaciones deducidas del modelo trifásico explicado en el apartado anterior, para cada muestra es un valor constante a lo largo del proceso, por tanto, será el valor de referencia que se utilizará para el cálculo de humedades posterior.

$$W_s = \frac{W_t}{1+w} \quad , \quad (Cte) \quad (2)$$

Una vez se obtiene este valor, el contenido de agua en la muestra se calcula con una formulación sencilla, que varía con el tiempo debido a la evaporación del agua y que expresa la relación entre la humedad, el peso de los sólidos y el peso del agua (véase ecuación 3).

$$w = \frac{W_t - W_s}{W_s} \quad , \quad w(t). \quad (3)$$

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1.- Introducción.

Una vez definidos todos los parámetros necesarios, se procede a la ejecución de los ensayos para un posterior análisis de los mismos. El trabajo se intenta simplificar de la manera más sencilla posible. Por una parte, los datos estarán relacionados con la pérdida de peso a lo largo del tiempo y, a su vez, con la pérdida de humedad y con la velocidad de evaporación del agua en la muestra. Por otro lado, se hace un énfasis en el estudio de los procesos de retracción y arqueo con el fin de relacionarlos con los parámetros de peso ya mencionados.

La intención es, por tanto, relacionar y comparar los resultados obtenidos con los que han sido propuestos por autores externos ya mencionados en el capítulo 3 para así llegar a una conclusión más amplia acerca del comportamiento de los suelos, específicamente analizando la retracción y el arqueo (*curling*).

Así pues, se medirá la retracción en el eje x (Δx), tanto de la parte superior como de la parte inferior de las muestras, la retracción en el eje y (Δh), en el eje z y las alturas de arqueo, tanto si es cóncavo o convexo. De esta manera quedarán todas las variables, así como la deformación volumétrica, la deformación por retracción y el proceso de arqueo definidos para cada test. Estos valores se pueden encontrar en el capítulo 5.2.3.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo final	Altura de arqueo máxima (mm)
1	Bentonita	191.41	1.2	Ω	1.5
2	Bentonita	280.60	1.8	No arqueó	0
3	Caolín	46.04	1.0	No arqueó	0
4	Caolín	67.46	1.5	No arqueó	0
5	Bent./arena (80/20)	196.90	1.2	U	17
6	Caol/arena (80/20)	41.66	0.9	No arqueó	0
7	Bent/arena (80/20)	243.96	1.5	U	18
8	Caol/arena (80/20)	63.13	1.4	No arqueó	0
9	Bent./arena (90/10)	182.10	1.1	U	4.5
10	Bent./arena (90/10)	274.64	1.7	U	31

Tabla 18. Resultados obtenidos de los ensayos realizados.

5.2.- Pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo.

El tiempo de estabilización de peso, definido como aquel tiempo en donde no se producen cambios en su contenido de humedad (%) y, por tanto, no ocurren cambios en el comportamiento de las muestras, depende tanto del tipo de suelo utilizado como de las condiciones de contorno. Así pues, en la arcilla más plástica (bentonita) con un contenido de agua inicial igual (%) al límite líquido puede llegar a estabilizar después de las 249.03 horas, ver tabla 1 de los anexos, mientras que para una mezcla de muestra 80 caolín/20

arena al límite líquido los cambios en el contenido de humedad (%) dejan de ocurrir a partir de las 45.03 horas, ver tabla 6 de los anexos (5.5 veces más rápido).

Para interpretarlo de una manera más sencilla, se realizan gráficas que contengan el contenido de agua (%) – tiempo (h) que sirvan para graficar la tendencia que adopta cada suelo, apreciables en las figuras 18 y 19. De los datos obtenidos se puede apreciar fácilmente como la bentonita necesita un tiempo mayor para que se evaporen las partículas de agua, alrededor de las 170 horas, en comparación con el caolín, que estabiliza alrededor de las 70 horas.

Ciertamente la bentonita empieza con un contenido de agua mucho mayor al caolín. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en cada muestra, se toma como humedad de referencia el límite líquido del suelo arcilloso que se utilice. Es así pues, que a pesar de que la relación de W/LL sea la misma para ambos casos y que, además, contengan las mismas proporciones de arcilla/arena, la tendencia de pérdida del contenido de agua es mucho mayor para la arcilla más plástica.

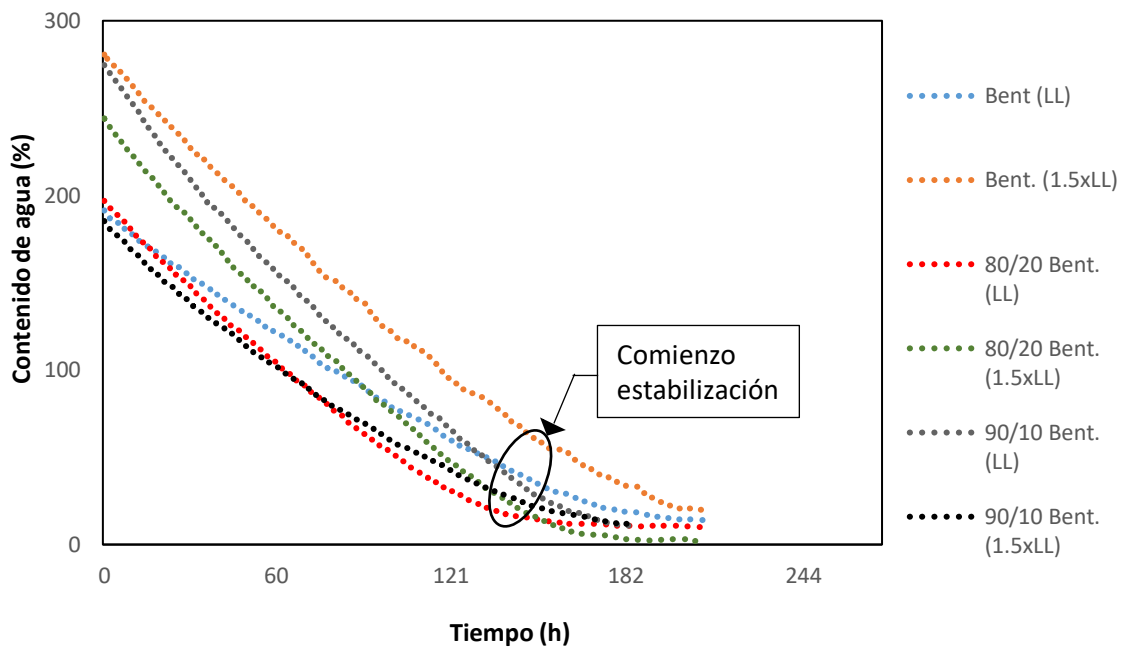


Figura 18. Gráfico que señala la pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo de secado en diferentes mezclas de bentonita.

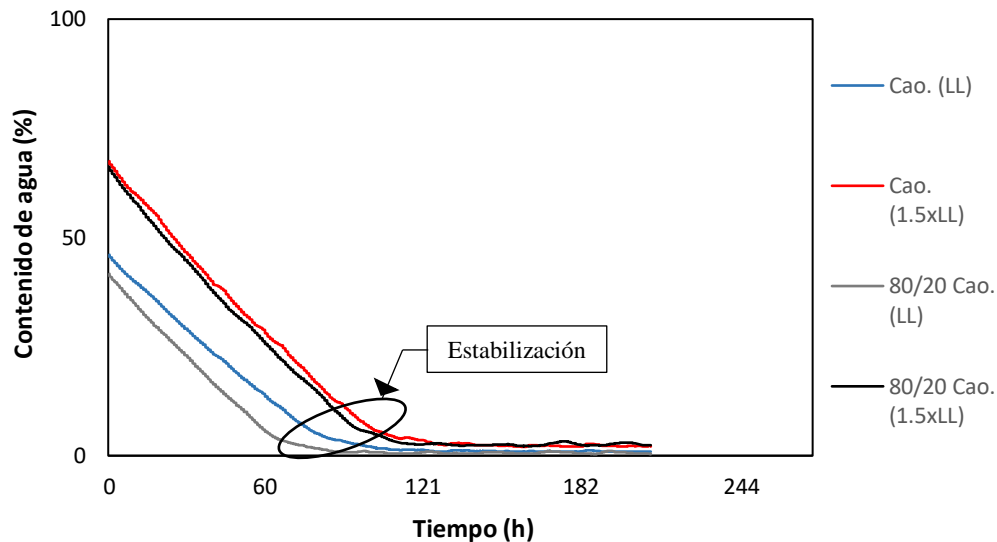


Figura 19. Gráfico que señala la pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo de secado en diferentes mezclas de caolín.

En los artículos presentados se realizan este tipo de gráficas, (véase figuras 20 y 21) en donde se puede comparar la tendencia de la pérdida del contenido de agua (%) entre los diferentes tipos de suelo y condiciones ambientales.

A diferencia del caso anterior, con la arcilla Werrabee se utilizan contenidos de humedad inicial relativamente altos, en comparación con el caolín, pero similares a los tomados para la bentonita (cercano a los 200%) para así, lograr obtener una muestra con un contenido agua inicial cercano al límite líquido, el cual difiere dependiendo del tipo de suelo, como se ha visto anteriormente (véase figura 20). Es esencial tener en cuenta la diferencia entre las dimensiones de las muestras en los distintos test ejecutados, apreciable en la tabla 23.

En primer lugar, existe una gran diferencia en la pérdida del contenido de agua a lo largo del tiempo de secado entre la bentonita y la arcilla Werrabee, ambos considerados como suelos muy plásticos. A pesar de que en ambas arcillas se realizaron muestras con una humedad inicial cercana al límite líquido (1.0-1.5), la arcilla Werrabee presentó una estabilidad a las 50-60 horas aproximadamente, a la cual llega con una pendiente bastante importante, similar a la del caolín, representada en la figura 20a. Por otro lado, la bentonita a igualdad de condiciones, llega a un contenido residual de agua a alrededor de las 170 horas, con una curva con una pendiente mucho más grande, como se muestra en la figura 19. Es cierto que las condiciones de contorno, más específicamente las dimensiones de los moldes, varían según los tipos de test. Sin embargo en muestras de este tamaño, con una diferencia de aproximadamente 23cm³ de volumen y, más importante, con una proporción de arcilla/arena con las mismas magnitudes, se podrían considerar los comportamiento de ambas mezcla como si estuvieran a igualdad de condiciones.

En la figura 20b se muestra como varía estas misma propiedad, pero, esta vez, variando las condiciones ambientales de temperatura en una misma muestra a 1.5 veces

el límite líquido. Como es de esperarse, a mayor temperatura, mayor será la velocidad de evaporación del agua en las muestras, como lo indica la gráfica en donde comparan muestras con temperaturas que van desde los 24.5°C hasta los 38.8°C.

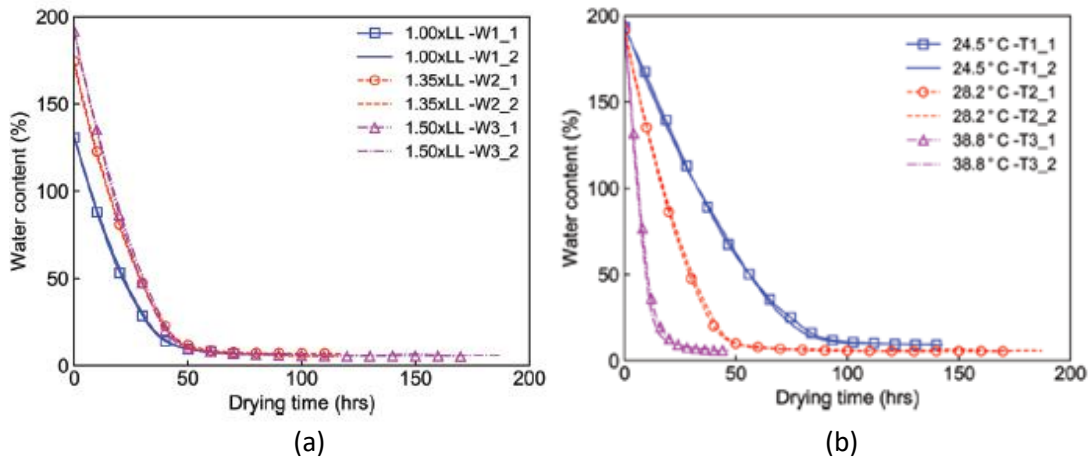


Figura 20. Pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo de secado en una muestra de a) Arcilla Werribee al LL, 1.35xLL y 1.5xLL. b) Arcilla Werribee al 1.5xLL a diferentes temperaturas. (Sánchez et al., 2019)

Además de esto, según el artículo publicado por **Kodikara et al., 2004**, se muestra como la misma arcilla Werribee presenta una pérdida de humedad significativamente más lenta, cuya tendencia se observa en la figura 21, con el simple hecho de aumentar considerablemente la humedad relativa, de 27% a 40/50%, y de disminuir la temperatura, de unos 26°C a 16/18°C.

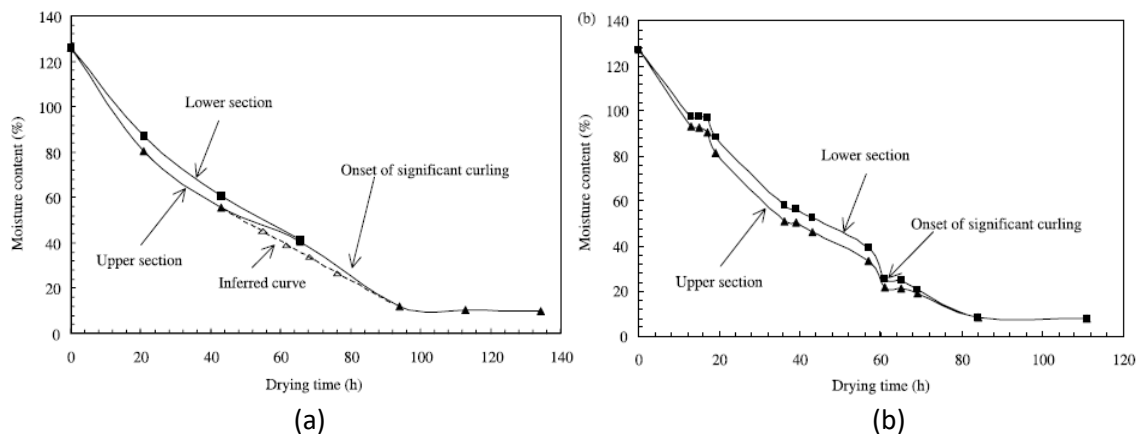


Figura 21. Pérdida del contenido de agua (%) a lo largo del tiempo de secado en una muestra de a) Arcilla Werribee al LL a 16°C y 50% de HR. b) Arcilla Werribee al LL a 18°C y 40% de HR. (Kodikara et al., 2004)

Lo que se puede llegar a deducir con estos resultados es la existencia de una tendencia, que difiere significativamente dependiendo del tipo de suelos y las

condiciones, en la pérdida del contenido de agua. Esta tendencia se puede expresar en forma de velocidad de evaporación (g/h), representada en las figuras 22, 23 y 24. De esta manera se podrá visualizar de una forma más sencilla para, así, investigar a qué ritmo ocurre la pérdida de agua en las distintas muestras.

A simple vista, la característica más significativa es como la tendencia, en el caso de la arcilla más plástica, se mantiene con una pendiente prácticamente constante a lo largo del ensayo mientras que, para el caso del caolín, llega a un punto (aproximadamente a las 90 horas) en el cual se produce un descenso drástico, relativamente, y luego continúa con la misma tendencia que llevaba anteriormente.

Además, la velocidad de evaporación del agua en la bentonita es en promedio más pausado en comparación con el caolín (véase figura 24), como era de esperarse. Como se ha visto en el capítulo 2, la estructura de la bentonita difiere del caolín, de manera que las partículas de los minerales de la bentonita son más diminutas y la superficie específica es más grande, favoreciendo así la adsorción de las moléculas del agua. Esto es así hasta un cierto punto, alrededor de las 90 horas, ya mencionado anteriormente, en donde ya los suelos compuestos por caolín han estabilizado y la velocidad de pérdida de agua baja de una manera drástica ya que no existe una cantidad de agua significativa en la estructura por evaporarse.

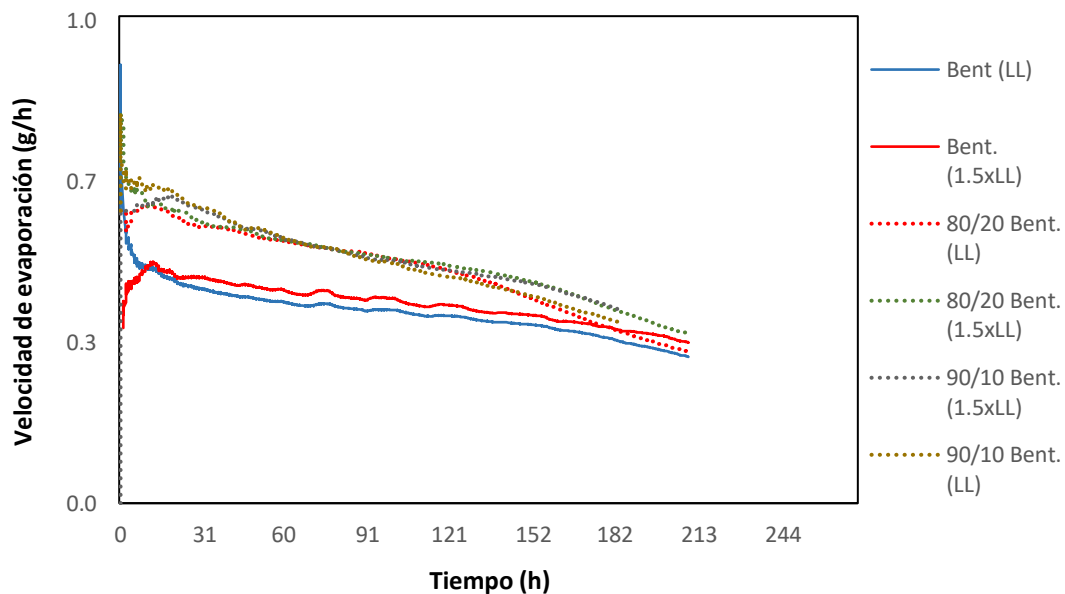


Figura 22. Velocidad de evaporación (g/h) a lo largo del tiempo en diferentes mezclas con bentonita.

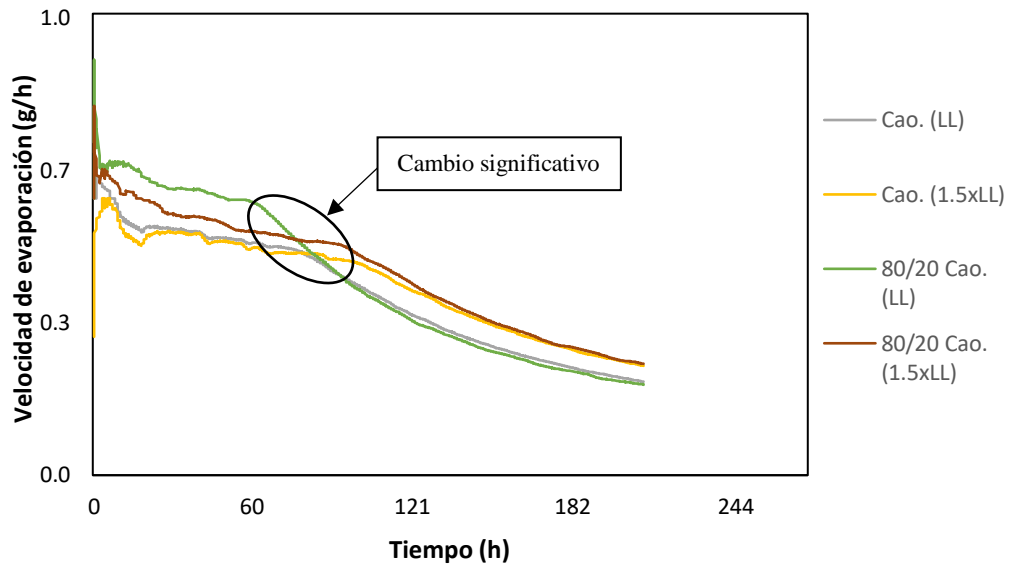


Figura 23. Velocidad de evaporación (g/h) a lo largo del tiempo en diferentes mezclas con caolín.

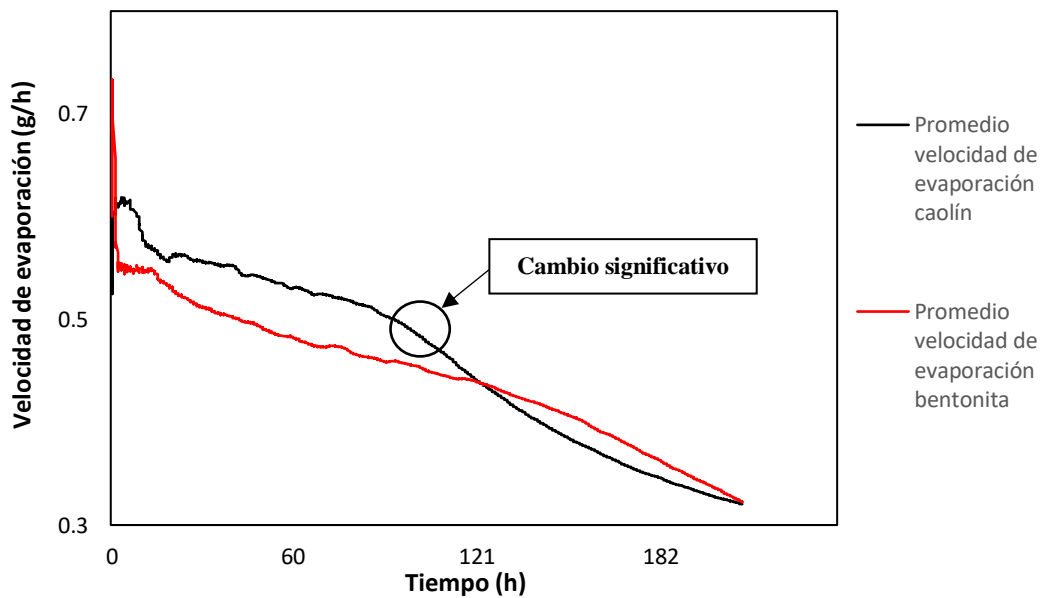


Figura 24. Velocidad de evaporación promedio (g/h) a lo largo del tiempo tanto de las mezclas de bentonita como de caolín.

5.3.- Retracción por secado.

Aunque los datos se hayan tomado con un intervalo de tiempo de 10 minutos, se intenta centrarse en aquellos datos en donde las mezclas padecen un cambio apreciable en su aspecto. Esto se realiza de una manera detallada para cada muestra ya que se da por hecho que cada ensayo tendrá un resultado totalmente distinto en cada tiempo transcurrido del proceso de secado. En las tablas 1-10 que se encuentran adjuntadas en el anexo, se representan los valores de retracción más significativos de cada muestra en el eje x, tanto de la parte superior e inferior izquierda como de la derecha y, además, la retracción en el eje y. Además, posteriormente se calcula la retracción en el eje z para, así, calcular la deformación volumétrica (%) que padecen las muestras.

En algunos casos las mediciones fueron más sencillas que en otras ya que la estabilización de los suelos difiere, en términos de tiempo, de manera significativa entre los distintos tipos de mezclas. En otros casos, el suelo presentó un arqueado tan considerable que resultó en una o, en algún caso varias, fracturas de la muestra, apreciable en la figura 25.

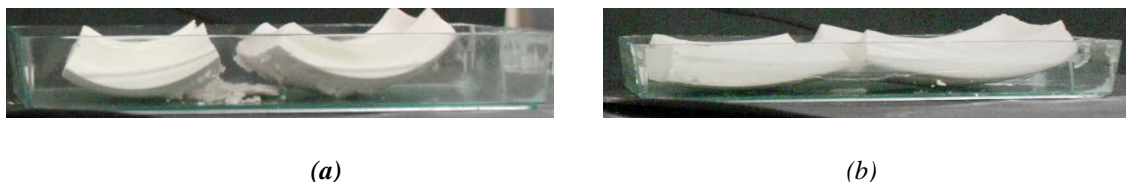


Figura 25. Fractura final en a) Ensayo 7. b) Ensayo 9.

5.3.1.- Retracción por secado en el eje y. (Δh)

En primer lugar, existe una diferencia notable entre la retracción en el eje x y en el eje y, en función del tipo de suelo utilizado. Aunque ambas siguen, más o menos, la misma tendencia, la retracción en el eje x es mucho más significativa para todos los casos estudiados, independientemente del tipo de suelo. En el artículo presentado por Kodikara et al., (2004), se intenta encontrar un modelo numérico que intente crear un algoritmo capaz de modelar el comportamiento, en términos de retracción, de las muestras (véase figura 27).

Si se compara el caolín con la bentonita con proporciones 100/0, ambos tests resultan en valores muy distintos, de manera que la retracción en las arcillas más plásticas suele ser considerablemente más apreciable. Observando la figura 26a y 26c, queda claro como la retracción en el eje x del suelo más plástico supera significativamente al caolín. Ahora bien, otro punto importante que se puede visualizar en las figura 26a, 26b, 26c y 26d es que, aunque el comportamiento en eje x difiera, los valores en el eje y son bastante similares entre muestras, con el mismo contenido inicial de agua (%) y condiciones ambientales, a lo largo del proceso o, por lo menos, se asemejan entre ellos.

Otro punto a destacar es la existencia de una gran similitud en esta conducta de encogimiento en ambos ejes entre la arcilla Werribee y la bentonita al límite líquido (26a 26b y 27) figura Aunque que en estos ensayos las condiciones ambientales de

temperatura y humedad relativa difieren de una manera considerable, se puede suponer que ambos suelos padecen de una tendencia en el comportamiento muy parecido.

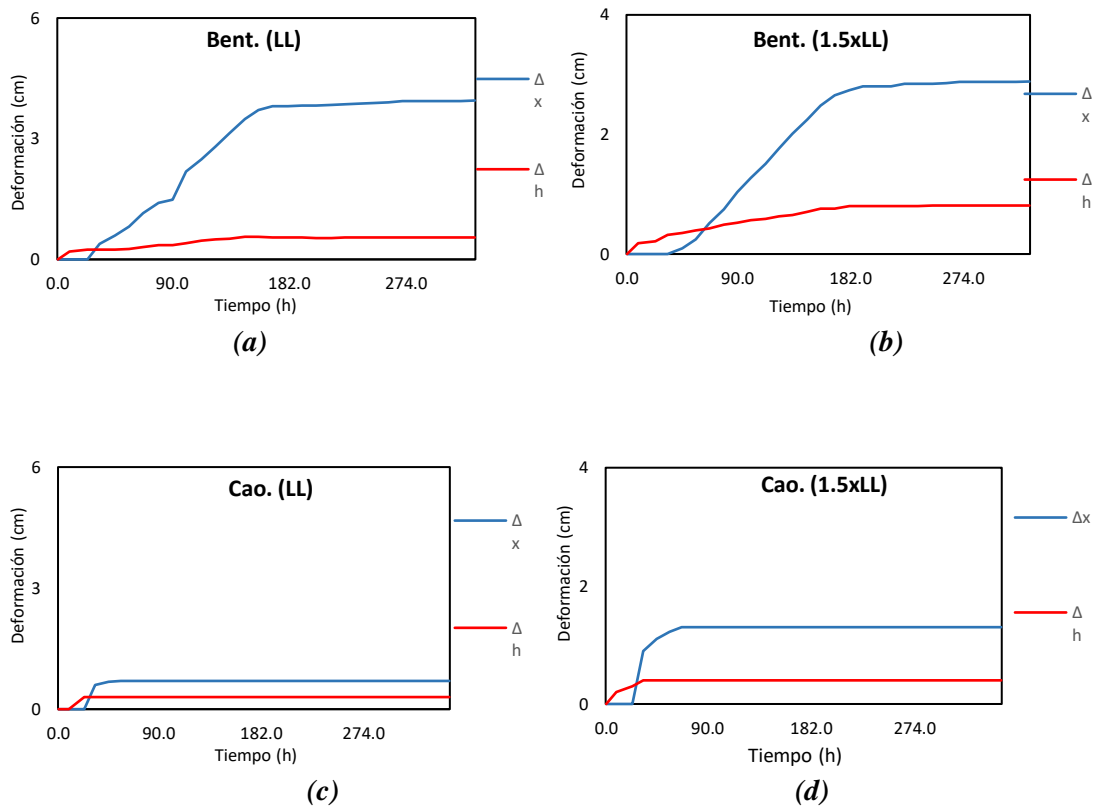


Figura 26. Deformación en los ejes x , y a lo largo del tiempo para muestras a) bentonita al LL. b) Bentonita al 1.5xLL. c) Caolín al LL. d) Caolín a 1.5xLL.

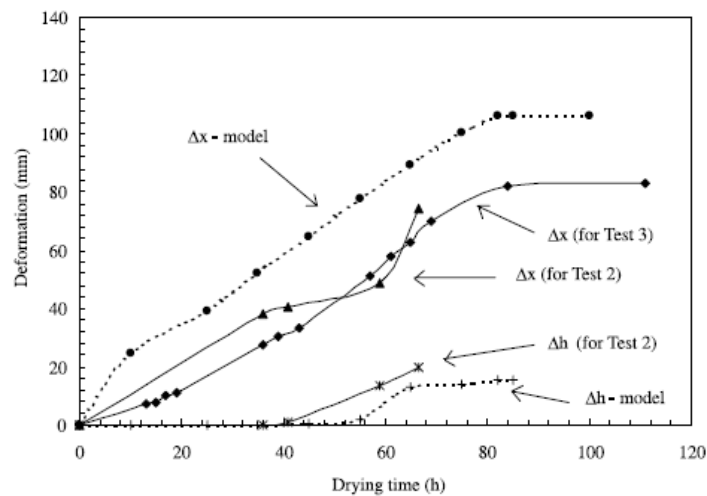


Figura 27. Deformación en los ejes x , y a lo largo del tiempo para una muestra de arcilla Werrabee al LL a 18°C y 40% de HR. (Kodikara et al., 2004)

La forma más directa de observar la diferencia que existe entre los resultados finales de las mezclas es a partir de las fotografías, apreciables en la figura 28. Por un parte se observa como las muestras de bentonita, en comparación con las de caolín, han sufrido un encogimiento mayor para ambos casos y, por otro lado, se puede ver como el encogimiento en eje y es más importante a medida que se aumenta la humedad inicial (%) de las muestras.

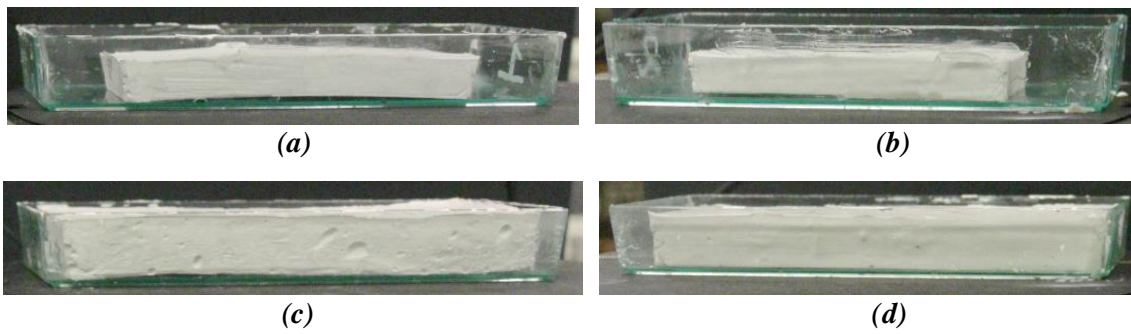
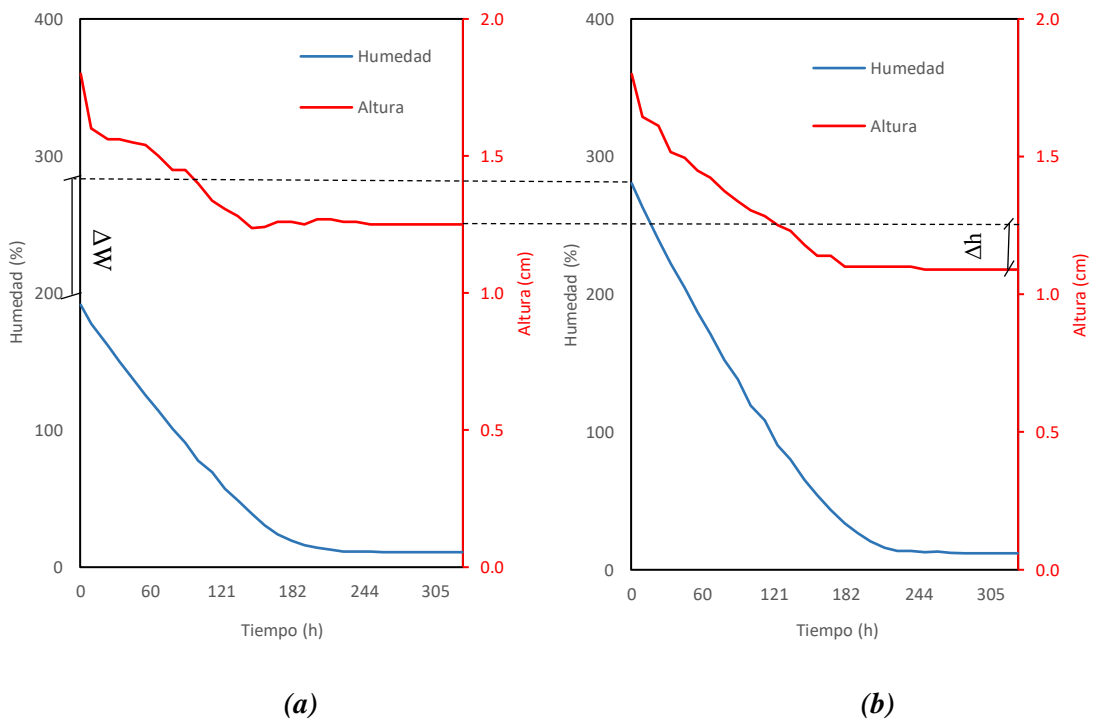


Figura 28. Resultado final del proceso de secado para las muestras de a) bentonita al LL. b) Bentonita al 1.5xLL. c) Caolín al LL. d) Caolín al 1.5xLL.



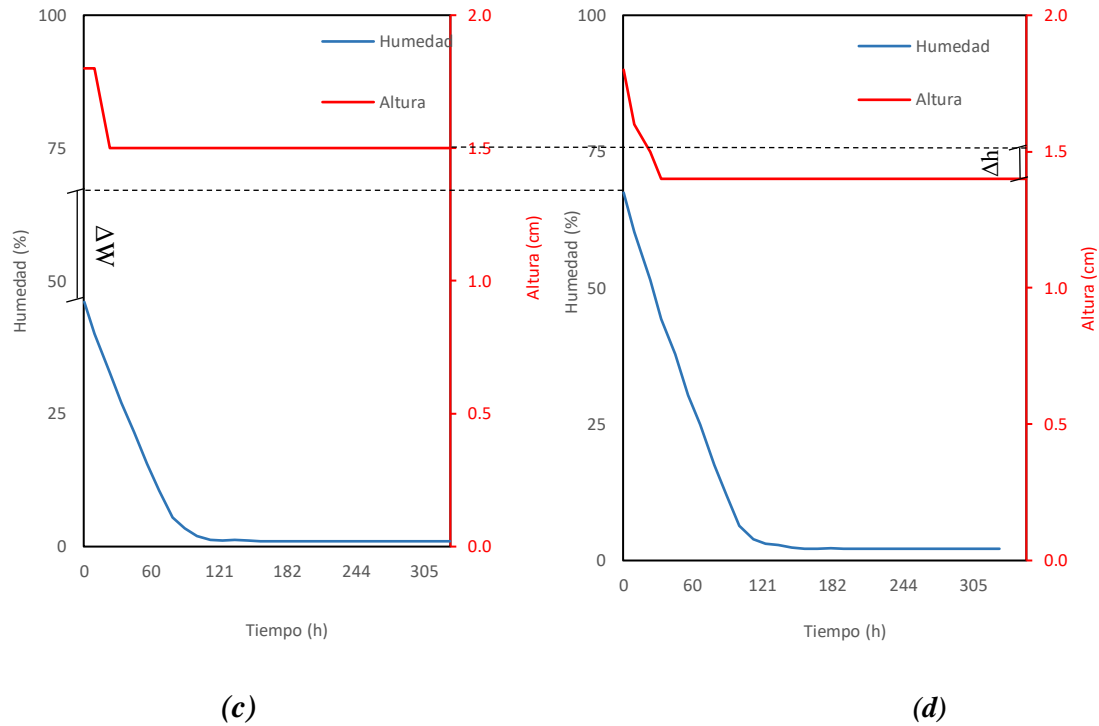


Figura 29. *Altura final resultante debido al proceso de secado para las muestras de a) bentonita al LL. b) Bentonita al 1.5xLL. c) Caolín al LL. d) Caolín al 1.5xLL. (ΔW : Diferencia del contenido de humedad inicial; Δh : Diferencia de altura final)*

Como se ha mencionado en el párrafo anterior, a medida que se aumente el contenido de agua inicial (%) para estas muestras con una proporción 100/0, aumentará, independientemente del suelo, la retracción final en el eje y. A partir de fotografías, representadas en la figura 30, proporcionadas por Al-Jeznawi et al., (2019), donde se crea una muestra de caolín con una humedad igual a 3 y 5 veces el límite líquido, se pueden comparar con los casos anteriores y se aprecia una diferencia más relevante.

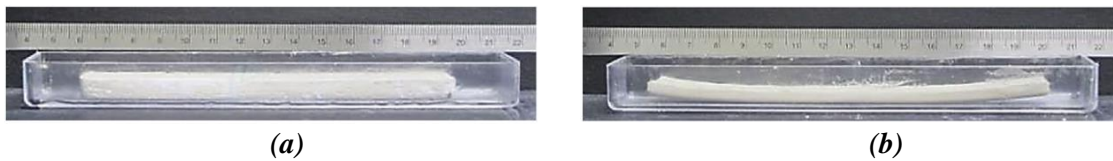


Figura 30. *Resultado final del proceso de secado para las muestras de a) caolín a 3xLL. b) caolín a 5xLL. (Al-Jeznawi et al., 2019)*

Este comportamiento, al parecer, es independiente de la proporción de la mezcla utilizada o, por lo menos, de proporciones relativamente bajas de arena (10-20%). Para atender este punto, se hace una sencilla comparación, posible gracias a las fotografías proporcionadas nuevamente por Al-Jeznawi et al., (2019). En términos de retracción, el caolín gana, aunque no sea tanta la diferencia como en la bentonita, deformación por retracción en el eje y. (Véase figura 31)

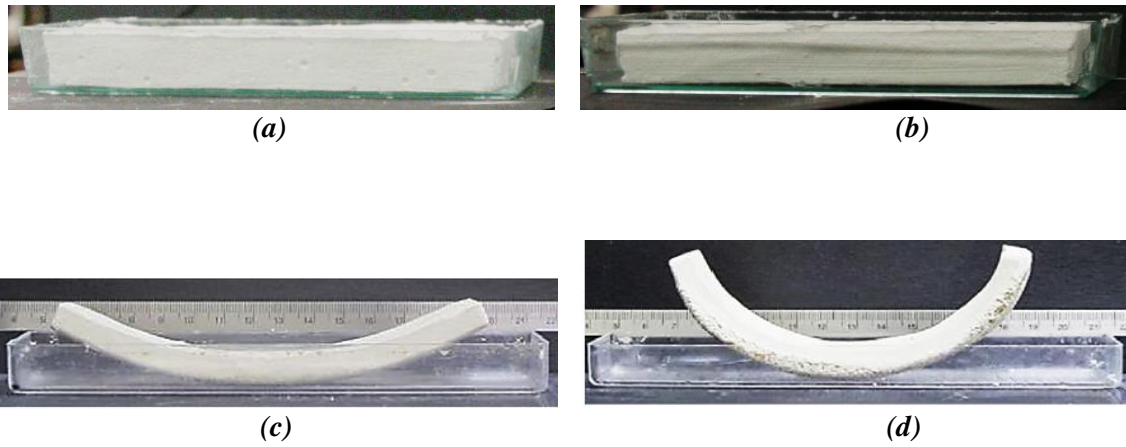


Figura 31. Resultado final del proceso de secado para las muestras de a) 80 caolín/20 arena al LL. b) 80 caolín/20 arena al 1.5xLL. c) 80 caolín/20 arena al 2.5xLL. d) 80 caolín/20 arena al 3xLL. Fuente fotografía c) y d): (Al-Jeznawi et al., 2019)

Se ha realizado otra comparación, posible gracias a las fotografías proporcionadas por Zielinski et al., (2014), entre muestras con un 90% caolín y 10% de arena de Ottawa con diferente contenido de humedad relativa, arena cuyas características han sido descritas en el capítulo 3. Si se observa detalladamente, se logra ver que existe una contracción en el eje y de las muestras a medida que el contenido de agua inicial va aumentando, comportamiento parecido a todas las mezclas anteriores. (Véase figura 32)



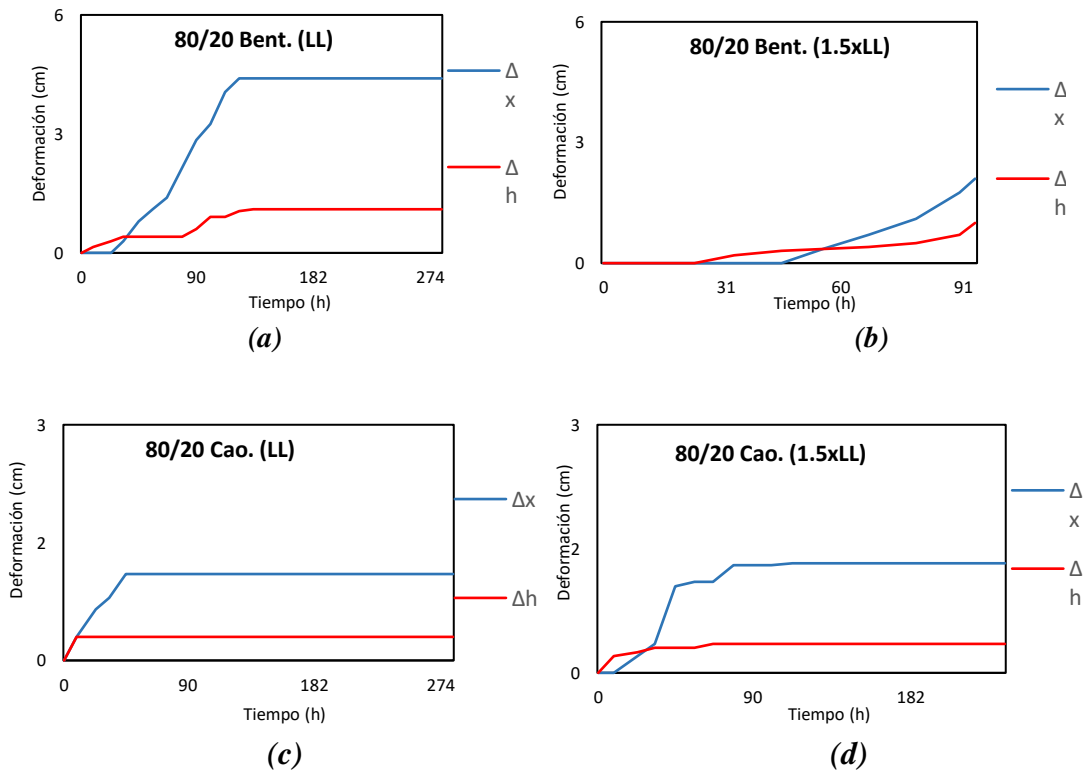
Figura 32. Resultado final del proceso de secado para las muestras de 90 caolín/10 arena de Ottawa al 2, 2.5 y 3xLL, respectivamente. (Zielinski et al., 2014)

Así, por tanto, se podrá suponer que, en relación al eje y, el valor de retracción total final tendrá una tendencia en aumentará en este tipo de suelos arcillosos o, por lo menos, con estas proporciones definidas.

5.3.2.- Retracción por secado en el eje x. (Δx)

Como se verá a continuación, la conducta de las muestras en ambos ejes funciona de una manera diferente. El eje x parece tener más complejidad ya que no parece tener una tendencia general para todos los casos. Comparando las figuras 29a con 29c y 29b con 29d, mencionadas más arriba, es válido llegar a pensar que existe, de alguna manera, una relación totalmente opuesta entre el resultado final de encogimiento en el eje x entre los distintos suelos arcillosos. Por un lado, la bentonita pura disminuye el valor de la deformación final a medida que se agregue un porcentaje mayor de agua inicial. En contraste, el caolín padece de un comportamiento en donde a medida que se comienza con un porcentaje de humedad inicial mayor, la deformación final aumenta.

El mismo comportamiento parece ocurrir en muestras que contienen un porcentaje de 80% de arena en la macroestructura (véase figura 33). Independientemente del contenido de arena, o por lo menos para estos casos que van de 0 a un 20%, el comportamiento, mencionado en el texto anterior, pareciera estar marcado por el suelo arcilloso.



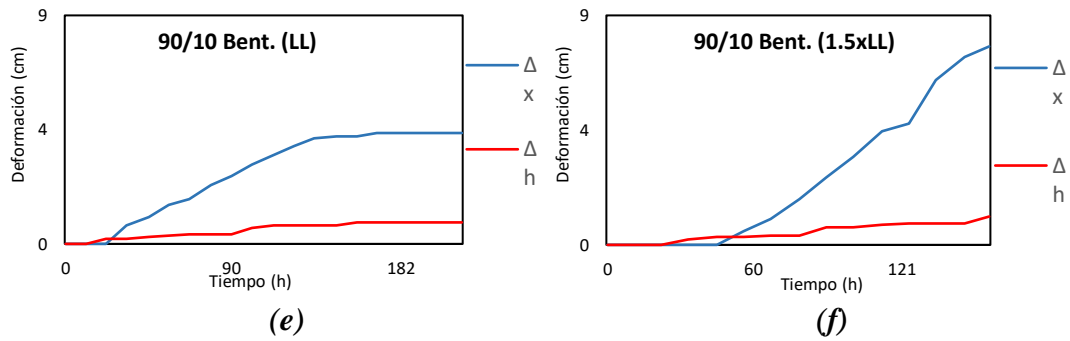


Figura 33. Deformación en los ejes x, y a lo largo del tiempo para muestras a) 80 bentonita/20 arena al L. b) 80 bentonita/20 arena al 1.5xLL. c) 80 caolín/10 arena al LL. d) 80 caolín/10 arena al 1.5xLL. e) 90 bentonita/10 arena al LL. f) 90 bentonita/10 arena al 1.5xLL.

Otra característica que puede ser resaltada es la manera en que la bentonita, independientemente del contenido inicial de agua, aumenta la deformación total final a medida que se agregan gruesos a la estructura (100/0 – 90/10). Sin embargo, viendo las figuras 34 y 35 indica que al seguir agregando gruesos llega un punto en donde esta contracción en el eje x deja de aumentar y resulta en una deformación total menor a la proporción anterior (90/10 – 80/20). Es decir, de alguna manera existe un punto de inflexión, en términos de altura de arqueado, a medida que se agregan gruesos en la estructura.

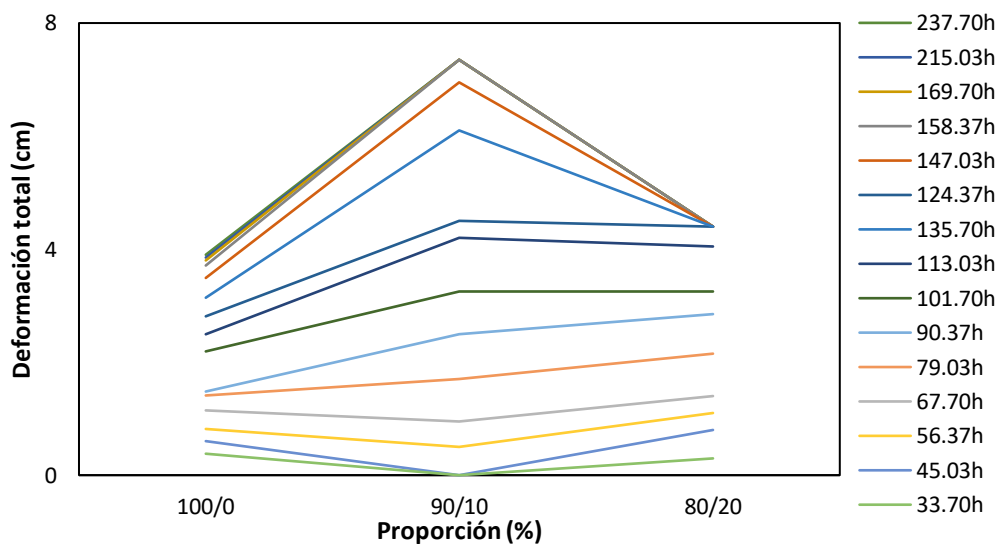


Figura 34. Gráfica deformación final total (cm) en función de la proporción de gruesos para una bentonita al LL.

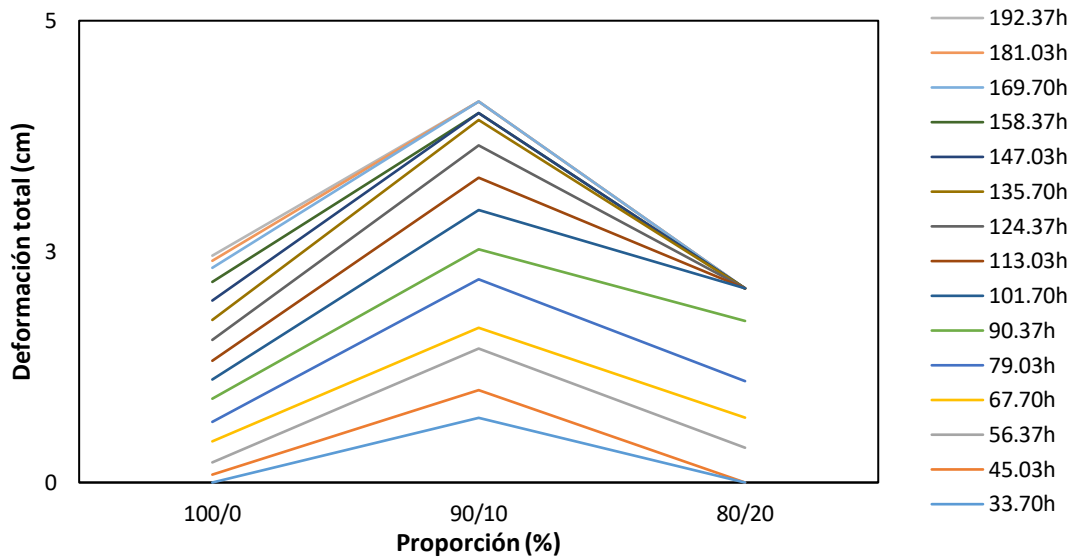


Figura 35. Gráfica deformación final total (cm) en función de la proporción de gruesos para una bentonita al 1.5xLL.

Para concluir con este apartado se realizó una representación gráfica, apreciable en las figuras 36, 37, 38, 39 y 40, de las muestras con el fin de comparar los resultados finales en términos de encogimiento tanto en el eje x como en el eje y. Con las muestras ejecutadas en este proyecto, la relación opuesta entre la bentonita y el caolín en relación con la deformación en el eje x, se produce en todos los casos para los distintos tipos de suelos.

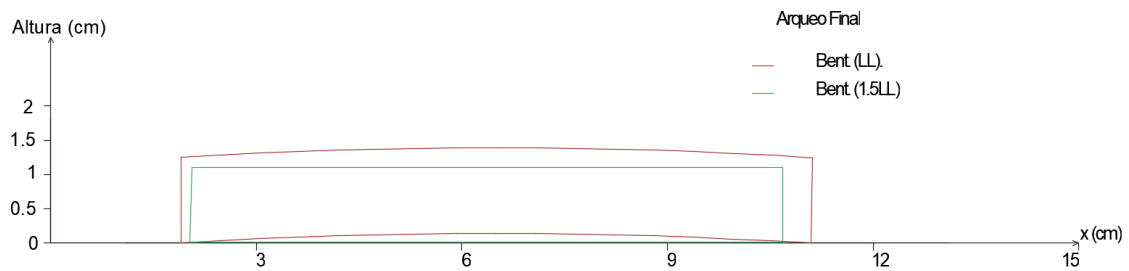


Figura 36. Comparación mediante una representación gráfica del resultado final de una muestra de bentonita al LL y otra al 1.5xLL.

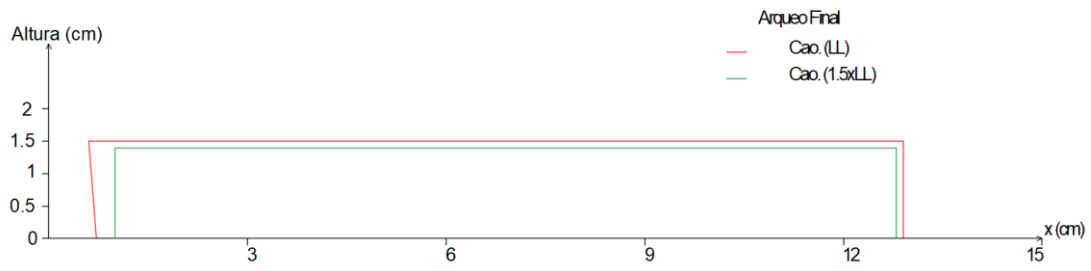


Figura 37. Comparación mediante una representación gráfica del resultado final de una muestra de caolín al LL y otra al 1.5xLL.

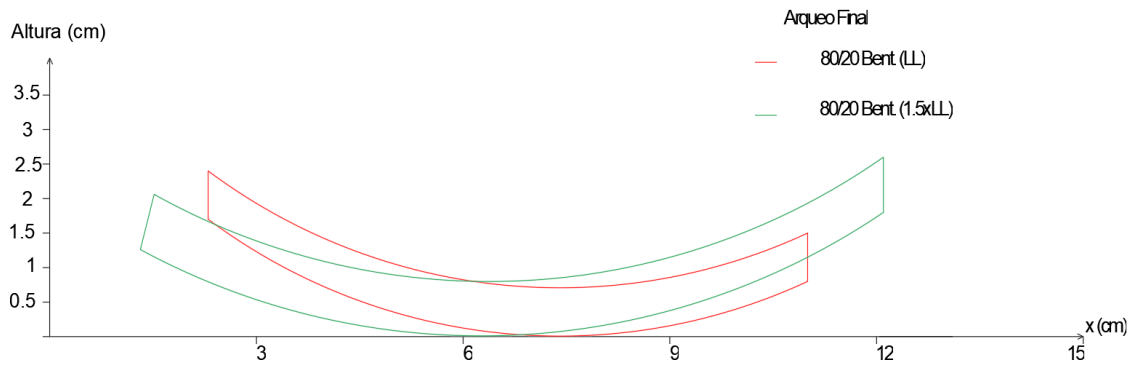


Figura 38. Comparación mediante una representación gráfica del resultado final de una muestra de 80bentonita/20 arena al LL y otra al 1.5xLL.

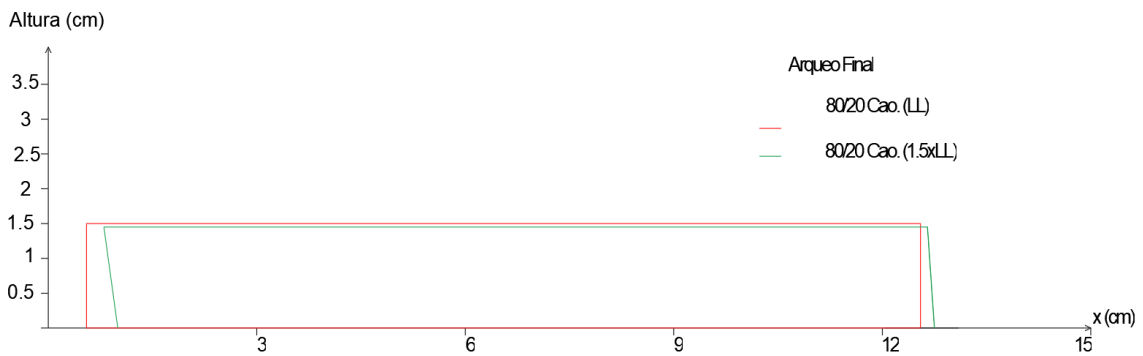


Figura 39. Comparación mediante una representación gráfica del resultado final de una muestra de 80 caolín/20 arena al LL y otra al 1.5xLL.

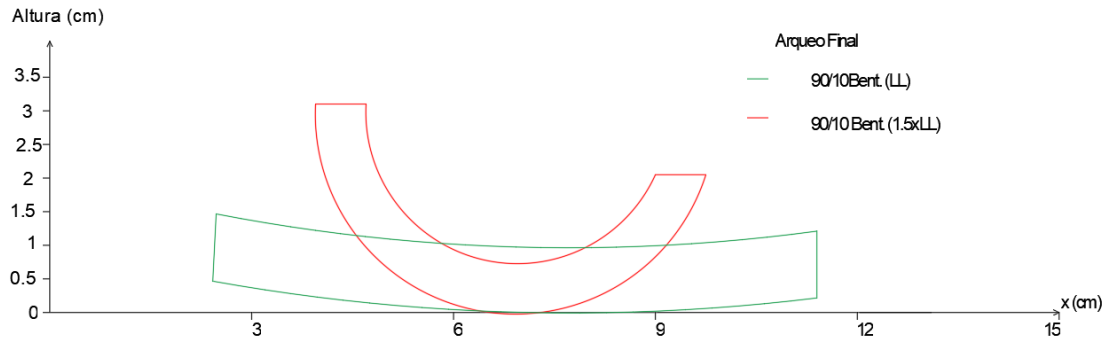
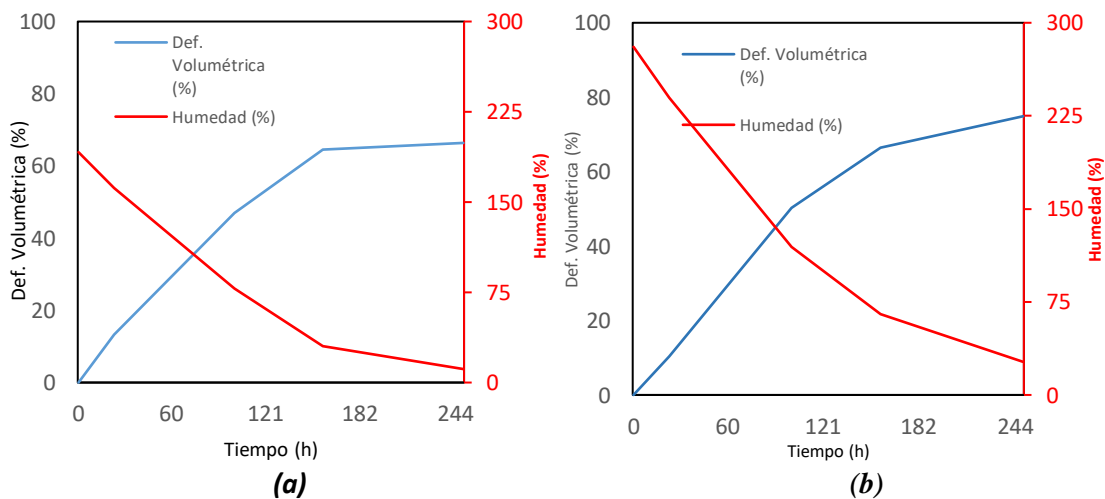


Figura 40. Comparación mediante una representación gráfica del resultado final de una muestra de 90bentonita/10 arena al LL y otra al 1.5xLL.

5.3.3.- Deformación volumétrica.

Si bien la retracción en ambos ejes x, y se dan de manera distinta, ambos están directamente relacionados ya que son producto del proceso de secado. Luego, tomando valores de la retracción en el eje z (a lo ancho) se puede obtener una representación de cómo se deforma a medida que pierde humedad en el transcurso del tiempo. Es coherente que, para esta parte del análisis, los resultados sean similares a los obtenidos en los capítulos anteriores, 5.3.1 y 5.3.2, sobre la retracción en las muestras. En la figura 41a y 41b se observa como para un suelo tan plástico como la bentonita, la deformación volumétrica suele ir con una pendiente más elevada y, además, alcanzando valores mucho más significativos en comparación con el caolín, representado en las figuras 41c y 41d.



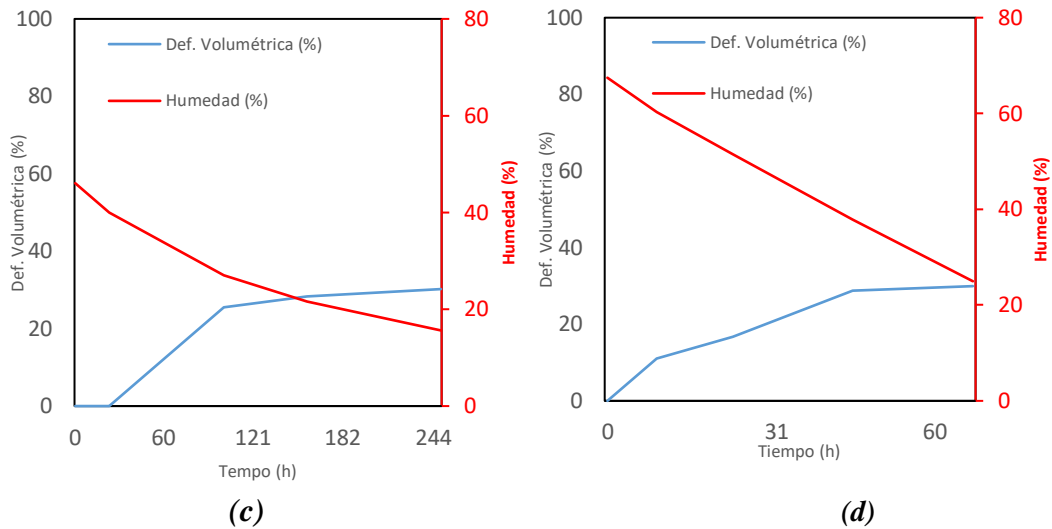
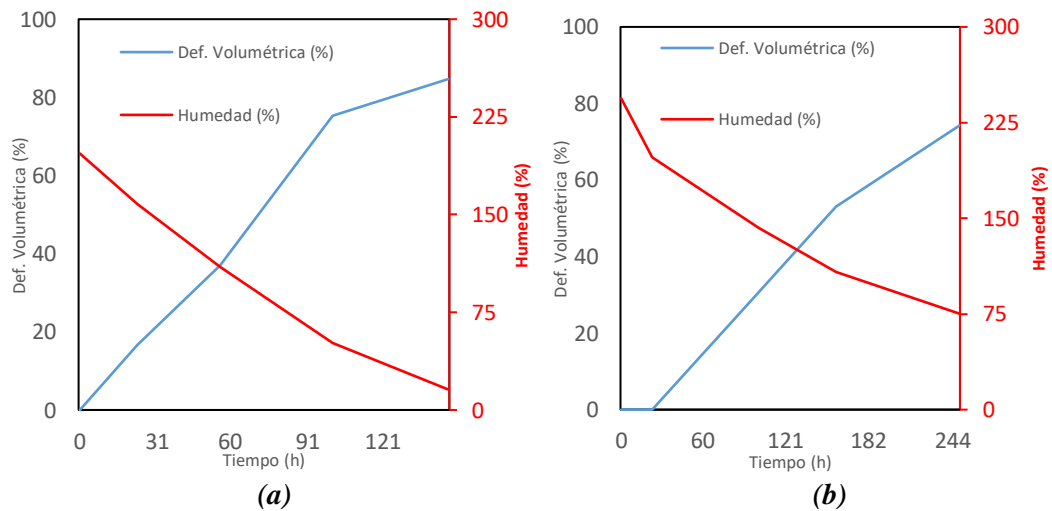


Figura 41. Deformación volumétrica y pérdida del contenido de agua en función del tiempo para muestras con a) Bentonita al LL. b) Bentonita al 1.5xLL. c) Caolín al LL. d) Caolín al 1.5xLL.

El mismo comportamiento se obtiene en muestras con proporciones de un 20% de gruesos en la mezcla (véase figura 42). El caolín, representado en las figuras 42c y 42d, alcanza valores muchos menores y en un tiempo más rápido mientras que la bentonita con estas proporciones, representada en las figuras 42a y 42b, parece adoptar el mismo comportamiento que la mezcla con un 100 de arcilla.



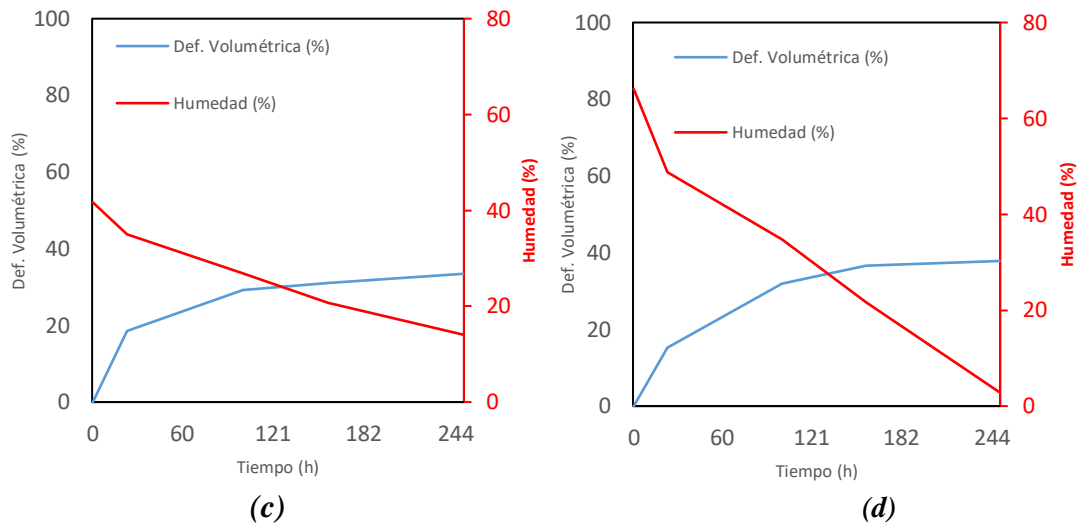


Figura 42. Deformación volumétrica y pérdida del contenido de agua en función del tiempo para muestras con a) 80 Bentonita/ 20 arena al LL. b) 80 Bentonita/ 20 arena al 1.5xLL. c) 80 Caolín/ 20 arena al LL. d) 80 Caolín/ 20 arena al 1.5xLL.

5.4.- Análisis cualitativo del arqueo.

Como ya se ha comentado anteriormente, existen una gran cantidad de factores que pueden influenciar en el arqueo final de las muestras. Este fenómeno en algunos casos puede ser completamente nulo mientras que, en otros casos, puede ser bastante significativo. Este apartado consiste básicamente en explicar cómo influyen estos factores en las muestras, específicamente en el fenómeno principal del trabajo, el arqueo.

Así pues, primero es necesario ordenar de alguna manera los datos en los que se tiene información acerca de alturas y formas de arqueo. En la tabla 19 se expresan todos los ensayos recopilados, desde los obtenidos en los artículos científicos, como los obtenidos mediante el trabajo experimental realizado para este trabajo.

Luego, con la finalidad de estructurar este parte del trabajo, el estudio se dividirá dependiendo de los diferentes factores que parecen poseer una influencia importante en el comportamiento de las muestras:

1. La humedad o contenido inicial de agua en la muestra.
2. Las condiciones ambientales. (e.g. humedad relativa, temperatura, etc.)
3. La micro y macroestructura.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo final	Altura de arqueo (mm)
1	Bentonita	191.41	1.2	Ω	1.5
2	Bentonita	280.6	1.8	No arqueó	0
3	Caolín	46.04	1.0	No arqueó	0
4	Caolín	67.46	1.5	No arqueó	0
5	80 Bent./20 Arena	196.9	1.2	U	17
6	80 Caol./20 Arena	41.66	0.9	No arqueó	0
7	80 Bent./20 Arena	243.96	1.5	U	18
8	80 Caol./20 Arena	63.13	1.4	No arqueó	0
9	90 Bent./10 Arena	182.10	1.1	U	4.5
10	90 Bent./10 Arena	274.64	1.7	U	31
T6/T6	Arcilla Werribee	130.76	1.0	Ω	42.7
T6/T7	Arcilla Werribee	131.47	1.0	Ω	41.97
T6/T9	Arcilla Werribee	172.47	1.4	Ω	36.42
T6/T8	Arcilla Werribee	174.48	1.4	Ω	33.63
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	1.5	Ω	53.96
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	1.5	Ω	33.9
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	1.5	Ω	32.51
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	1.5	Ω	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	1.5	Ω	18.69
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	1.6	Ω	54.544
T6/T14	90 Werribee / 10 Arena	172.76	1.4	Ω	31.86
T6/T15	90 Werribee / 10 Arena	172.92	1.4	Ω	32.29
T6/T16	80 Werribee / 20 Arena	174.35	1.4	Ω	16.43
T6/T17	80 Werribee / 20 Arena	171.76	1.4	Ω	15.63
T6/T18	70 Werribee / 30 Arena	165.33	1.3	U	28.77
T6/T19	70 Werribee / 30 Arena	166.65	1.3	U	25.64
T6/T5	Caolín de NY	86.62	1.6	U	3.77
T4/T2	Caolín	52	2.0	U	<1.0
T4/T3	Caolín	65	2.5	No arqueo	0
T4/T4	Caolín	78	3.0	U	<2.0
T5/T8	Caolín	126	3.0	U	<2.0
T5/T9	Caolín	210	5.0	U	<6.0
T5/T7	95 Caolín / 5 Arena	126	3.0	U	12.5
T4/T5	90 Caolín / 10 Arena	52	2.0	U	0
T4/T6	90 Caolín / 10 Arena	65	2.5	U	<1.0
T4/T7	90 Caolín / 10 Arena	78	3.0	U	<2.0
T5/T6	90 Caolín / 10 Arena	126	3.0	U	20-24
T5/T1	85 Caolín / 15 Arena	105	2.5	No arqueo	0
T5/T2	85 Caolín / 15 Arena	115.5	2.8	U	20-25
T5/T3	85 Caolín / 15 Arena	126	3.0	U	35-40
T5/T4	80 Caolín / 20 Arena	105	2.5	U	25-30
T5/T5	80 Caolín / 20 Arena	126	3.0	U	60-65
T6/T3	Arcilla de Altona North	104.11	1.5	Ω	22.04
T6/T4	Arcilla de Altona North	106.18	1.5	Ω	24.17

Tabla 19. Ensayos totales recopilados con información acerca del arqueo.

5.4.1.- La humedad o contenido inicial de agua en la muestra.

5.4.1.1.- Caolín.

El primer paso ha sido ordenar convenientemente la información en tablas de cada tipo de ensayo, en función del tipo de suelo, para facilitar un posterior análisis. De esta manera se obtienen que, por parte de los ensayos recopilados, para un suelo con contenido de 97% de caolín se cuenta con un total de 16 muestras que varían su contenido de humedad inicial y la macroestructura. Este tipo de arcilla tiene el límite líquido (LL) alrededor del 26% y por tanto es considerada como un tipo de suelo poco plástico. La variabilidad en la humedad inicial tomará como referencia este valor de LL.

Según los test realizados en este trabajo, ninguna muestra con el caolín como proporción suelo arcilloso sufrió del fenómeno de arqueo. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 20, las mismas mezclas en otras condiciones si padecen del *curling* y por tanto se descartarán los resultados obtenidos para este apartado.

Es importante destacar que el parámetro principal a analizar es la altura máxima de arqueo del espécimen, tanto de la parte central (arqueo cóncavo) como de los extremos (arqueo convexo).

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/L	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
3	Caolín	46	1.0	No arqueó	0
4	Caolín	67.5	1.5	No arqueó	0
6	80 Caol./20 Arena	41.7	0.9	No arqueó	0
8	80 Caol./20 Arena	63.1	1.4	No arqueó	0
T6/T5	Caolín de NY	86.6	1.6	U	3.77
T5/T7	95 Caolín / 5 Arena	126	3.0	U	12.5
T4/T5	90 Caolín / 10 Arena	52	2.0	U	0
T4/T6	90 Caolín / 10 Arena	65	2.5	U	<1.0
T4/T7	90 Caolín / 10 Arena	78	3.0	U	<2.0
T5/T6	90 Caolín / 10 Arena	126	3.0	U	20-24
T5/T1	85 Caolín / 15 Arena	105	2.5	No arqueó	0
T5/T2	85 Caolín / 15 Arena	115.5	2.8	U	20-25
T5/T3	85 Caolín / 15 Arena	126	3.0	U	35-40
T5/T4	80 Caolín / 20 Arena	105	2.5	U	25-30
T5/T5	80 Caolín / 20 Arena	126	3.0	U	60-65

Tabla 20. Ensayos totales recopilados con muestras en distintas proporciones de caolín con información acerca del arqueo y con la humedad inicial (%) como parámetro fundamental.

De esta manera ha sido relativamente sencillo comparar todas las muestras en una misma gráfica en donde se muestra una altura de arqueado máxima final a partir de una humedad inicial en la muestra. Es importante tener en cuenta que todas las muestras han sido analizadas con las mismas condiciones en términos de: dimensiones de moldes, condiciones ambientales, tipo de suelo.

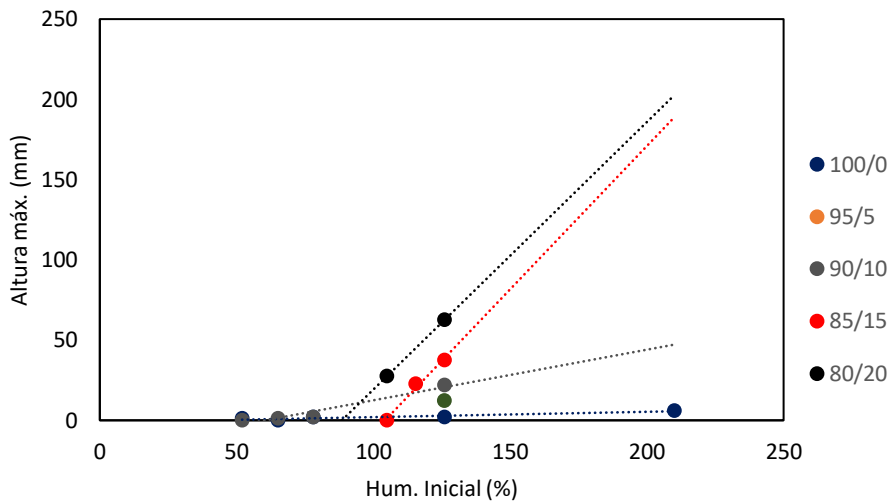


Figura 43. Gráfico comparativo de la altura de arqueado máxima final (mm) y la humedad inicial de la muestra (%) en el caolín.

Sin embargo, la mezcla con una proporción de 95/5 caolín/arena es un dato poco representativo ya que se tiene información solo del valor de contenido de humedad que rodea los 126% y por lo tanto no se tomará en cuenta para el análisis de tendencias.

A primera vista se distingue fácilmente la similitud que existe entre las pendientes de las rectas de las mezclas 85/15 y 80/20, a pesar de tener un 5% de material distinto. Sin embargo, cuando se pierde un 5% de arcilla, a los 90/10, la pérdida en el valor de la pendiente, o, en otras palabras, la tendencia de la altura de arqueado final, es considerablemente más significativo en comparación a una muestra de mayor proporción de arena. En otras palabras, por debajo del 15% de arena se observa la existencia de un comportamiento totalmente diferente como estructura, más similar a la del caolín en sí, teniendo como resultado una altura de arqueado menor.

Es importante tener una cierta cantidad de datos para recrear una tendencia de razonable, es por eso que al fijar una humedad específica se puede observar el comportamiento que tiene el suelo con las mismas condiciones iniciales. En este caso, en el punto con un contenido agua inicial igual a 126%, ya que se tienen suficientes datos como para tener una idea de la inclinación del comportamiento, graficado en la figura 44, en donde se nota de una manera muy evidente una tendencia lineal de altura creciente.

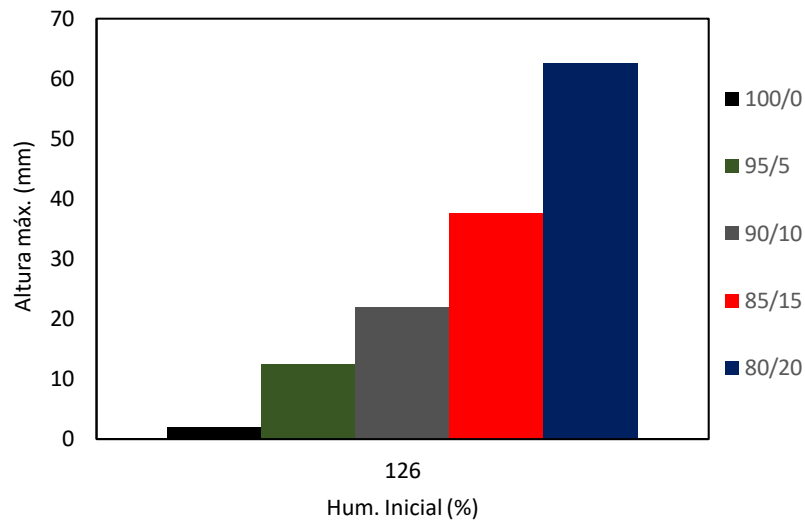


Figura 44. Comparación de la altura de arqueo en las mezclas de Caolín a diferentes proporciones y con un 126% de humedad.

5.4.1.2.- Arcilla Werribee.

Por otra parte, enfocándose en un tipo de arcilla más plástica, como es el caso de la Arcilla de Werribee, es probable que se obtengan resultados distintos. Con el uso de este otro tipo de material arcilloso se han logrado recopilar 16 ensayos, representados en la tabla 21, en donde se han ido variando el contenido de humedad inicial a distintas mezclas de arcilla Werribee con ciertos porcentajes de arena.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
T6/T6	Arcilla Werribee	130.76	1.0	Ω	42.7
T6/T7	Arcilla Werribee	131.47	1.0	Ω	41.97
T6/T9	Arcilla Werribee	172.47	1.4	Ω	36.42
T6/T8	Arcilla Werribee	174.48	1.4	Ω	33.63
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	1.5	Ω	53.96
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	1.5	Ω	33.9
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	1.5	Ω	32.51
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	1.5	Ω	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	1.5	Ω	18.69
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	1.6	Ω	54.544
T6/T14	90 Werribee / 10 Arena	172.76	1.4	Ω	31.86
T6/T15	90 Werribee / 10 Arena	172.92	1.4	Ω	32.29
T6/T16	80 Werribee / 20 Arena	174.35	1.4	Ω	16.43
T6/T17	80 Werribee / 20 Arena	171.76	1.4	Ω	15.63
T6/T18	70 Werribee / 30 Arena	165.33	1.3	U	28.77
T6/T19	70 Werribee / 30 Arena	166.65	1.3	U	25.64

Tabla 21. Ensayos totales recopilados con muestras en distintas proporciones de la arcilla Werribee con información acerca del arqueo y con la humedad inicial (%) como parámetro fundamental.

Haciendo un procedimiento relativamente similar al anterior, representado en la figura 45, es posible obtener valores con el fin de comparar los diferentes datos obtenidos. Es importante destacar que, para este apartado, se descartarán aquellos ensayos en donde las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa no son acordes o similares a los demás casos. Esto es el caso del artículo 6, tests 10, 11, 12 y 13. Así pues, se obtiene una tendencia del comportamiento de este material tan activo.

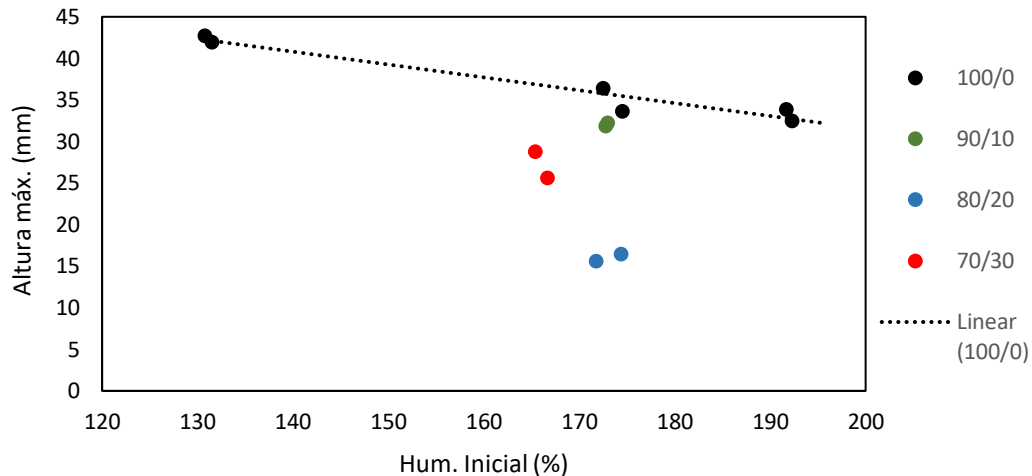


Figura 45. Gráfico de la altura de arqueado máxima final (mm) en función de humedad inicial de la muestra (%) en la arcilla Werribee.

No obstante, en este caso los datos recolectados no han sido lo suficiente como para reproducir una tendencia más clara para este tipo de material debido al limitante número de ensayos realizados. La pequeña aportación que se puede deducir al analizar este gráfico es la tendencia decreciente que tiene la recta o, en otras palabras, el comportamiento es completamente inverso, al menos para la relación 100/0, comparada con la arcilla menos plástica (caolín).

5.4.1.3.- Bentonita.

Por último, se encuentra la bentonita, considerada como la arcilla más plástica de entre todas las que se han estudiado en este trabajo. Esta es, sin duda alguna el suelo que presenta un comportamiento más extremo durante el proceso de secado.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	W/LL	Tipo de arqueo	Altura de arqueo (mm)
1	Bentonita	191.41	1.2	∅	1.5
2	Bentonita	280.6	1.8	No arqueó	0
5	90 Bent./10 Arena	182.10	1.1	U	4.5
7	90 Bent./10 Arena	274.64	1.7	U	31
9	80 Bent./20 Arena	196.9	1.2	U	17
10	80 Bent./20 Arena	243.96	1.5	U	18

Tabla 22. Ensayos totales recopilados con muestras en distintas proporciones de la bentonita con información acerca del arqueo y con la humedad inicial (%) como parámetro fundamental.

Como se puede observar en la figura 46, existen dos tendencias en el mismo tipo de suelo que dependen de la proporción de gruesos en la estructura de la muestra. Para una mezcla con una proporción 100/0, la tendencia es totalmente decreciente a medida que el contenido de agua inicial aumenta, comportamiento que se asemeja al de la arcilla Werribee mencionada anteriormente. Sin embargo, parece ser que existe un punto de inflexión en donde al pasar de 100/0 a proporciones inferiores de arcilla, el comportamiento pasa a ser totalmente inverso, apreciable en la muestra con una proporción 90/10 o 80/20.

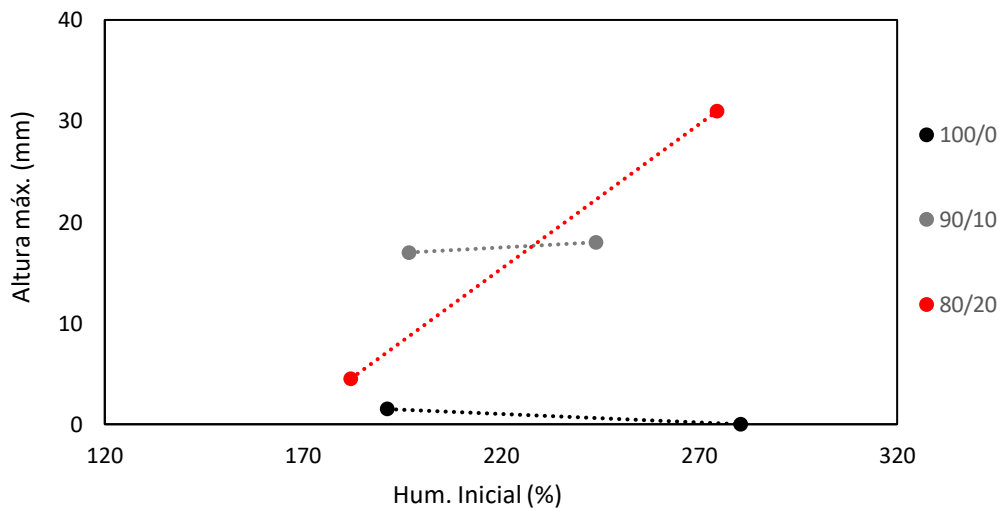


Figura 46. Gráfico de la altura de arqueo máxima final (mm) en función de humedad inicial de la muestra (%) en la bentonita.

5.4.1.4.- Comparación.

Luego, este apartado tiene un mayor interés debido a que se analizará todo el conjunto de datos obtenidos, tanto del caolín como de la arcilla Werribee y la bentonita.

Para la comparación de los resultados entre el caolín y la arcilla Werribee se han recopilado los 31 ensayos en los que estos aparecen y se han intentado relacionar teniendo en cuenta ciertas proporciones. En primer lugar, las dimensiones de los moldes difieren de unos test a otros. Por tanto, es necesario hacer el estudio basándose en una proporción relativa adecuada. Por esta razón se analizará la altura de arqueado de cada muestra relativa a su altura (igual a la altura de molde) inicial.

Molde	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Volumen (cm ³)
1	159	29	14.3	65.9
2	251	25	12.4	77.8
3	131	46	18	108.5

Tabla 23. Tipologías de moldes usados. 1) Zielinski, M et al., 2014; Al-Jeznawi et al., 2019. 2) Kodikara et al., 2004; Sánchez et al., 2019. 3) Trabajo de final de grado.

Relación de la altura de arqueado relativa con respecto el molde n° 1 y n°2:

$$\text{Altura de arqueado relativa } (i = 1,2,3) = \frac{\text{Altura de arqueado final (mm)}}{\text{Altura del molde } i \text{ (mm)}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Así pues, en primer lugar, se han ordenados todos los datos dependiendo de la humedad inicial de cada ensayo, rango que varía desde 52% hasta 210%. No obstante, los datos relacionados a la arcilla Werribee no son suficiente como para hacer una clara representación del comportamiento de los mismos y, por esta razón, solo se ha tenido en cuenta las mezclas 100/0 a distintas humedades para el análisis de la arcilla Werribee pura.

A simple vista en la figura 47, el resultado más relevante se aprecia en la gran distancia que existe entre los valores de altura de la arcilla Werribee y el caolín, siendo más altos para la arcilla más plástica. Además, existe una diferencia marcada entre el comportamiento que adopta cada tipo de suelo. A medida que aumenta la humedad inicial, el Caolín va ganando altura de arqueado relativa al espesor mientras que, en el caso de la arcilla Werribee, esta va adoptando una altura de arqueado relativa al espesor inferior a medida que el contenido de humedad es superior.

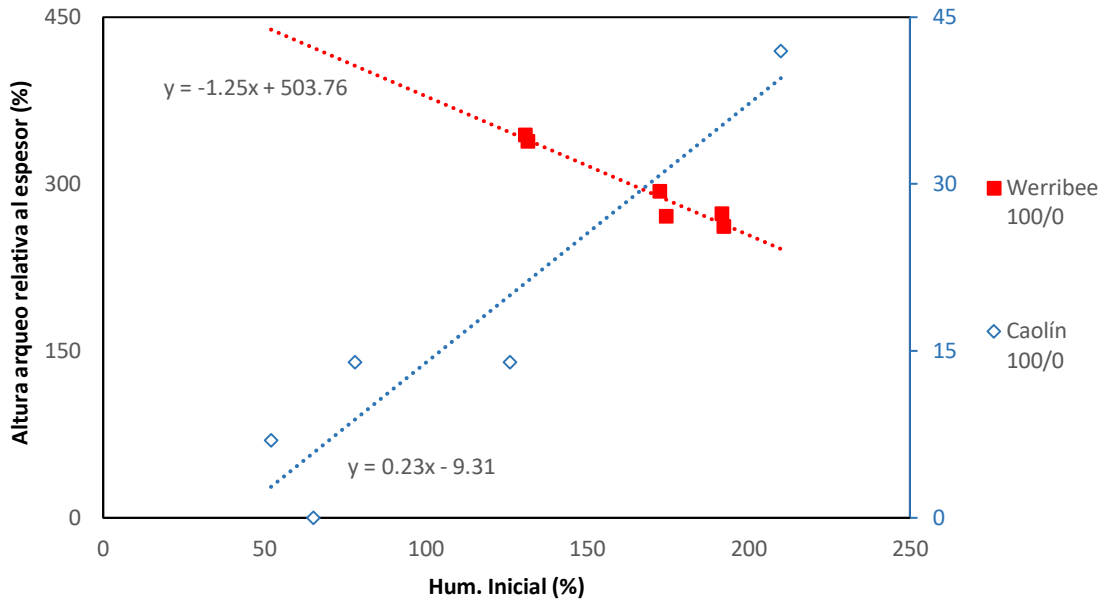


Figura 47. Gráfico comparativo de la altura de arqueado máxima final en relación al espesor (%) y la humedad inicial de la muestra (%) de caolín y arcilla Werribee con una proporción 100/0.

Si se superponen los datos obtenidos a una gráfica donde todas las muestras tengan una misma humedad (véase figura 48), se podría observar como varía la altura de arqueado final teniendo en cuenta solo los suelos. Ciertamente, las condiciones que existen de relación entre el contenido de agua inicial y el límite líquido no son iguales. El caolín a una humedad inicial del 126% presenta una relación W/LL de 3 mientras que, por otra parte, la arcilla Werribee tendrá una relación W/LL de 1. De cualquier manera, para una relación W/LL inferior a 3 el arqueado es prácticamente nulo, como se puede observar en los Test 3 y 4 realizados en el presente trabajo.

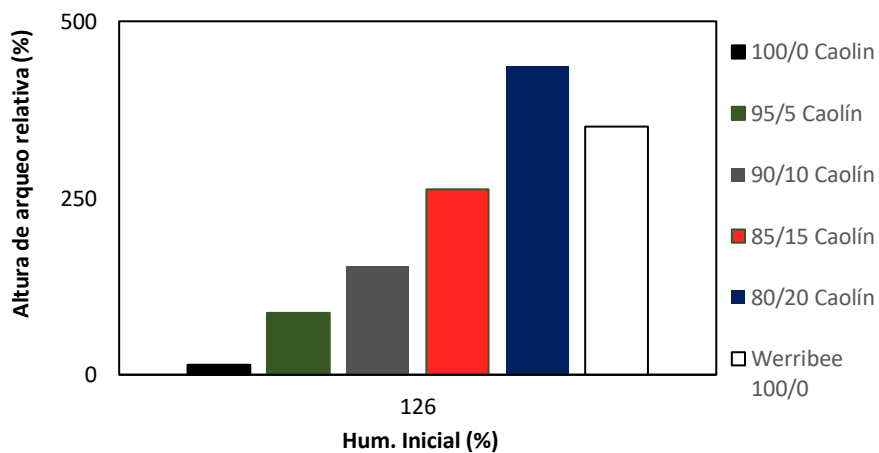


Figura 48. Comparación de la altura de arqueado en las diferentes mezclas de Caolín y arcilla Werribee con 126% de humedad.

Luego, la comparación entre el caolín y la bentonita con distintas proporciones es posible ya que se han llevado a cabo una gran serie de ensayos y por tanto es válido llegar a una conclusión general. Si bien es verdad que para una muestra 100/0 con una humedad inicial relativamente alta, de dos veces el límite líquido más o menos, ambos suelos llegan a tener la misma altura de arqueo con respecto al espesor, la cual es nula, a medida que las proporciones de finos/gruesos se van aumentando, la diferencia entre alturas va creciendo significativamente. Esto es así hasta que llegan a un punto de proporciones, alrededor de los 80/20, en donde vuelven a adoptar una altura de arqueo relativamente similar entre ellas, pero, una vez más, el caolín estando por debajo de la bentonita. (Véase figura 49)

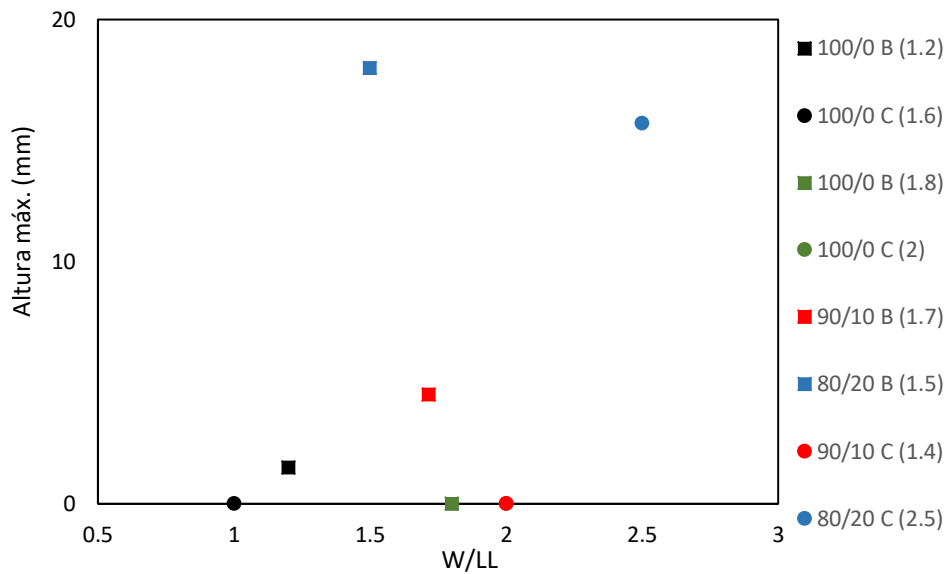


Figura 49. Gráfico comparativo de la altura de arqueo máxima final en relación al espesor (%) y la humedad inicial de la muestra (%) de caolín y bentonita con una proporción 100/0, 90/10 y 80/20.

Ahora bien, al comparar la arcilla Werribee con la bentonita, cuyos suelos presentan una plasticidad muy alta, se observan como a una proporción 100/0 estos presentan un comportamiento que se asemeja, pero con una diferencia de alturas de arqueo bastante dispereja (véase figura 50). Está claro que la bentonita no presenta un arqueo muy significativo en cuanto a proporciones del 100%, o al menos en relaciones W/LL bajas. No obstante, cuando se mezcla con solo un 10-20% de arena, el comportamiento parece no tener el mismo tipo de relación, en términos de humedad inicial y límite líquido de la muestra, ya que se invierte totalmente de manera que la bentonita pasa a un arqueo completamente extremo, superando por tanto a la altura que presenta la arcilla Werribee.

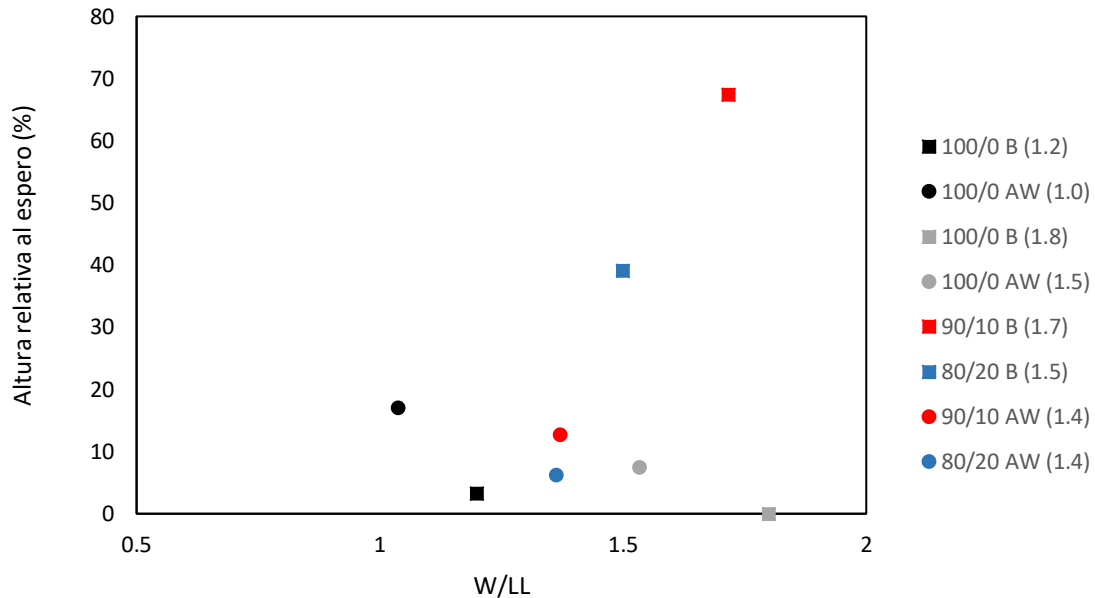


Figura 50. Gráfica comparativa entre la bentonita y la arcilla Werribee de la altura máxima relativa al espesor de arqueo, en función de la humedad inicial y las proporciones arcilla/arena 100/0, 90/10 y 80/20.

5.4.2.- Las condiciones ambientales. (e.g. humedad relativa, temperatura, etc.)

En segundo lugar, se distingue un factor que define un conjunto de parámetros que pueden ser medibles, apreciables y sin lugar a duda, influyentes en el comportamiento de cualquier material. La humedad relativa, la temperatura, la presión atmosférica son unos de los parámetros que se encuentran en los contextos de este apartado. De esta manera, se toma un valor medio de estas variables para analizar de qué forma hace variar a las muestras.

Lo ideal sería tener un gran número de muestras sometidas a diferentes valores, en términos de condiciones ambientales, de cada tipo de muestra, no obstante, solo ha sido posible documentar este tipo de información para la arcilla Werribee. Por otro lado, en este trabajo experimental no se ha tenido en cuenta la variabilidad de las condiciones ambientales debido a las limitaciones de tiempo y equipos y por tanto no poseen un valor sustancial para poder llegar a una cierta serie de conclusiones. Es por esta razón que las muestras ejecutadas no aparecerán en este apartado.

5.4.2.1.- Arcilla Werribee.

5.4.2.1.1.- La temperatura.

Para un correcto análisis es necesario tener en cuenta la tipología de muestras que se van a comparar ya que buscar las diferencias puntuales entre ensayos de diferentes tipos de material no es lo significativo en este fenómeno. Por tanto, es indispensable organizar los datos, en este caso con la humedad relativa y la temperatura como variables, para así proceder a analizar y observar el impacto que producen. Así pues, se ordenará la

variable temperatura de menor a mayor independientemente del contenido de agua inicial de una serie de muestras de la arcilla Werribee (véase tabla 24) y, a partir de aquí, se graficarán los valores con la intención de encontrar cual es la tendencia que siguen los suelos estudiados. (Véase figura 49)

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Altura del arqueo final (mm)
T2/T1	Arcilla Werribee	127	16	50	-
T2/T2	Arcilla Werribee	127	18	40	20
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	24.4	45.1	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	24.5	48.3	18.69
T6/T7	Arcilla Werribee	131.47	26.5	25.2	41.97
T6/T6	Arcilla Werribee	130.76	27.3	26.6	42.7
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	27.8	25.2	32.51
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	28.6	22.57	33.9
T6/T9	Arcilla Werribee	172.47	28.1	25.5	36.42
T6/T8	Arcilla Werribee	174.48	28.2	24.1	33.63
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	39	12.8	53.96
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	39.6	11.1	54.544

Tabla 24. Valores de la altura de arqueo final ordenados de menor a mayor temperatura a la que se ha ejecutado el ensayo, como parámetro característico en la arcilla Werribee.

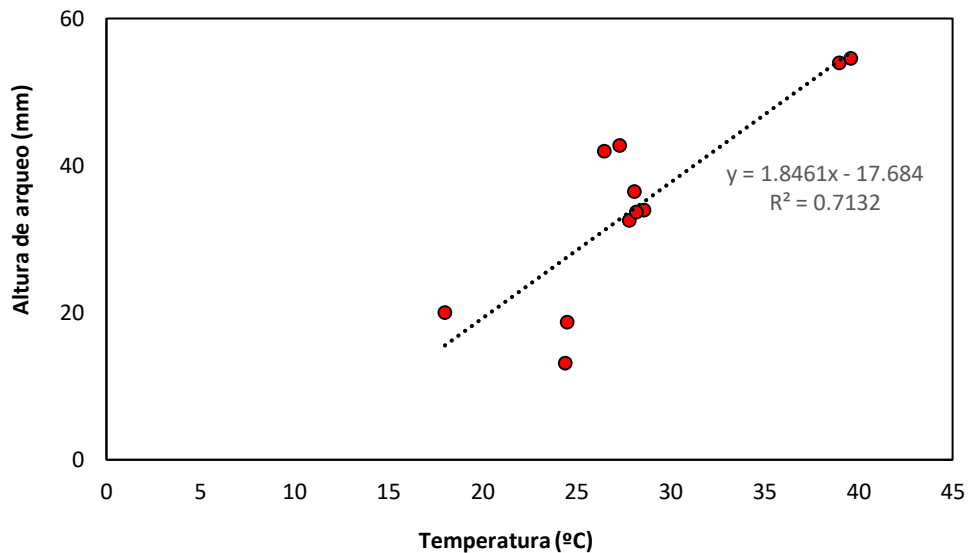


Figura 51. Gráfico comparativo entre muestras de Arcilla Werribee y las alturas de arqueo máximas final (mm) que adoptan en función de la temperatura a la que se ha sometido el ensayo.

Es relativamente sencillo notar la correlación que existe entre la variación de la temperatura y la altura de arqueo resultante. A mayor temperatura, mayor serán las fuerzas de succión las cuales se comportan como tensiones distribuidas y, por tanto, mayor será la altura de arqueo. Luego, analizando específicamente en especímenes con contenido de humedades más similares se obtiene la tabla 25 y, a partir de estos datos se obtiene la figura 52 en donde se observa una relación más directa y característica de cómo influye este fenómeno en los especímenes.

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Altura del arqueo final (mm)
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	24.4	45.1	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	24.5	48.3	18.69
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	27.8	25.2	32.51
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	28.6	22.57	33.9
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	39	12.8	53.96
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	39.6	11.1	54.544

Tabla 25. Valores de la altura de arqueo final en muestras con una humedad inicial similar dependiendo en las condiciones ambientales como parámetros característicos en la arcilla Werribee.

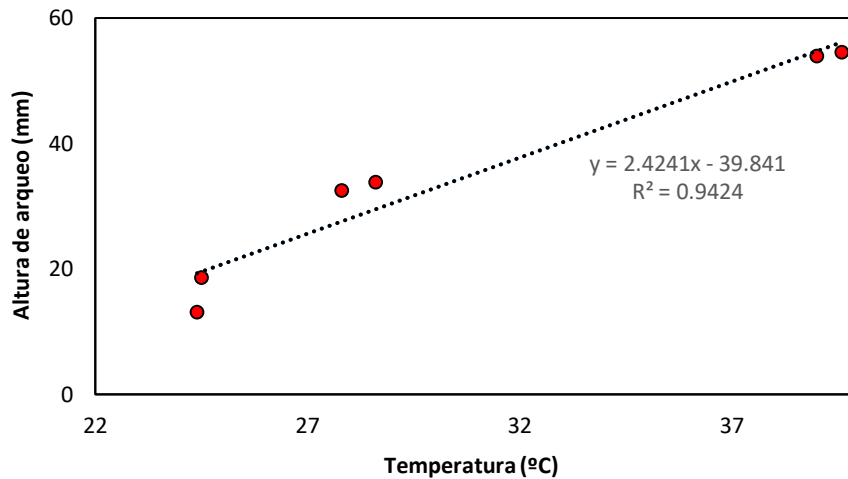


Figura 52. Gráfico representando la altura de arqueo máxima final (mm) en muestras de arcilla Werribee con un contenido de agua inicial similar dependiendo de la temperatura a la que se ha sido sometido el ensayo.

5.4.2.1.2.- La humedad relativa.

Por otra parte, una vez analizados los efectos que produce la temperatura, se pasa a analizar los mismos resultados pero, esta vez, haciendo variar la humedad relativa. Esta es probable que resulte en unos valores inversos a los obtenidos anteriormente. Por tanto,

se ordenarán de menor a mayor humedad independientemente del contenido de humedad inicial de la muestra (véase tabla 26).

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Altura del arqueo final (mm)
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	39.6	11.1	54.544
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	39	12.8	53.96
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	28.6	22.57	33.9
T6/T8	Arcilla Werribee	174.48	28.2	24.1	33.63
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	27.8	25.2	32.51
T6/T7	Arcilla Werribee	131.47	26.5	25.2	41.97
T6/T9	Arcilla Werribee	172.47	28.1	25.5	36.42
T6/T6	Arcilla Werribee	130.76	27.3	26.6	42.7
T2/T2	Arcilla Werribee	127	18	40	20
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	24.4	45.1	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	24.5	48.3	18.69

Tabla 26. Valores de la altura de arqueo final (mm) ordenados de menor a mayor humedad relativa como parámetros característicos en la arcilla Werribee.

De igual modo que el caso anterior, en la figura 53 se observa la tendencia que adopta la misma arcilla en función de hacer variar la humedad relativa a la que se ha ejecutado el ensayo.

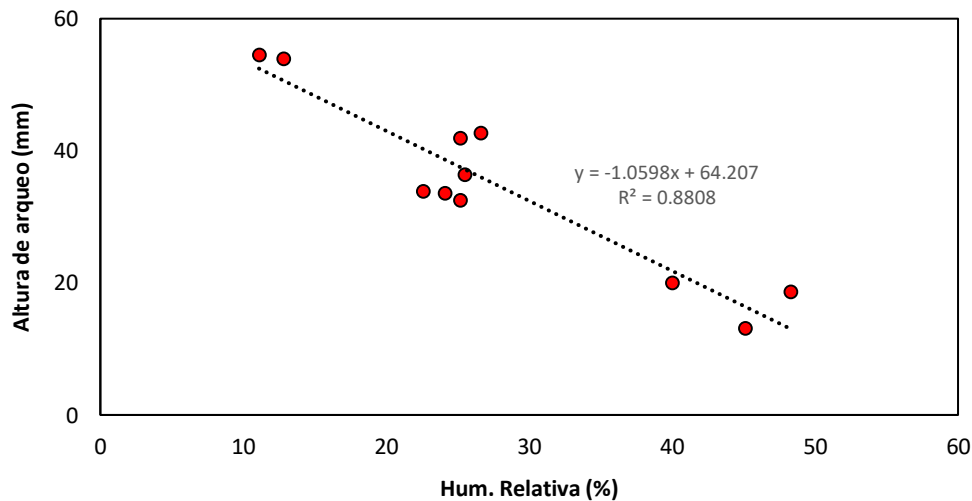


Figura 53. Gráfico representando la altura de arqueo máxima final (mm) dependiendo de la humedad relativa a la que se ha sido sometido el ensayo.

Como era de esperarse, la altura de arqueo es más propensa a disminuir a medida que aumente la humedad relativa independientemente del contenido de agua inicial de las muestras. Ahora bien, del mismo modo que se realizó anteriormente, se intentará tener en

cuenta solo las muestras con un contenido inicial de agua similar entre ellos para observar más apropiadamente cómo influye esta variable. (Véase tabla 27)

Test	Suelo	Hum. Inicial (%)	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Altura del arqueo final (mm)
T6/T12	Arcilla Werribee	195.45	39.6	11.1	54.544
T6/T13	Arcilla Werribee	189.94	39	12.8	53.96
T6/T1	Arcilla Werribee	191.67	28.6	22.57	33.9
T6/T2	Arcilla Werribee	192.26	27.8	25.2	32.51
T6/T11	Arcilla Werribee	192.92	24.4	45.1	13.15
T6/T10	Arcilla Werribee	193.34	24.5	48.3	18.69

Tabla 27. Valores de la altura de arqueo final (mm) en muestras con una humedad inicial similar dependiendo en las condiciones ambientales como parámetros característicos en la arcilla Werribee.

Así pues, la representación de estos valores en la figura 54 proporciona una idea sobre la conducta que se obtiene al hacer variar la humedad relativa conservando una misma contenido de agua inicial sobre las muestras.

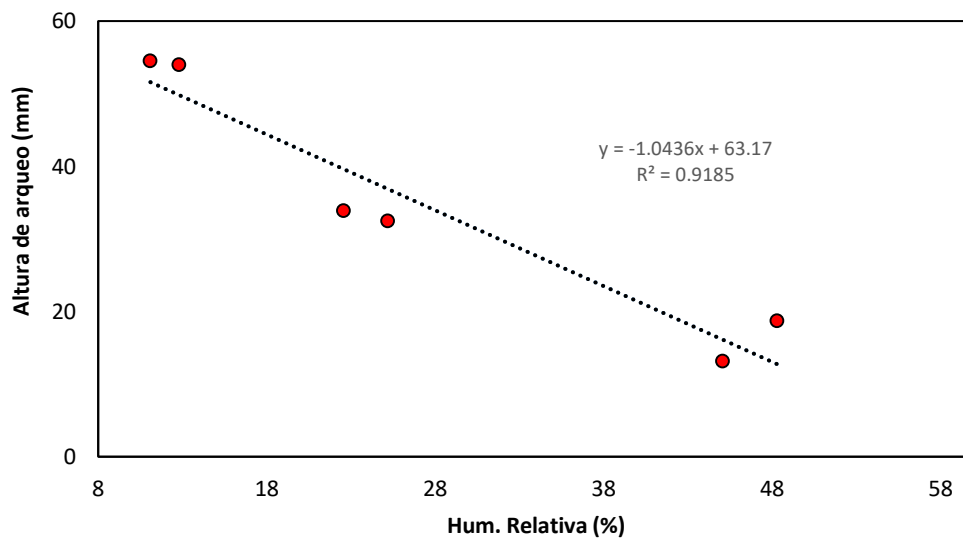


Figura 54. Gráfico representando la altura de arqueo máxima final (mm) en muestras con un contenido de agua inicial similar dependiendo de la humedad a la que se ha sido sometido el ensayo.

5.4.2.- La micro y macroestructura.

Un parámetro importante que definirá el comportamiento de estas clases de suelos arcillosos será la forma en la que se ordenan las partículas, a nivel micro y macro, al estar completamente seco o hidratadas. Para tener una idea de esto, Zielinski et al., (2014) realizaron una representación esquemática, a nivel de macroestructura, de cómo se comportarían los suelos. (Véase figura 55)

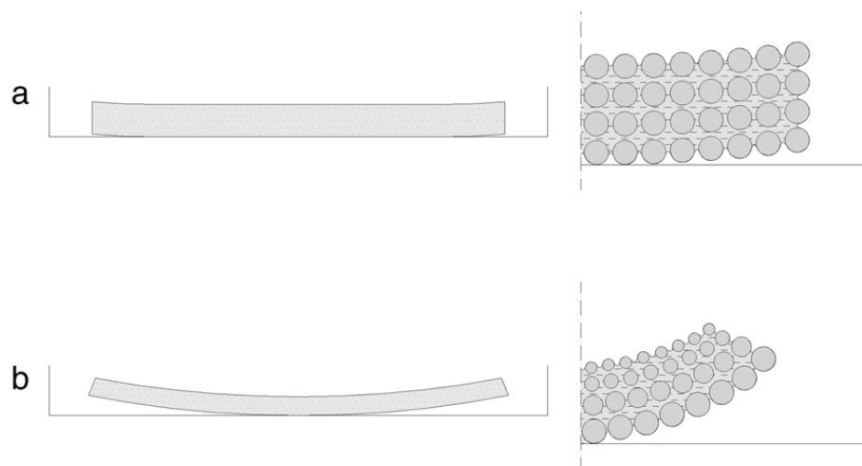


Figura 55. Representación esquemática mostrando las diferencias entre valores del arqueo para muestras de (a) estructura uniforme y (b) estructura no uniforme. (Zielinski et al., 2014)

Todos los tipos de arcillas tienen una misma característica en común, el tamaño diminuto de las partículas, lo que trae como consecuencia una de sus propiedades más interesante, la gran cantidad de agua que pueden llegar a retener debido a la gran superficie específica que presentan. Las arcillas están constituidas por partículas muy pequeñas, de formas laminares, planas y alargadas, de gran superficie específica, en la que su composición mineralógica y estructura influyen más en su comportamiento mecánico que la propia granulometría. (Del Pino et al., 2013)

Ahora bien, como ya se ha mencionado anteriormente, los tipos de arcillas que se utilizan en estos artículos son la bentonita, la arcilla Werrabee, la arcilla Altona North y el caolín, de mayor a menor plasticidad respectivamente. De esta manera, el comportamiento variará dependiendo de la estructura y composición que posea cada tipo de suelo.

A partir de aquí, se ordenan los tests de todos los ensayos en función del tipo de arcilla y proporción utilizada. De esta manera quedan 18 ensayos con mezclas puras en donde se compararán muestras similares, en términos de contenido de agua inicial y condiciones ambientales. A priori, mezclas con arcillas más plásticas tendrán un comportamiento más extremo en términos de altura máxima de arqueo. Sin embargo, no solo la composición y estructura son factores completamente decisivos en el comportamiento final, como se ha visto en capítulos anteriores. Por esta razón es indispensable distinguir que tests comparar entre sí, con la finalidad de realizar un análisis válido y con sentido.

Test	Suelo	Hum/LL	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Cóncavo o convexo	Altura de arqueo (mm)
1	Bentonita	1.2	20 ± 0.5	50 ± 5	U	1.5
2	Bentonita	1.8	20 ± 0.5	50 ± 5	No arqueó	0
T4/T2	Caolín	2.0	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<1
T4/T3	Caolín	2.5	23.5 ± 0.5	45 ± 5	No arqueó	0
T4/T4	Caolín	3.0	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<1
T5/T8	Caolín	1.0	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<2
T5/T9	Caolín	1.7	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<6
T5/T10	Bentonita	-	23.5 ± 0.5	45 ± 5	No arqueó	0
T6/T3	Arcilla de Altona North	1.5	29.8	34.8	∩	22.04
T6/T4	Arcilla de Altona North	1.5	30.1	37.5	∩	24.17
T6/T5	Caolín de NY	1.6	26.8	32.1	U	3.77
T6/T1	Arcilla de Werribee	1.5	28.6	22.57	∩	33.9
T6/T2	Arcilla de Werribee	1.5	27.8	25.2	∩	32.51
T6/T6	Arcilla de Werribee	1.0	27.3	26.6	∩	42.7
T6/T7	Arcilla de Werribee	1.0	26.5	25.2	∩	41.97
T6/T8	Arcilla de Werribee	1.4	28.2	24.1	∩	33.63
T6/T9	Arcilla de Werribee	1.4	28.1	25.5	∩	36.42
T6/T10	Arcilla de Werribee	1.5	24.5	48.3	∩	18.69
T6/T11	Arcilla de Werribee	1.5	24.4	45.1	∩	13.15
T6/T12	Arcilla de Werribee	1.5	39.6	11.1	∩	54.544
T6/T13	Arcilla de Werribee	1.5	39	12.8	∩	53.96

Tabla 28. Características de los ensayos con mezclas de arcillas con una proporción 100/0.

Partiendo de estos datos se pueden realizar muchas comparaciones entre sí, pero se descartarán aquellas en donde la información es escasa o no tan exacta. Luego, teniendo en cuenta una igualdad de condiciones, se puede analizar de qué manera actúan las distintas arcillas en términos de altura de arqueo máxima.

En primer lugar, con una relación entre el contenido de agua inicial y el límite líquido alrededor de la una unidad y media, con condiciones ambientales relativamente cercanas, se obtiene la tabla 29.

Test	Suelo	Hum/LL	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Altura de arqueo (mm)
1	Bentonita	1.8	21 ± 0.5	50 ± 0.5	0
T6/T5	Caolín de NY	1.6	26.8	32.1	3.77
T5/T9	Caolín	1.7	23.5 ± 0.5	45 ± 5	5.50
T6/T3	Arcilla de Altona North	1.5	29.8	34.8	22.04
T6/T11	Arcilla de Werribee	1.5	24.4	45.1	13.15
T6/T9	Arcilla de Werribee	1.4	28.1	25.5	36.42

Tabla 29. Ensayos con mezclas de arcillas puras y condiciones similares entre sí.

Es verdad que para el caso de la muestra de bentonita 100/0 no se produjo ningún tipo de arqueo, pero como se puede observar o, por lo menos con las demás muestras, normalmente las arcillas con una mayor plasticidad tienden a adaptar una altura de arqueo mayor. Sin embargo, se observa como para un mismo tipo de mezcla (arcilla de Werribee) la altura puede variar dependiendo de las condiciones de humedad relativa en las que se encuentre, tema que ya se había discutido en el apartado anterior.

El gráfico siguiente (véase figura 56) muestra cómo, aparte de la microestructura de los distintos tipos de suelos, las condiciones de contorno tienden a ganar una gran importancia en el comportamiento final de las muestras.

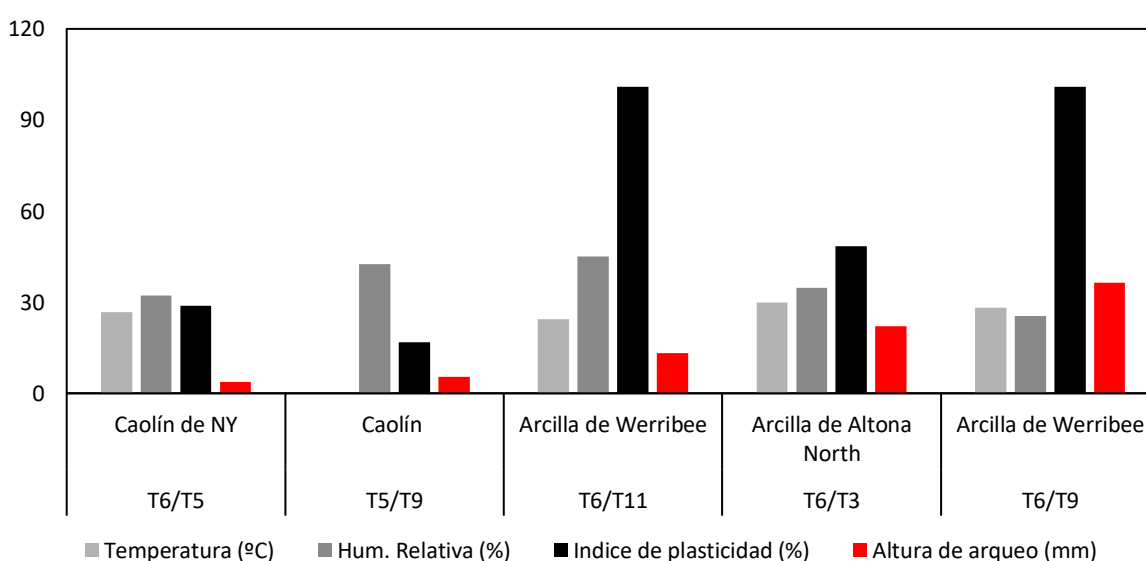


Figura 56. Comparación entre mezclas con proporciones 100/0.

Por esta razón se compararán de manera más directa, en la figura 57, suelos con condiciones ambientales totalmente iguales y, además, considerando los parámetros importantes, la altura de arqueo y el índice de plasticidad, se obtienen gráficos que muestran la relación directa que existe entre los mismos, lo que a su vez está directamente relacionado con la microestructura de las arcillas.

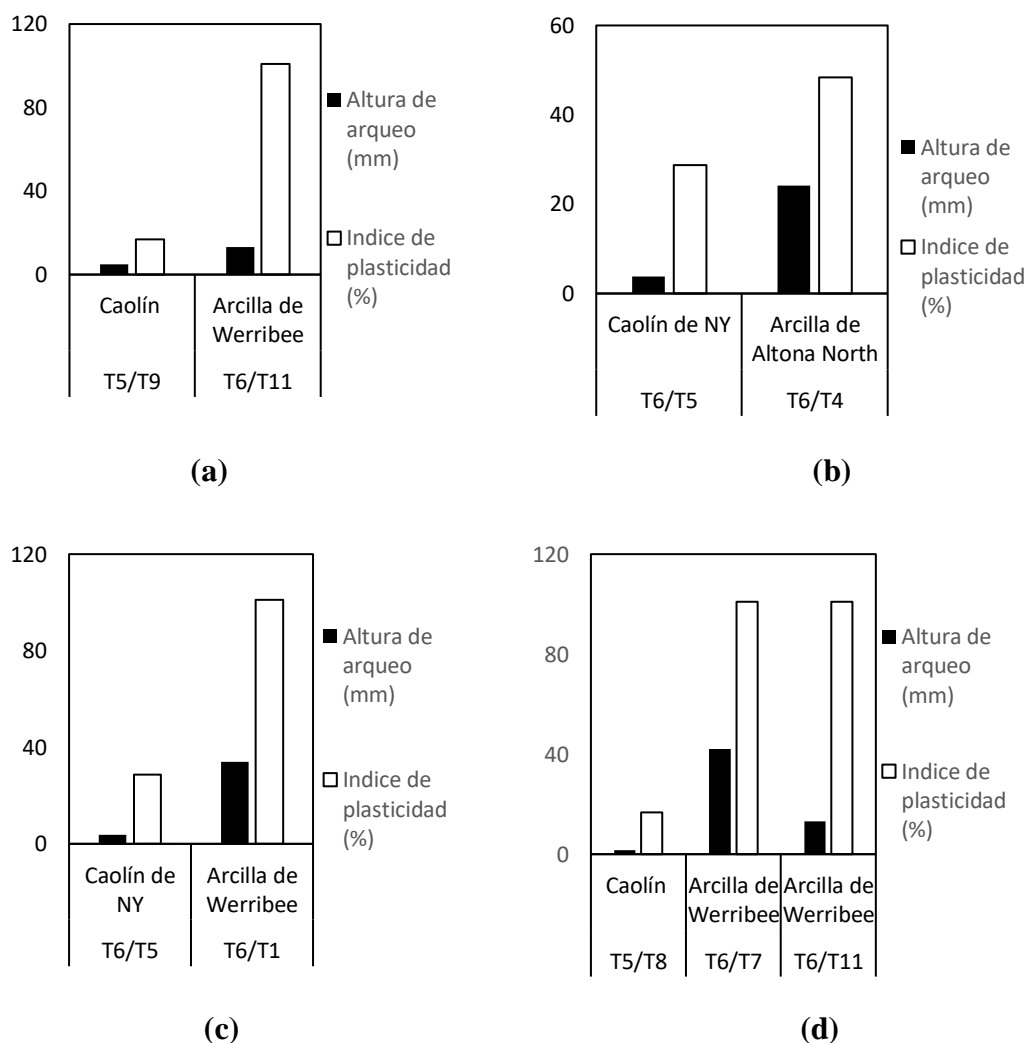


Figura 57. Gráficos comparativos de la plasticidad y altura de arqueo entre a) Caolín y arcilla Werribee 100/0. b) Caolín de NY y arcilla de Altona norte. c) Caolín de NY y arcilla de Werribee. d) Caolín, arcilla de Werribee a diferentes condiciones ambientales.

Se observa como el comportamiento de las arcillas sigue siempre un mismo patrón independientemente del tipo de mezcla que se esté usando. Sin tener en cuenta la bentonita, para arcillas con una mayor plasticidad, a igualdad de condiciones ambientales y de contorno, la altura de arqueo será siempre mayor. La microestructura de los suelos no solo influirá en la altura, sino también en la forma que adapta la muestra al final del proceso de desecación, es decir, si padece un arqueo cóncavo o convexo, o ambos en todo el proceso.

Otra forma de analizar la influencia de la microestructura de las muestras, quizás de una manera más interesante, en el comportamiento de las mismas es considerando las mezclas con una proporción de arena y, nuevamente, comparándolas entre sí con suelos en condiciones y proporciones semejantes. (Véase tabla 30)

Test	Suelo	Hum/LL	Temperatura (°C)	Hum. Relativa (%)	Cóncavo o convexo	Altura de arqueado (mm)
5	90 Bent./10 Arena	1.1	20 ± 0.5	50 ± 5	U	4.5
7	90 Bent./10 Arena	1.7	20 ± 0.5	50 ± 5	U	31
9	80 Bent./20 Arena	1.2	20 ± 0.5	50 ± 5	U	17
10	80 Bent./20 Arena	1.5	20 ± 0.5	50 ± 5	U	18
T4/T5	Caolín/Arena de Ottawa. 90:10	2	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	0
T4/T6	Caolín/Arena de Ottawa. 90:10	2.5	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<1
T4/T7	Caolín/Arena de Ottawa. 90:10	3	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	<2
T5/T1	Caolín/Arena. 85:15	2.5	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	0
T5/T2	Caolín/Arena. 85:15	2.75	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	5
T5/T3	Caolín/Arena. 85:15	3	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	20-25
T5/T4	Caolín/Arena. 80:20	2.5	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	20
T5/T5	Caolín/Arena. 80:20	3	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	40-45
T5/T6	Caolín/Arena. 90:10	3	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	20-25
T5/T7	Arcilla de Werribee/Arena. 95:5	3	23.5 ± 0.5	45 ± 5	U	6-8
T6/T14	Arcilla de Werribee/Arena. 90:10	1.4	26.2	26.9	∩	31.86
T6/T15	Arcilla de Werribee/Arena. 90:10	1.4	26.3	26.8	∩	32.29
T6/T16	Arcilla de Werribee/Arena. 80:20	1.4	26.9	28.8	∩	16.43
T6/T17	Arcilla de Werribee/Arena. 80:20	1.4	27.1	27.8	∩	15.63
T6/T18	Arcilla de Werribee/Arena. 70:30	1.3	27.2	25.6	U	28.77
T6/T19	Arcilla de Werribee/Arena. 70:30	1.3	27.1	30.4	U	25.64

Tabla 30. Ensayos con mezclas de los distintos tipos de arcilla con arena.

A priori se observa que padecen un comportamiento similar al obtenido con las mezclas puras. De cualquier manera, la estructura que proporciona la arena también es un factor clave en la conducta de la muestra. Por esta razón, se realiza un filtro de los suelos que serán comparados entre sí con el fin de obtener resultados válidos y representativos.

Otro de los parámetros a tener en cuenta en este caso es la proporción de arena en cada mezcla, ya que esto afectará tanto la macro como la microestructura de la muestra obtenida y, por tanto, la plasticidad de la mezcla final variará en comparación con las muestras de suelos puras (véase figura 55). La arena de Ottawa se define como una arena gruesa mientras que la arena utilizada en los demás ensayos, arena silícica, es definida como una arena fina.

Así pues, aunque en el caso de una bentonita con unas proporciones 100/0 arquee relativamente poco, para proporciones con un contenido mayor de arena en la estructura cambia completamente.

Otra manera de poder visualizar este comportamiento es a partir de una representación gráfica de la altura de arqueado aproximadamente a una humedad inicial de 200%, como se puede ver en la figura 58. Luego, es también importante destacar el aumento en altura de arqueado a medida que se agrega arena a la estructura de la muestra. Es sencillo ver como, por una parte, la mezcla con únicamente bentonita comienza arqueando levemente de una manera cóncava. Al agregar un 10% arena, los resultados cambian completamente; la muestra pasa a arquear de una manera más significativa, pero esta se arquea por los extremos de manera convexa. Ya, por último, al pasar a unos 20% de gruesos, el suelo arquea de una manera más importante en comparación con el caso 90/10, alrededor de los 2cm y 0.5cm de altura máxima con respecto la posición inicial, respectivamente. (Véase figura 58)

Para intentar encontrar este “punto de inflexión” anteriormente mencionado, harían falta realizar una serie superior de ensayos a igual proporciones, pero a un mayor número de contenidos de agua inicial para así, llegar a una conclusión general de la conducta de material.

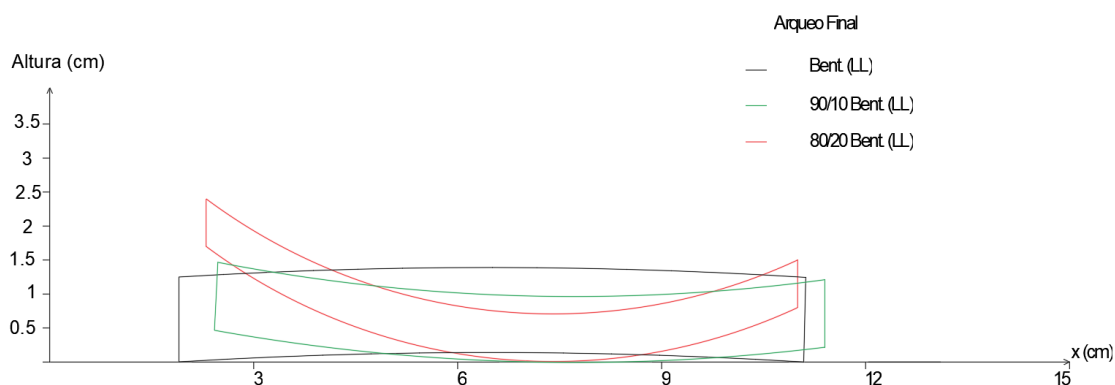


Figura 58. Comparación de la altura de arqueado final por medio de una representación gráfica entre las muestras de bentonita a una humedad inicial alrededor de 200% en proporciones 100/0, 90/10 y 80/20.

Según la gráfica presente en la figura 59 se puede deducir que se necesitarían alrededor de 15-20% de gruesos en el suelo de caolín para conseguir una altura de arqueado relativamente similar entre este suelo menos plástico, caolín, y la arcilla de Werribee, ambos a una humedad inicial alrededor del 126%. La arcilla Werribee por sí sola, con una proporción 100/0 experimenta un 335% mayor de altura de arqueado relativa al espesor de la muestra en comparación con el caolín con una proporción similar (ver figura anterior).

Por otro lado, para analizar todos los demás casos se realizan gráficos comparativos, como se ha hecho anteriormente, entre muestras con proporciones y condiciones de contorno similares.

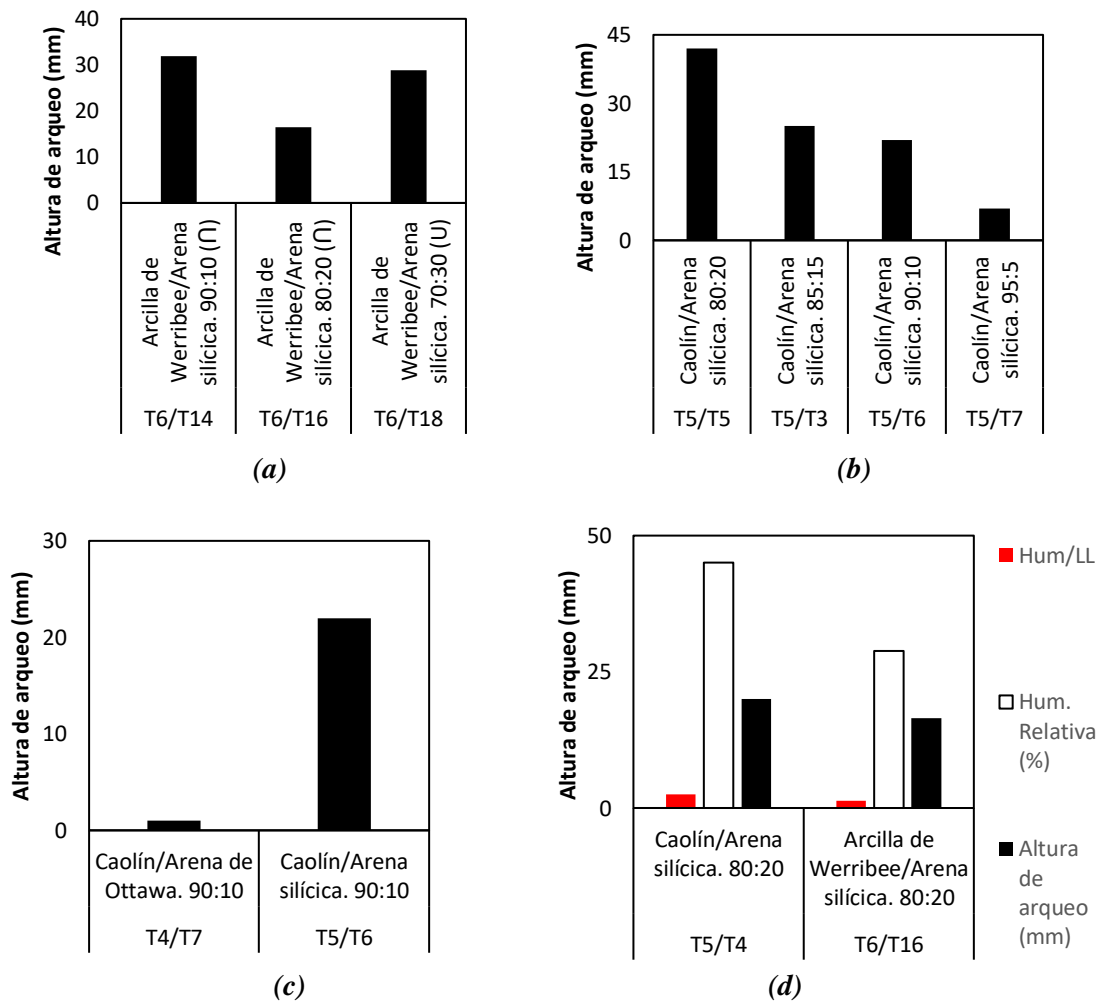


Figura 59. Comparación de muestras con diferentes proporciones de gruesos en la estructura para mezclas con a) Arena Werribee y arena silícica. b) Caolín arena silícica. c) Caolín, arena de Ottawa y arena silícica. d) Caolín, arcilla de Werribee y arena silícica.

Es interesante darse cuenta como para el suelo compuesto por arcilla Werribee y arena silícica (véase figura 59a) se comporta de manera que, al llegar a un porcentaje del 30% o más de arena, el conjunto en sí tiene una conducta totalmente diferente a los demás,

en donde presenta un arqueo de forma cóncavo. Esto puede ser debido a que la arena tiene un tamaño de partícula alrededor de los 0,1 y 0,8 mm, mientras que la arcilla de Werribee son importantemente menores ($<0.0039\text{mm}$) y por tanto al llegar a una proporción dada, la porosidad de la muestra aumenta y la plasticidad disminuye considerablemente, teniendo como consecuencia unas respuestas totalmente distintas a las obtenidas anteriormente.

Sin embargo, cuando se hace una comparación parecida del caolín variando las proporciones de arena silícica 59b, se obtiene una respuesta opuesta a la obtenida con la arcilla de Werribee. A más proporción de arena en la mezcla, la altura de arqueo aumenta considerablemente respecto las otras, sin cambiar la forma en la que padece el arqueo (convexo). Sin embargo, no es sino hasta un 10% de arena en el cual empieza a tener un efecto considerable en el comportamiento final que padece por secado, aumentando notablemente el arqueo en comparación con muestras puras de caolín.

Por otra parte, como ya se ha mencionado anteriormente, no solo la arcilla influirá si no también la arena que se utiliza en los ensayos. Por eso en la figura 59c se compara una misma muestra de caolín con los dos tipos de arena diferentes. La diferencia es muy notable, pero sigue los conceptos que se han venido discutiendo anteriormente. Para mezclas con tamaños de partículas más finos (arena silícica), normalmente el resultado final se transforma en un mayor arqueo. En este caso en particular el suelo con la estructura más fina adopta un arqueo básicamente de 22 veces más grande en comparación al suelo con una proporción de arena más gruesa (arena de Ottawa).

Para finalizar, la comparación entre distintos tipos de suelos arcillosos es un poco más complicado de realizar debido a que las condiciones de contorno entre los mismos suelen variar y por tanto trae como consecuencia que los resultados finales dependan no solo de la microestructura, pero también y, con gran importancia, de estos parámetros. Por esta razón se hace una comparación sencilla entre un suelo con el mismo tipo de arena fina pero una muestra con arcilla de Werribee y otro con caolín 59d. El caolín presenta una relación entre el contenido de humedad inicial y el límite líquido bastante superior a la arcilla de Werribee ($2.5 > 1.4$). Esto, en principio, tendría que dar ventaja al caolín en términos de altura. Luego, existe otro parámetro en el que ambos test presentan una gran diferencia, a unos 45% de humedad relativa ha sido realizado el ensayo con el caolín como protagonista y, por otra parte, a unos 28% de humedad relativa la arcilla de Werribee. Esto que, basándose en apartados anteriores, tendría que favorecer a la arcilla de Werribee en la respuesta final. Por tanto, con esta simple comparación queda reflejado como una muestra más plástica que la otra presenta alturas de arqueo inferiores debido a las condiciones iniciales y de contorno.

CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

6.1.- Conclusiones.

La realización de este proyecto tuvo como objetivo fundamental el análisis del arqueo por desecación de los suelos con un cierto porcentaje de humedad en distintos suelos arcillosos. Se ha hecho una breve explicación de las propiedades física de los suelos y, además, se ha realizado una breve introducción en que consiste el fenómeno del arqueo.

Para un análisis más significativo, se han ejecutado una serie de ensayos que han sido propuestos en base a los que ya han sido realizados por autores externos para evitando duplicar ensayos y procurando obtener resultados más representativos.

Como se ha podido observar a lo largo de este trabajo, el arqueo es un fenómeno muy complejo de estudiar ya que depende de una gran serie de factores que tendrán uno u otro efecto en el comportamiento de la muestra. La comparación entre muestras ha facilitado la visualización de la tendencia que posee cada muestra dependiendo de una propiedad esencial: la plasticidad del suelo. Como era de esperarse, los suelos con una plasticidad mayor tendrán respuestas más extremas.

6.1.1.- Retracción.

Queda claro que el contenido de agua inicial ejerce una gran influencia en los resultados finales. Sin embargo, esto dependerá del tipo de suelo que se utilice. Tanto para el caolín como para la bentonita, la retracción en el eje y aumentará pero no tan drásticamente a medida que se incremente el contenido de agua inicial de la muestra. Sin embargo, la retracción en el eje x supone un cambio radical, dependiendo del tipo de suelo. En el caso de la bentonita con proporciones superiores a 80%, la deformación en el eje x aumenta a medida que el contenido de agua inicial aumenta. Si se trata con una mezcla de bentonita con una proporción de 90% bentonita y 10% arena, la respuesta final cambia totalmente, pasando a disminuir la retracción en el eje x a medida que se aumenta el contenido de agua inicial.

Cuando se trata de una muestra de caolín se observó que esta sigue el mismo patrón de aumentar las deformaciones por encogimiento a medida que se aumente la humedad inicial pero con unos valores relativamente bajos, en comparación con la bentonita.

6.1.2.- Arqueo.

El parámetro más representativo que ha sido utilizado para caracterizar el arqueo ha sido las alturas a la que alcanzan, tanto los extremos, para el caso de arqueo convexo, como el centro de la muestra, para el caso de arqueo cóncavo. La humedad inicial, como ya se ha comentado anteriormente, tendrá un efecto significativo en la respuesta final de la muestra. Para suelos con un porcentaje de caolín se ha observado que, independientemente de la proporción arcilla/arena, a medida que se aumenta el contenido

de agua siempre existe una tendencia en ganar altura de arqueado (convexo). Ahora bien, cuando se tienen en cuenta las proporciones de la mezcla con arena, a mayor proporción de arena, mayor es la altura de arqueado resultante.

Por otro lado, para el caso de la arcilla Werribee se obtuvieron datos que han seguido una tendencia totalmente opuesta; resultó ser que para proporciones superiores a los 90% de arcilla, mientras más agua se agregaba a la mezcla en la etapa inicial, la altura de arqueado final disminuía. Aunque para proporciones 80/20 no existe una gran serie de datos con el cual se pueda hacer un análisis válido, es notable la existencia de un cambio en la tendencia en donde, al parecer, aumentaría la altura de arqueado final al incrementar la humedad inicial.

En último lugar, la bentonita resultó tener un comportamiento similar al de la arcilla Werribee pero, definitivamente, con algunas diferencias. Por un lado, parece perder altura de arqueado para proporciones 100/0 a medida que se agregue más agua inicial a la mezcla. Sin embargo, al pasar a proporciones con un 10% o más de arena, se comporta de una manera totalmente diferente. En primer lugar, la muestra adopta altura de arqueado bastante más importante, además de pasar de un arqueado cóncavo, con la mezcla pura de bentonita, a un arqueado convexo, con las mezclas con un 10% o más de arena. En segundo lugar, parece adoptar una tendencia creciente a medida que aumenta el contenido de agua inicial, a diferencia de la mezcla con el 100% de arcilla.

Luego, las condiciones ambientales en las cuales se han sometido las muestras tienen un rol importante y, gracias a las publicaciones científicas ya referenciadas, se han podido analizar para investigar cómo influye en el comportamiento de las mezclas. A pesar de que solo haya datos relacionados a un solo tipo de suelo, arcilla Werribee, se logra observar el patrón tan marcado a consecuencia de estos cambios de temperatura y humedad relativa. Como es de esperarse, a mayor temperatura el proceso de evaporación será más extremo y corto para muestras con un mismo contenido de humedad inicial. Debido a esto, a temperaturas mayores la altura de arqueado tiende a ser mayor ya que las tensiones entre partículas del suelo y del agua, de alguna manera, incrementan. Por otro lado, la variación de la humedad relativa pasa a dar como resultado un comportamiento completamente inverso: a medida que aumenta la humedad relativa a la que se ha sometido la muestra, esta tiende a perder considerablemente altura de arqueado.

Para poder considerar los efectos que producen las proporciones de arcilla/arena en el resultado final, es indispensable que estas condiciones ambientales sean similares en los ensayos a comparar. Así pues, en primer lugar, al realizar una comparación entre las mezclas de diferentes tipos de arcillas, se observa como la altura de arqueado resulta ser mayor a mayor índice de plasticidad.

Dependiendo tanto de la mezcla como de las condiciones de contorno, el comportamiento final resultará en un arqueado cóncavo o convexo. Este resultado estará relacionado con el desarrollo de un cierto momento que se origina debido a una distribución no uniforme de las fuerzas capilares y la variación del contenido de agua a lo largo de la muestra. Resultó ser que, para mezclas más plásticas, el arqueado final se desarrollaba en forma cóncava (Ω), hasta llegar a ciertas proporciones de arena en donde pasaban a adoptar una forma convexa (U). Además de esto, en ciertas muestras, a lo largo del proceso de desecación, padecían de ambos tipos de arqueado hasta que el suelo llegará a estabilizar.

6.2.- Recomendaciones.

El estudio de este proceso tan complejo como lo es el arqueo ha empezado a ganar relevancia desde el comienzo de este siglo y, por tanto, está claro que todavía queda mucha incertidumbre acerca de este fenómeno tan complejo en los suelos. Por esta razón sería ideal continuar la realización de ensayos y el posterior análisis con diferentes características y condiciones de contorno. Una de las condiciones de contorno que no se han tenido en cuenta en este trabajo es la utilización de distintos tipos de moldes, en términos tanto de dimensiones como de formas y, por tanto, sería recomendable tenerlo en cuenta para futuras investigaciones realizadas acerca de este tema.

Se da por hecho que para un estudio más consistente se tendría que realizar un mayor número de ensayos haciendo variar todas las características mencionadas anteriormente. Para llegar a conclusiones más características de los suelos sería conveniente ejecutar ensayos a igualdad de proporciones pero escogiendo un mayor número de contenidos de humedad inicial.

Por otro lado, para poder validar los resultados obtenidos sobre las tendencias al hacer variar las condiciones ambientales, se tendrían que realizar ensayos con todos los tipos de suelos para, así, poder llegar a resultados generales más concluyentes.

CAPÍTULO 7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Al-Jeznawi, D., Sanchez, M., Al-Taie, A., Zielinski, M. 2019 Experimental studies on curling development of artificial soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 11. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.02.006>

ANPER Ceramics. OX841105 Arena de Silice Fina 0-0,5mm - ANPER Ceramics. 25/09/2020 16:15. URL: anper.net/productos/1103/materias-primas/ox841105-arena-de-silice-fina-0-0-5mm.

Baver, L. D., Winterkorn, H. 1935. Sorption of liquids by soil colloids. II. Surface behaviour in the hydration of clays. *Soil Sci.* 40: 403-419.

Bui H.H., Khoa M., Kodikara J., Sanchez M. 2019. Soil curling process and its influencing factors. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0489>.

Bradley, W.H. 1933. Factors that determine the curvature of mud-cracked layers. *American Journal of Science*, 26(151): 55–71. doi:10.2475/ajs.s5-26.151.55.

Das, B.M. 1998. *Principles of Foundation Engineering*. Cengage. 4 ed.

Grim, R.E., Güven, N. 1978. *Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and Uses, Development in Sedimentology*. Vol. 24, Elsevier, Amsterdam.

Juárez, E., Rico, A. 1973. *Mecánica de Suelos*. Tomo II. Editorial Limusa.

Del pino, J.M., Tejeda, E. 2013 Consideraciones acerca de la actividad de las arcillas en la estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio. *Revista de Arquitectura e Ingeniería* 2013. 05/07/2020 14:13. www.redalyc.org/articulo.oa?id=193930080004

Kindle, E.M. 1917. Some factors affecting the development of mud-cracks. *The Journal of Geology*, 25(2): 135–144. doi:10.1086/622446.

Kindle, E.M. 1923. Notes on mud crack and ripple mark in recent calcareous sediments. *The Journal of Geology*, 31(2): 138–145. doi:10.1086/622990.

Kodikara, J.K., Nahlawi, H., Bouazza, A. 2004. Modelling of curling in desiccating clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3): 560–566. doi:10.1139/t04-015.

Lambe, T.W., Whitman, R.V. 2004. *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa.

Levatti, H.U. 2012. Simulación numérica de procesos de desecación en suelos cohesivos de baja plasticidad. Tesina de especialidad, UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica.

Minter, W.E.L. 1970. Origin of mud polygons that are concave downward: notes. *Journal of Sedimentary Research*, 40(2): 755–756. doi:10.1306/74D7203B-2B21-11D7-8648000102C1865D.

Murray, H. 2007. *Applied Clay Mineralogy*. Vol. 2, Elsevier, Amsterdam.

Sánchez, M., Khoa, M.T., Bui, H.H, Kodikara, J.K. 2019. Soil curling process and its influencing factors. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(3): 408-422. [dx.doi.org/10.1139/cgj-2018-0489](https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0489).

Sanchez, M., Atique, A., Kim, S., Romero, E., Zielinski, M. 2013. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. *Acta Geotech.* 8 (6), 583–596.

Shannon, B.M. 2013. Fracture propagation of cohesive soils under tensile loading and desiccation. Doctor of Philosophy Ph.D. thesis, Monash University.

Spangler, M., Handy, R. 1982. *Soil Engineering*. The Harper & Row Series in Civil Engineering. 4 edition.

Ward, F. 1923. Note on mud cracks. *American Journal of Science*, 6(34): 308–309. [doi:10.2475/ajs.s5-6.34.308](https://doi.org/10.2475/ajs.s5-6.34.308).

Zielinski, M., Sánchez, M., Romero, E., Atique, A. 2014. Precise observation of soil surface curling. *Geoderma*, 226–227: 85–93. [doi:10.1016/j.geoderma](https://doi.org/10.1016/j.geoderma).

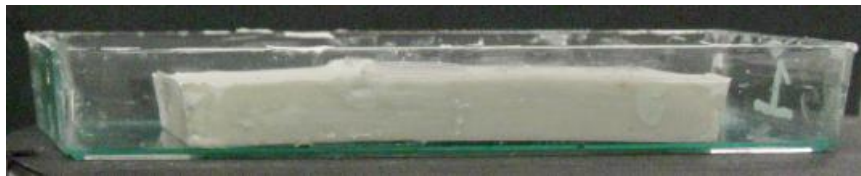
CAPÍTULO 9.- ANEXOS.



(a)



(b)



(c)

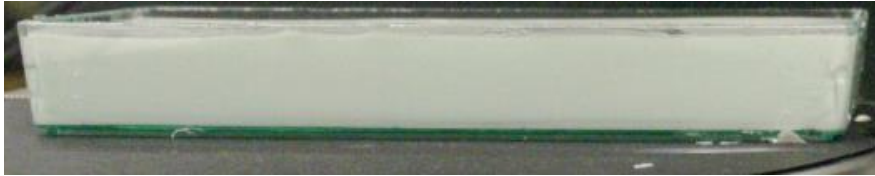


(d)

Figura 1. Test 1: muestra bentonita al LL. a) $t=0h$. b) $t=101.70h$. c) $t=158.37h$. d) $t=249.03h$.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2. Test 2: muestra bentonita al 1.5xLL. a) $t=0h$. b) $t=23.37h$. c) $t=101.70h$. d) $t=147.03h$. e) $t=192.37h$.



(a)



(b)



(c)

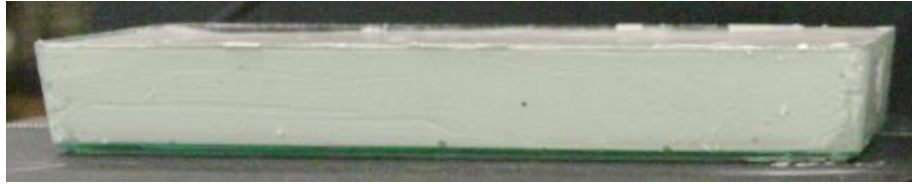


(d)



(e)

Figura 3. Test 3: muestra caolín al LL. a) $t=0h$. b) $t=9.83h$. c) $t=33.70h$. d) $t=45.03h$. e) $t=56.37h$.



(a)



(b)



(c)



(d)

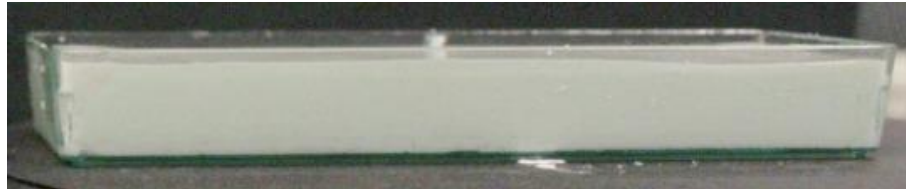


(e)

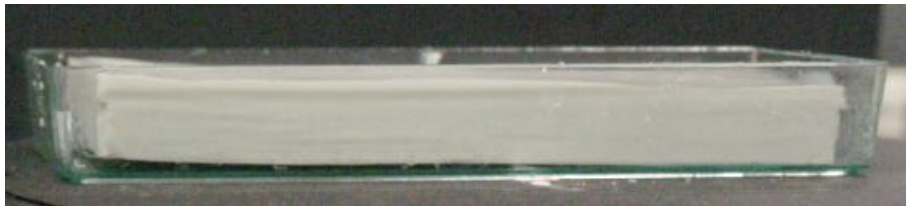
Figura 4. Test 4: muestra caolín al 1.5xLL. a) $t=0h$. b) $t=9.83h$. c) $t=23.4h$. d) $t=45.0h$. e) $t=67.70h$.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5. Test 5: muestra 80 bentonita/20 arena al LL. a) $t=0h$. b) $t=23.37h$. c) $t=56.37$. d) $t=101.07h$. e) $t=147.03h$.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6. Test 6: muestra 80 caolín/20 arena al LL. a) $t=0h$. b) $t=9.83h$. c) $t=23.37h$. d) $t=33.70h$. e) $t=45.03h$.



(a)



(b)



(c)



(d)

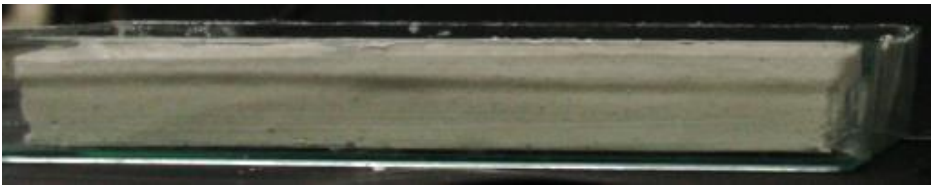
Figura 7. Test 7: muestra 80 bentonita/20 arena al 1.5xLL. a) $t=0h$. b) $t=80h$. c) $t=94.4$. d) $t=94.5h$.



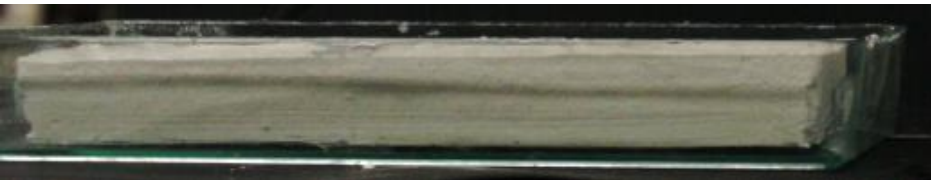
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

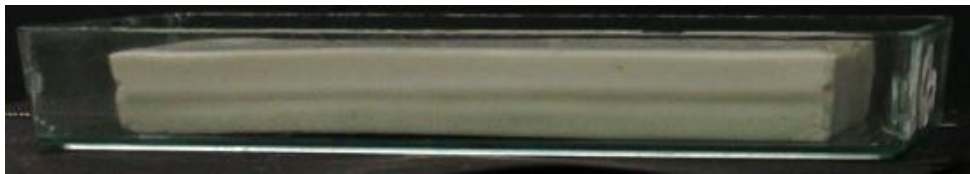
Figura 8. Test 8: muestra 80 caolín/20 arena al 1.5xLL. a) t=0h. b) t=23.37h. c) t=45.03h. d) t=67.70h. e) t=113.03h.



(a)



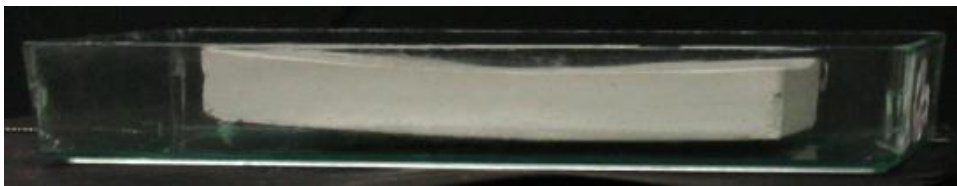
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 9. Test 9: muestra 90 bentonita/10 arena al LL. a) $t=0h$. b) $t=34.00h$. c) $t=79.33h$. d) $t=136.0h$. e) $t=170.0h$.



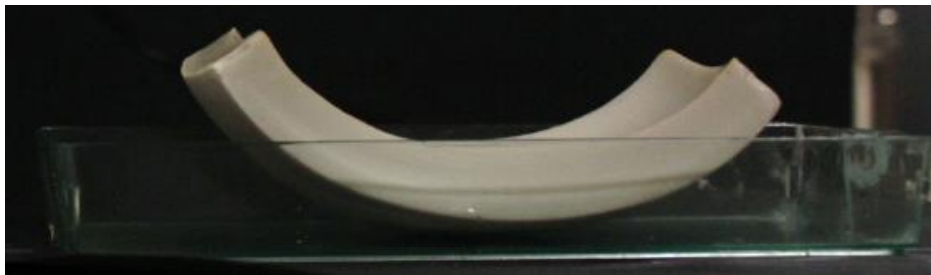
(a)



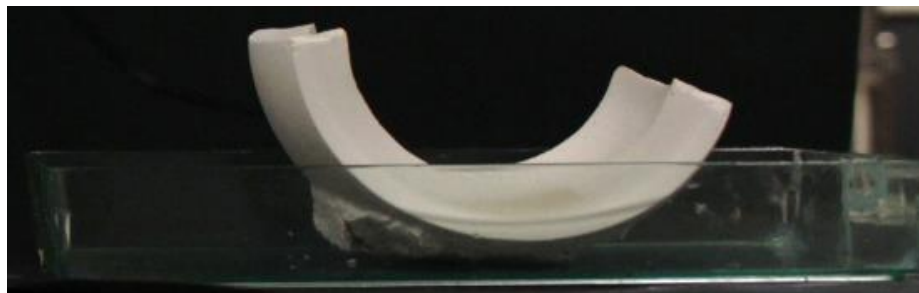
(b)



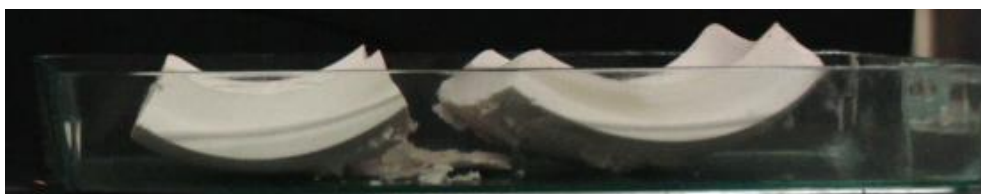
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 10. Test 10: muestra 90 caolín/10 arena al 1.5xLL. a) $t=0h$. b) $t=34.0h$. c) $t=68.0h$. d) $t=124.67h$. e) $t=157.97h$. f) $158.0h$.

Valores de retracción en los ejes x, y.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
17-jun	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
18-jun	13:32	23.37	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
21-jun	23:52	101.70	1.17	1.13	1.06	1.02	1.40
24-jun	12:32	158.37	1.85	1.83	1.87	1.87	1.24
28-jun	12:32	249.03	1.90	1.90	1.98	2.01	1.25

Tabla. Test 1: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
17-jun	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.80
18-jun	13:32	23.37	0.0	0.0	0.0	0.0	1.61
21-jun	23:52	101.70	0.92	0.86	1.12	1.11	1.31
23-jun	23:52	147.03	1.52	1.49	2.01	1.93	1.18
25-jun	23:52	192.37	2.06	2.03	2.49	2.42	1.10

Tabla. Test 2: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
05-jul	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
05-jul	23:57	9.83	0.0	0.0	0.0	0.0	1.80
06-jul	23:52	33.70	0.30	0.30	0.20	0.40	1.50
07-jul	12:32	45.03	0.40	0.35	0.20	0.40	1.50
07-jul	23:52	56.37	0.60	0.40	0.20	0.20	1.50

Tabla. Test 3: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
05-jul	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
05-jul	23:57	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
06-jul	13:32	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
07-jul	12:32	45.00	0.85	0.75	0.30	0.30	1.40
08-jul	12:32	67.70	1.00	1.00	0.30	0.30	1.40

Tabla. Test 4: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
22-jul	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
23-jul	13:32	23.37	0.0	0.0	0.0	0.0	1.50
24-jul	23:52	56.37	0.55	0.55	0.55	0.55	1.40
26-jul	23:52	101.70	1.85	1.85	1.40	1.40	0.90
28-jul	23:52	147.03	2.30	2.30	2.10	2.10	0.70

Tabla. Test 5: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
22-jul	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
22-jul	23:57	9.83	0.3	0.3	0.0	0.0	1.50
23-jul	13:32	23.37	0.35	0.35	0.30	0.30	1.50
23-jul	23:52	33.70	0.40	0.40	0.40	0.40	1.50
24-jul	12:32	45.03	0.55	0.55	0.55	0.55	1.50

Tabla. Test 6: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
18-ago	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
19-ago	13:32	23.37	0.0	0.0	0.0	0.0	1.80
20-ago	23:52	56.37	0.20	0.20	0.20	0.15	1.45
21-ago	23:52	79.03	0.80	0.40	0.60	0.40	1.30
23-ago	16:36	94.40	1.20	1.00	1.00	1.00	0.80

Tabla. Test 7: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
18-ago	14:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
19-ago	13:32	23.37	0.2	0.2	0.0	0.0	1.55
20-ago	12:32	45.03	0.60	0.60	0.45	0.45	1.50
21-ago	12:32	67.70	0.60	0.60	0.55	0.45	1.45
23-ago	12:32	113.03	0.90	0.70	0.55	0.50	1.45

Tabla. Test 8: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
28-ago	12:32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80
29-ago	23:52	34.00	0.40	0.40	0.30	0.30	1.50
31-ago	23:52	79.33	1.10	1.10	1.10	1.10	1.45
09-sep	12:32	136.00	2.40	2.30	1.60	1.55	1.10
04-sep	0:00	170.00	2.45	2.40	1.70	1.70	1.00

Tabla. Test 9: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.

Fecha	Hora	Tiempo (h)	Retracción (cm)				Altura (cm)
			Izquierda		Derecha		
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	
28-ago	12:32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80
29-ago	23:52	34.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80
31-ago	12:32	68.00	0.45	0.45	0.50	0.50	1.30
02-sep	23:52	124.67	2.40	2.40	2.10	2.10	1.00
04-sep	10:28	157.97	4.00	4.00	3.35	3.35	0.75

Tabla. Test 10: Valores de retracción (cm) en los eje x, y, debida al secado.