

TRABAJO FINAL DE MÁSTER



TÍTULO

**CONGELACIÓN ARTIFICIAL DE DOS SUELOS
NATURALES. UN ENFOQUE EXPERIMENTAL CON
DESARROLLO DE EQUIPO**

AUTOR

PELÁEZ NOVA, RONNY RAFAEL

TUTORES

**CASINI, FRANCESCA
ROMERO MORALES, ENRIQUE**

ESPECIALIDAD

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

FECHA

8 DE FEBRERO DE 2013



Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica
E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCyT) de la República Dominicana, por la beca de estudios otorgada durante estos dos años de Máster y que ha permitido el desarrollo de esta investigación.

A mis directores Francesca Casini y Enrique Romero, les agradezco por toda la confianza depositada para la realizar esta investigación, así como también todo el soporte brindado en el desarrollo de la misma.

A mi familia, que aunque este muy distante constituye parte esencial de mi motivación y apoyo en todo momento. No tengo palabras para expresar cuanto les echo de menos.

A mi novia, Raquel, por su paciencia, comprensión y apoyo durante esta etapa de mi vida llamada "TESINA DE MASTER". B.B.G.P.

A Tomas Pérez, por toda su ayuda en la gestión y fabricación de las piezas necesarias para la modificación de las células edométricas.

A José Álvarez y Victor Lozano, por todo el soporte brindado en los trabajos del laboratorio de forma siempre diligente.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería del Terreno, que han estado directamente involucrados en este trayecto de formación profesional.

Al personal de la secretaria del Departamento de Ingeniería del Terreno, por su atención y amabilidad, ante la solicitud de las distintas gestiones académicas.

A todos los amigos, compañeros de máster y de laboratorio por todos los gratos momentos y experiencias compartidas.

Agradezco al Studio Cavuoto, Tecno-in SpA y al Prof. Alessandro Mandolini por proveer los materiales de toba y puzolana procedentes de Nápoles, así como también a la Prof. Giulia Viggiani por el soporte técnico y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE FIGURAS	vii
ABSTRACT	x
RESUMEN	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DE MÁSTER	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 INTRODUCCIÓN	5
2.2 GEOLOGÍA DEL TRAMO INFERIOR DE LA LÍNEA 1	5
2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL TERRENO	7
2.3.1 Permeabilidad y flujo de filtración	7
2.4 SALINIDAD	8
2.5 PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO	8
2.5.1 Conductividad térmica – general	9
2.5.2 Capacidad calorífica	13
2.6 LA TÉCNICA DE LA CONGELACIÓN ARTIFICIAL DE SUELOS	14
2.7 DISEÑO DEL MÉTODO DE CONGELACIÓN APLICADO	17
2.7.1 Geometría de las tuberías de congelación	17
2.7.2 La tecnología de congelación empleada	17
2.8 CUESTIONES DE DISEÑO	19
CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADO	25
3.1 INTRODUCCIÓN	25
3.2 EQUIPO REFRIGERADOR	27
3.3 MODIFICACIONES SOBRE EL EQUIPO REFRIGERADOR	28
3.3.1 Aislamiento térmico	28
3.3.2 Panel de entrada de LVDT's, termopares, y tubos de presión aire y presión de cola ..	28
3.3.3 Barra de Soporte de LVDT's	29
3.3.4 Anticongelante Refrigerante	29
3.4 CÉLULAS EDOMÉTRICAS	30
3.5 MODIFICACIONES DE LAS CÉLULAS EDOMÉTRICAS	31
3.5.1 Control de temperatura en el interior de las células edométricas	31

3.5.2	Cambio del casquillo guía y vástago del pistón a PVC.....	32
3.5.3	Aislamiento de zona de contacto vástago del pistón-LVDT.....	33
3.5.4	Cámaras de secado de aire	34
3.6	CONFIGURACIÓN DEFINITIVA DEL EQUIPO	35
3.7	TÉCNICA EXPERIMENTAL COMPLEMENTARIA UTILIZADA	37
3.7.1	Porosímetro de intrusión de mercurio.....	37
3.7.2	Procedimiento de ensayo de porosimetría.....	37
CAPÍTULO 4. MATERIAL UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN		39
4.1	INTRODUCCIÓN.....	39
4.2	ORIGEN DE LOS MATERIALES.....	39
4.3	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	39
CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		43
5.1	ENSAYOS EDOMÉTRICOS A BAJA TEMPERATURA.....	43
5.1.1	Calibración del equipo	43
5.1.2	Puzolana.....	46
5.1.3	Toba	51
5.1.4	Comparación del efecto suelo	55
5.2	POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO	56
5.2.1	Puzolana.....	56
5.2.2	Toba	58
CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN		61
6.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	61
6.1.1	Revisión bibliográfica	61
6.1.2	Equipo experimental desarrollado.....	61
6.1.3	Ensayo de calibración.....	61
6.1.4	Caracterización geotécnica	61
6.1.5	Ensayos edométricos con ciclo de congelación / descongelación.....	62
6.1.6	Porosimetría por intrusión de mercurio	62
6.2	Futuras líneas de investigación.....	63
REFERENCIAS		64

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1 Línea 1 del metro de Nápoles (Russo et al 2012).....	6
Figura 2.2 Perfil geológico y condiciones del agua subterránea en el tramo inferior (Russo et al 2012).	6
Figura 2.3 Sección longitudinal y perfil geológico del túnel T1 (Papakonstantinou et al 2011).	7
Figura 2.4 (a) Conductividad térmica y (b) capacidad calorífica de la toba y puzolana de Nápoles (Papakonstantinou et al 2011).	12
Figura 2.5 Esquema de las tuberías de congelación concéntricas.	14
Figura 2.6 Diagrama esquemático de congelación indirecta (Colombo et al 2008).	15
Figura 2.7 Diagrama esquemático de congelación directa (Colombo et al 2008).	16
Figura 2.8 Expulsión del nitrógeno líquido a la atmosfera a temperatura entre -100º C y -60º C. (Studio Cavuoto en www.studiocavuoto.com).	16
Figura 2.9 Aspecto de la toba con la congelación de un espesor considerable de terreno claramente evidente (Colombo et al 2008).	18
Figura 2.10 Características principales de las estaciones del tramo inferior de la línea 1 (Russo et al 2012).	20
Figura 2.11 Asentamientos de punto de referencia B8. (1) a (2): instalación de anclajes; (2) a (3): congelación del terreno; (4): excavación del túnel de plataforma; (5): instalación de revestimiento permanente; (5) a (6): descongelación; (7): apuntalamiento (Russo et al 2012).	22
Figura 2.12 Perfil del subsuelo a lo largo del túnel oeste de la estación Garibaldi (Russo et al 2012) 23	
Figura 2.13 Perfiles de asentamientos longitudinales y transversales sobre los túneles de circulación (Russo et al 2012).	23
Figura 3.1 Configuración inicial del equipo durante el ensayo de prueba. (1) Equipo refrigerador; (2) célula edométrica; (3) Termostato DT1; (4) Control de temperatura externo; (5) Sistema Adquisición de datos; (6) Plataforma software de registro de desplazamientos y temperaturas.....	26
Figura 3.2 Equipo refrigerador Hetofrig Modelo DT 1 CB 8-30. Laboratorio de Geotecnia, UPC.....	27
Figura 3.3 (a) Equipo refrigerador antes de la modificación; (b) Equipo refrigerador con la estructura de aislamiento en polietileno.....	28
Figura 3.4 (a) Panel de entrada de LVDT, termopares, y tubos de presión aire y presión de cola; (b) barra de soporte integrada de los LVDT.	29
Figura 3.5 Partes de la célula edométrica con control de secado e inundación. Laboratorio de Geotecnia, UPC.	30
Figura 3.6 Esquema de la célula edométrica utilizada. Laboratorio de Geotecnia, UPC.....	31
Figura 3.7 (a) Punto de medida del termopar; (b) entrada del termopar a la célula edométrica.....	32
Figura 3.8 (a) Tapa superior con casquillo guía y vástago del pistón en latón; (b) Detalle de las piezas de latón a -10º C; (c) Tapa superior con casquillo guía y vástago del pistón en PVC; (d) Detalle de las piezas de PVC a -20º C.	33
Figura 3.9 Aislamiento zona de contacto vástago del pistón-LVDT con sección de PVC y revestimiento interno de polietileno.	34
Figura 3.10 (a) Formación de escarcha sobre la parte del vástago del pistón, (b) Cámaras de secado de aire.	34
Figura 3.11 Configuración exterior. (1) Equipo refrigerador con células edométricas; (2) recipiente con columna de agua de presión de cola ≈10KPa (1metro de altura); (3) Cámaras de secado de aire	

(con cloruro de litio); (4) control de temperatura del baño externo (termopar); (5) Sistema de adquisición de datos.	35
Figura 3.12 Configuración interna en el refrigerador durante la etapa de consolidación.	36
Figura 3.13 Configuración interna en el refrigerador durante la etapa térmica.	36
Figura 3.14 (a) Porosímetro de mercurio (Autopore IV 9500); (b) Puertos de baja presión; (c) Puerto de alta presión.	38
Figura 4.1 Mapa de situación geográfica de los materiales de estudio.....	39
Figura 4.2 Materiales caracterizados en su estado inalterado. (a) Toba; (b) puzolana.....	40
Figura 4.3 Granulometría de la puzolana de Nápoles.....	41
Figura 4.4 Granulometría de la toba amarilla de Nápoles destrutturada.	41
Figura 5.1 Trayectoria de carga, ciclo de temperatura y descarga ensayo de calibración.	43
Figura 5.2 Deformación –tensión vertical del equipo hasta 800KPa.	44
Figura 5.3 Deformación por temperatura del equipo a tensión constante (800KPa).	45
Figura 5.4 Trayectorias de ensayos en puzolana. (a)Ensayo en muestra P200-20; (b) ensayo en muestra P500-20.....	46
Figura 5.5 Curva edométrica muestra P200-20.	47
Figura 5.6 Curva edométrica muestra P500-20.	47
Figura 5.7 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra P200-20.	48
Figura 5.8 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra P500-20.	48
Figura 5.9 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra P200-20 a tensión constante 200 KPa.....	50
Figura 5.10 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra P500-20 a tensión constante 500 KPa... 50	50
Figura 5.11 Trayectorias de carga, ciclo de temperatura y descarga en ensayos de puzolana. (a)Ensayo muestra T500-20; (b) ensayo muestra T800-20.	51
Figura 5.12 Curva edométrica T500-20.....	52
Figura 5.13 Curva edométrica T800-20.....	52
Figura 5.14 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra T500-20.	53
Figura 5.15 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra T800-20.	53
Figura 5.16 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra T500-20 a tensión constante 500 KPa... 54	54
Figura 5.17 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra T800-20 a tensión constante 800 KPa... 54	54
Figura 5.18 Comparación de la deformación volumétrica con la tensión efectiva vertical hasta $\sigma'_v = 500(\text{KPa})$ entre las muestras P500-20 y T500-20.	55
Figura 5.19 Ciclo de congelación / descongelación de las muestras P500-20 y T500-20.	55
Figura 5.20 Grado de saturación de mercurio (S_{rnw}) durante la intrusión en términos del tamaño de poros (nm).....	57
Figura 5.21 Distribución acumulada expresada en términos del índice de poros intruido.	57
Figura 5.22 Función de densidad de tamaño de poros.....	58
Figura 5.23 Grado de saturación de mercurio (S_{rnw}) durante la intrusión en términos del tamaño de poros (nm).....	59
Figura 5.24 Distribución acumulada expresada en términos del índice de poros intruido.	59
Figura 5.25 Función de densidad de tamaño de poros.....	60

ABSTRACT

The artificial freezing of natural soils is an established practice to perform geotechnical works under the increased stiffness and the minor permeability of the frozen ground. This technique involves a low environmental impact, because emulates natural processes, but has a high implementation cost. Recently it has been used in the construction of the subway in Naples, where the application of the technique has incurred the occurrence of higher settlements during the freezing process. Given this practical evidence, it is essential to know from a more fundamental point of view and with laboratory tests, coupled phenomena and multiscale that could be affecting the response of certain soils susceptible to be affected by freezing. Within this experimental framework is developed this master thesis, for which purpose have been designed and developed two oedometer cells to subdue a ground to a freezing and thawing cycle with loading control. We used two natural soils (undisturbed samples) involved in the construction of the subway in Naples (pyroclastic soil/shallower pozzolana and tuff below 20 m) which have been extracted by Tecno-in SpA (Naples) in the Piazza Municipio of Naples. The study performed in the thesis also covers the following aspects: a) characterization (macro and microstructure) of the two natural soils; b) calibration of the experimental mounting with correction for expansion/contraction of the equipment; c) realization of testing (for the two materials) at two different vertical tensions; and d) presentation of the results and preliminary interpretation thereof. The experimental results have evidenced the development of a contraction of the material during the thawing process, consonant with the practical evidence, that it is more important in the shallower material of the two natural soils involved in the construction of the subway in Naples (pozzolana and tuff).

RESUMEN

La congelación artificial de suelos naturales es una práctica establecida para realizar obras geotécnicas al amparo de la mayor rigidez y menor permeabilidad del suelo congelado. Es una técnica que implica un bajo impacto ambiental, pues emula procesos naturales, pero tiene un coste de ejecución elevado. Recientemente se ha utilizada en la construcción del metro de Nápoles, donde la aplicación de la técnica ha incurrido en la ocurrencia de asentamientos elevados durante el proceso de congelación. Ante esta evidencia práctica, se hace imprescindible conocer desde un punto de vista más fundamental y con ensayos de laboratorio los fenómenos acoplados y de multi-escala que pudieran estar afectando a la respuesta de ciertos suelos susceptibles de ser afectados por la congelación. Dentro de este marco experimental se desarrolla la presente tesina de máster, para lo cual se han diseñado y puesto a punto dos células edométricas para someter a un suelo a un ciclo de congelación y descongelación ante carga controlada. Se han utilizado dos suelos naturales (muestras inalteradas) implicados en la construcción del metro de Nápoles (suelo piroclástico/puzolana más superficial y toba por debajo de los 20 m), que han sido extraídas por Tecno-in SpA (Nápoles) en la Plaza Municipio de Nápoles. El estudio realizado en la tesina además abarca los siguientes aspectos: a) caracterización (macro y microestructural) de los dos suelos naturales; b) calibración del montaje experimental con corrección por dilatación/contracción del equipo; c) realización de ensayos (sobre los dos materiales) a dos tensiones verticales diferentes; y d) presentación de los resultados e interpretación preliminar de los mismos. Los resultados experimentales han evidenciado el desarrollo de una contracción del material durante el proceso de descongelación, cónsono con la evidencia práctica, que es más importante en el material más superficial de los dos suelos naturales implicados en la construcción del metro de Nápoles (puzolana y toba).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Como la demanda pública de servicios para mejorar la calidad de vida en el medio urbano está en constante crecimiento, casi todas las grandes ciudades se enfrentan a la necesidad de modificar el equilibrio existente entre el transporte público y privado. El incremento en la densidad poblacional en los entornos urbanos plantea nuevos retos para la excavación de túneles de movilidad urbana, lo que incentiva el empleo de métodos innovadores de construcción de túneles para minimizar el impacto en la rutina de cada día y en las estructuras y servicios existentes.

La capacidad de controlar los desplazamientos es crucial para la viabilidad de un túnel urbano en suelo blando los movimientos de tierra se transmiten a las estructuras adyacentes, así como los asentamientos, rotaciones y deformaciones de sus bases, que pueden, a su vez, inducir daño o afectar su correcto funcionamiento, y, en los casos más severos, a la estabilidad de la estructura (Burland et al. 1977). Esto es particularmente aplicable a los casos en que las estructuras existentes tienen un valor histórico monumental y por lo tanto, el control de los movimientos de tierra y la protección del medio ambiente ante posibles daños se deben tener en cuenta en el diseño para evitar problemas de construcción.

Una de las técnicas de construcción que se ha adoptado en Nápoles para excavar túneles y pasadizos inclinados de la estación a través de suelos granulares sueltos y roca blanda fracturada por debajo de la capa freática es la congelación artificial. La congelación y descongelación del fluido de los poros dentro de los suelos implica complejos procesos térmicos, hidráulicos y mecánicos que pueden tener interacciones geotécnicas mutuas y significativas. Por ejemplo, cambios de fase del fluido de los poros causada por las variaciones de temperatura modifican el régimen hidráulico del suelo, que a su vez induce la deformación mecánica. Al mismo tiempo, cualquier cambio en las condiciones hidráulicas y mecánicas influye en los procesos térmicos de advección y cambios en el contenido de agua y hielo. Dichas interacciones termo-hidro-mecánicas inducen a procesos geomorfológicos, en regiones de mucho frío, como solifluxión y formación de termokarst, así como problemas geotécnicos, tales como las heladas, fatiga y asentamiento de cimentaciones y la inestabilidad de laderas.

Algunas cuestiones relacionadas con la congelación y descongelación de los suelos son:

- Los efectos de la historia de tensiones y el estado de tensiones bajo condiciones isotrópicas o con componente desviadora.
- El comportamiento del cambio de volumen durante la congelación / descongelación (cambios en el hielo y las presiones del agua y sus efectos sobre la permeabilidad).

- El papel desempeñado por la variabilidad espacial de las interfaces de hielo.
- El papel desempeñado por la degradación termo-hidro-mecánica acoplada del material.
- La dependencia del tiempo y los efectos de temperatura.

1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo de esta investigación es contribuir a la comprensión de los asentamientos excesivos registrados tras la aplicación del método de la congelación artificial y construcción de los túneles de metro de la extensión de la línea 1 de Nápoles (Italia).

Esta investigación se compone de cuatro objetivos específicos, las cuales constituyen eslabones esenciales en la consecución del objetivo principal y se describen a continuación:

- Realizar una etapa inicial de documentación y recopilación de la información disponible relacionada con el método de la congelación artificial aplicado en el método de Nápoles.
- Desarrollar un equipo sencillo con su posterior puesta a punto que permita simular las condiciones de los materiales (toba y puzolana) bajo las cargas correspondientes para cada material según estratificación del lugar de extracción en los procesos de congelación y descongelación aplicados durante la construcción de los túneles.
- Desarrollar una metodología experimental que permita estudiar los procesos interfase del agua en el medio poroso en materiales durante la congelación y posterior descongelación. Así como también explorar la posibilidad de que estos procesos induzcan a una estructura menos densa (destructuración) por cambio de volumen del agua durante una congelación lenta.
- Analizar e interpretar de los resultados obtenidos.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DE MÁSTER

La presente tesina está estructurada en seis capítulos, en la distribución presentada a continuación:

En el capítulo 2, “Estado del Arte”, inicialmente se describe detalladamente la geología y propiedades hidráulicas y térmicas de los materiales que forman el subsuelo de Nápoles, con los que se ha realizado esta investigación. Posteriormente se presenta la técnica de congelación artificial ejecutada para llevar a cabo la construcción de la extensión de la línea 1 de metro de dicha ciudad. Finalmente se presentan algunas cuestiones de diseño y

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

problemática de asentamientos diferenciales en edificios próximos a las obras tras el proceso de congelación realizado.

En el capítulo 3, “Equipo Experimental Desarrollado”, se describen las distintas etapas de configuración y puesta a punto del equipo necesario para llevar a cabo esta investigación.

En el capítulo 4, “Material Utilizado en la Investigación”, se presentan el origen y la caracterización geotécnica básica de los materiales de estudio.

En el capítulo 5, “Resultados Experimentales”, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos edométricos a baja temperatura y en las porosimetrías por intrusión de mercurio de los materiales en estado intacto y después de someterse al ciclo térmico.

En el capítulo 6, “Resumen, Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación”, se presenta una síntesis de los resultados con su discusión y algunas propuestas de cara a futuras investigaciones.

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se basa en una revisión bibliográfica del caso práctico que dio origen a esta tesina. Inicialmente se describe en detalle la geología y propiedades hidráulicas y térmicas de los materiales que forman el perfil geológico de Nápoles y con los que se ha realizado esta investigación. Posteriormente se presenta la técnica de congelación artificial ejecutada para llevar a cabo la construcción de la extensión de la línea 1 de metro de dicha ciudad. Finalmente se presentan algunas cuestiones de diseño y problemática de asentamientos diferenciales en edificios próximos a las obras tras el proceso de congelación realizado.

2.2 GEOLOGÍA DEL TRAMO INFERIOR DE LA LÍNEA 1

La ruta de la Línea 1 (Figura 2.1) consiste en un anillo cerrado que conecta las afueras del norte de la ciudad, la zona de las colinas, el centro de la ciudad, el distrito administrativo y el aeropuerto, con una longitud total de unos 30 km y 25 estaciones. La primera parte de la línea, desde Piscinola a las estaciones de Dante, ya está en funcionamiento, mientras que la inferior, entre las estaciones de Toledo y Centro Direzionale, en este momento está casi completa.

La Figura 2.2 muestra el perfil del suelo y las condiciones de agua subterránea. La roca de fondo consiste en la toba amarilla de Nápoles, que se trata de una roca volcánica cementada y blanda y de un depósito de flujo piroclástico derivado de una erupción de múltiples fases ocurriendo alrededor de 12000 años atrás en la región de Nápoles (de Gennaro y Langella, 1996). Una roca cuya resistencia a la compresión oscila entre 1 y 6 MPa y se caracteriza por la aparición de fracturas sub-verticales distribuidas al azar, probablemente generado por un enfriamiento rápido de la masa después de la erupción piroclástica y la deposición de hace unos 12000 años. Por encima de la toba volcánica, se depositó puzolana, un material fino no cementado que consiste casi completamente de depósitos de cenizas de erupciones volcánicas.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

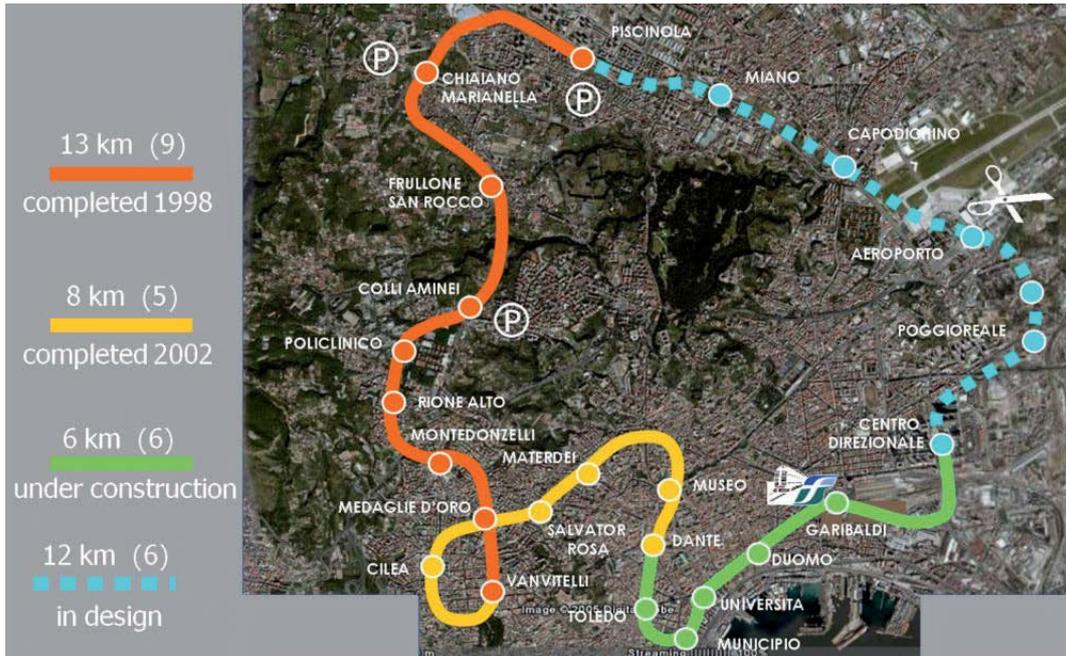


Figura 2.1 Línea 1 del metro de Nápoles (Russo et al 2012).

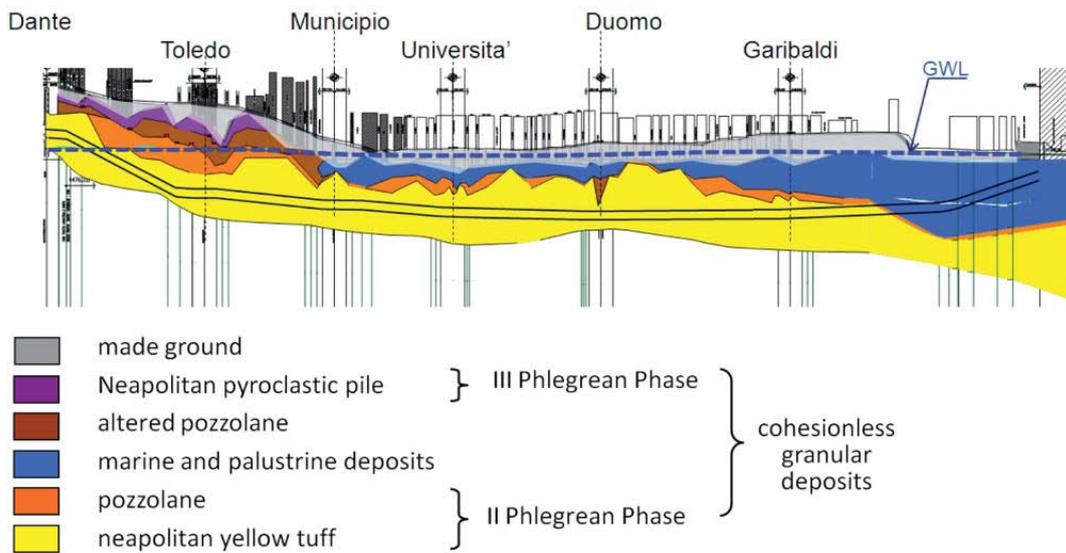


Figura 2.2 Perfil geológico y condiciones del agua subterránea en el tramo inferior (Russo et al 2012).

Durante el siguiente periodo de actividad volcánica latente, los materiales piroclásticos fueron erosionados, transportados y depositados nuevamente, dando lugar a capas de puzolana remodelada. Más tarde, una nueva fase activa depositó el llamado Piroclástico Napolitano, que consiste en capas alternas de piedra pómez, cenizas, puzolana y lapilli. Todos los materiales volcánicos se originan en el distrito volcánico Phlegrean al oeste de Nápoles, las erupciones del Monte Vesubio, incluso los más importantes, como el evento del

año 79 dC que sepultó Pompeya, no han contribuido al subsuelo de Nápoles. Los depósitos piroclásticos están cubiertos por arenas o arenas limosas de origen marino o fluvial palustre.

La mayor parte de las zonas costeras de la ciudad derivan de las recuperaciones relativamente recientes (1400 - 1800), que se refleja en el espesor del suelo construido, en algunas zonas más de 10 m. La tabla de agua subterránea está cerca de la superficie del suelo.

La Figura 2.3 muestra el perfil longitudinal del túnel T1. El recubrimiento del túnel está a unos 20 m. Los túneles de plataformas y escaleras mecánicas de las estaciones de metro se realizaron principalmente a través de la toba amarilla de Nápoles y ocasionalmente en la puzolana. La Figura 2.3 muestra también algunas cadenas de termómetros y la ubicación del control de las secciones 1 a 11. Las cadenas de termómetros laterales (158A, 135A) se encuentran totalmente dentro de la toba, mientras que la cadena de termómetros en la corona (cadena B) cruza tanto toba como puzolana.

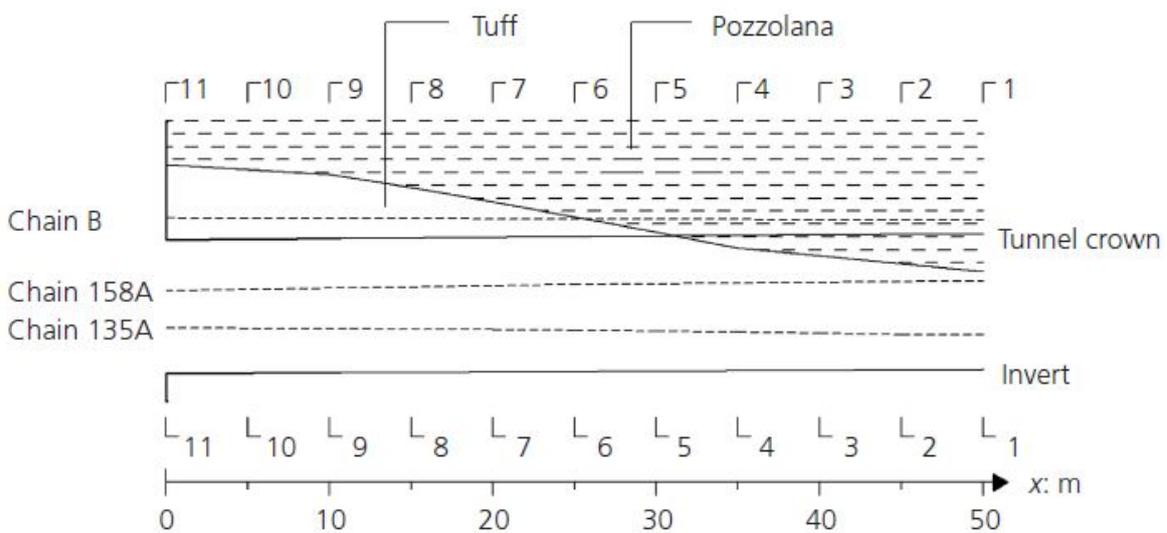


Figura 2.3 Sección longitudinal y perfil geológico del túnel T1 (Papakonstantinou et al 2011).

2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL TERRENO

2.3.1 Permeabilidad y flujo de filtración

La toba, cuando no está fracturada, muestra una permeabilidad relativamente baja de 10^{-6} - 10^{-7} m/s. Sin embargo, la presencia de un sistema irregular de fracturas casi verticales, que se generaron durante el enfriamiento de la matriz piroclástica, aumenta la permeabilidad de la masa de roca por dos órdenes de magnitud (Colombo et al., 2008).

Una forma modificada de la toba amarilla a menudo se produce en esta región entre la toba y puzolana suprayacente. Esta denominada 'Cappellaccio', la capa es de hasta 50 cm de espesor y tiene una permeabilidad secundaria de alrededor de 10^{-5} m/s. En el túnel plataforma Pari Duomo, sin embargo, la capa de Cappellaccio no se ha encontrado durante la construcción (A. Di Salvo, comunicación personal, 2010).

Dado que el túnel está situado debajo de la capa freática y las fracturas verticales en la toba están hidráulicamente conectadas a las capas superiores más permeables, la presencia de agua a alta presión durante la construcción del túnel debe ser considerada. Por otro lado no hay evidencia para un flujo de filtración pronunciada (Colombo et al., 2008) o en las mediciones de temperatura tomadas durante la congelación.

2.4 SALINIDAD

Es bien sabido que la presencia de sales de soluto modificará el punto de congelación del agua subterránea. Dado que el requerimiento de energía entonces aumenta, alta salinidad tendrá un efecto negativo sobre la congelación del terreno. Por otro lado, disminución del punto de congelación ΔT_f es una propiedad coligativa de la solución, es decir que depende sólo del número de partículas disueltas, pero no en las identidades de los solutos. Para concentraciones bajas a moderadas, se puede calcular por (Atkins y de Paula, 2006)

$$\Delta T_f = K_f i_{mol} b \quad (2.1)$$

donde K_f es la constante del punto de congelación (1,86 kg K/mol para el agua), i_{mol} el número de iones disueltos por molécula y b es la molalidad del soluto. Para el caso de cloruro de sodio (NaCl), 58,4 g representa 1 mol masa. Cabe señalar que, aunque la estación considerada se encuentra cerca de la costa, salinidad del agua subterránea varía de sólo 0,72 g/l a 0,86 g/l, de acuerdo con los análisis químicos. Mediante el uso de la ecuación 2.1 para una densidad de agua de 1 kg/l, y por lo tanto una molalidad $b = 0.86/58.4$ mol/kg, la depresión del punto de congelación del agua subterránea es inferior a 0.1°C , siendo por tanto despreciable en el caso presente (es decir $T_0 = 0^\circ \text{C}$).

2.5 PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO

Es esencial tener en cuenta las propiedades térmicas del terreno en la interpretación numérica de las mediciones de campo. Las propiedades térmicas son:

(a) la conductividad térmica del terreno (es decir, la cantidad de calor transferido por conducción en una unidad de tiempo a través de una unidad de superficie de material bajo un gradiente de temperatura de la unidad)

(b) su capacidad de calor específico (es decir, la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 unidad de masa de material por 1º C).

Cabe señalar que ni los documentos de proyecto ni la literatura (Colombo et al., 2008) incluyen información sobre las propiedades térmicas del terreno. Las propiedades tanto, debe estimarse o determinarse por medio de un análisis de retroceso.

Las propiedades geotécnicas y térmicas de los dos tipos terreno se enumeran en la Tabla 2.1 y se discuten a continuación.

Tabla 2.1 Propiedades del terreno (Papakonstantinou et al 2011).

Parámetro	Toba	Puzolana
Permeabilidad k : m/s	$10^{-6} - 10^{-7}$	$10^{-5} - 10^{-7}$
Porosidad n	0.55	0.51
Densidad de los granos minerales ρ_s : kg/m ³	2718	2392
Densidad de la roca seca ρ_d : kg/m ³	1223	1172
Constante α de la ley de potencias		0.030
Constante β de la ley de potencias		0.574
Conductividades térmicas κ_i de los minerales:		
zeolita: W/m K		0.12
cuarzo: W/m K		7.70
cenizas volcánicas (fracción sólida): W/m K		0.14
Constantes para el cálculo de la capacidad de calor específico:		
$c_{o,unf}$: J/kg K		730
$d_{c,unf}$: J/kg K ²		1.71
$c_{o,fr}$: J/kg K		735
$d_{c,fr}$: J/kg K ²		2.17

2.5.1 Conductividad térmica – general

La conductividad térmica del terreno k depende de las fracciones en volumen y de las propiedades de sus constituyentes, que está en la conductividad k_s de la mezcla mineral, en el k_w conductividad del agua y, en el caso de suelo congelado, de la conductividad K_{ice} del hielo. Suponiendo suelo saturado

$$\kappa = \kappa_s^{1-n} \kappa_{ice}^{n-\beta_w} \kappa_w^{\beta_w} \quad (2.2)$$

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

donde n y β_w indican la porosidad y (dependiente de la temperatura) el contenido volumétrico de agua sin congelar, respectivamente (Johansen y Frivik, 1980). Este último es el siguiente

$$\beta_w = n \frac{w_u}{w} \quad (2.3)$$

En esta ecuación, W y W_u indican el contenido de agua y el contenido de agua no congelada, respectivamente. A temperaturas por encima del punto de congelación del agua T_0 , agua de los poros entero es sin congelar (es decir, $W_u = W$ y $\beta_w = n$), mientras que a temperaturas por debajo del punto de congelación del agua el contenido de agua no congelada dice lo siguiente (la ley de potencia de Tice et al., 1976)

$$w_u = \alpha \left| \frac{T}{T_{ref}} \right|^{-\beta} \quad (T < T_0) \quad (2.4)$$

donde α y β son constantes del material y T_{ref} es una temperatura de referencia de 1 °C introducida por razones dimensionales. Los valores supuestos (Tabla 2.1) son típicos para un terreno limoso.

Ecuaciones que dan conductividades térmica k_w y K_{ice} del agua y hielo (como funciones de la temperatura) se describen respectivamente a continuación (Farouki, 1982; Frivik, 1981)

$$\kappa_w = \left[0.551 + 0.002828 \frac{T}{T_{ref}} + 0.00002095 \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \right] \frac{W}{m K} \quad (2.5)$$

$$\kappa_{ice} = \left[0.4655 + \frac{488.19}{\left(\frac{T}{T_{ref}} \right) + 273.15} \right] \frac{W}{m K} \quad (2.6)$$

La conductividad K_s de la mezcla mineral es la siguiente (Sass et al., 1971)

$$\kappa_s = \prod_{i=1}^N \kappa_i^{n_i} \quad (2.7)$$

donde N , n_i y k_i indican el número de tipos de minerales, la fracción de volumen y la conductividad térmica del mineral i , respectivamente.

2.5.1.1 Conductividad térmica – toba

Entre los diversos minerales de toba, el vidrio volcánico fue dominante. Al interactuar con el agua alcalina a una temperatura de 200-300 ° C, el vidrio volcánico se altera a zeolita. El grado de zeolitización en la toba amarilla de Nápoles es variable (de Gennaro y Langella, 1996), pero sobre todo entre 50 y 70% (de Gennaro et al., 2005), por lo que hay cantidades muy variables de minerales de zeolita. El contenido de zeolita es muy importante porque la zeolita tiene una conductividad térmica muy baja, por lo que retrasa el proceso de congelación. La conductividad térmica de la zeolita a una temperatura de 18°C asciende a 0,12 W / m K (Murashov y White, 2002), que es menor que la conductividad de minerales comunes que forman la roca por un factor de aproximadamente 20. En ausencia de flujo de filtración (como en el caso presente), una conductividad térmica de minerales que es menor en un factor de 20 significa que conductividad térmica del suelo será menor en un factor de 2,2, lo que lleva a un tiempo de congelación que es más largo en el mismo factor.

La Figura 2.4 (a) muestra la dependencia de la temperatura de los valores de conductividad térmica de toba descongelado y congelado calculada por medio de las ecuaciones 2.2-2.7 para un contenido de zeolita de 0,65. La conductividad térmica del cuarzo es igual a 7,7 W / m K (Johansen y Frivik, 1980). El contenido de cuarzo es moderado en la toba zeolítizada cementada de Nápoles (Shuaib, 1954) y se considera igual a 0,15. Como la densidad mineral ρ_s es inferior a 2800 kg/m³, una conductividad térmica de 2,0 W / m K, tal como se propone en este caso (Johansen y Frivik, 1980), se considera por el contenido restante de 0,20 de diversos minerales. Estos contenidos minerales ofrecen la mejor correspondencia entre la de las temperaturas in situ.

2.5.1.2 Conductividad térmica – puzolana

Puzolana es una amorfa ceniza volcánica fina. La cantidad de cuarzo, que es un mineral cristalino que raramente se encuentran en la puzolana volcánica, es insignificante, si está presente en absoluto, y por lo tanto se puede considerar que es cero en la puzolana de este estudio.

Con el fin de calcular la conductividad térmica de puzolana (por medio de la ecuación 2.2), fue necesario primero para estimar la conductividad térmica k_s de la mezcla mineral de la ceniza volcánica. Esto se hizo sobre la base de las pruebas de laboratorio (Kasubuchi, 1975). El autor investigó la influencia del contenido de agua en las conductividades térmicas de diez muestras de tres suelos –entre ellas cuatro muestras de un suelo de ceniza volcánica típica. Las temperaturas en el laboratorio variaron de 22 ° C a 26 ° C. Basándose en los resultados obtenidos para la ceniza volcánica, y teniendo en cuenta una temperatura del suelo igual a la temperatura media en el laboratorio (es decir, 24 ° C) y un contenido de agua de 0,79 (es decir, el contenido de agua media de las muestras saturadas), la

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

conductividad térmica k_s de la mezcla mineral de la ceniza volcánica se volvió a calcular utilizando la ecuación 2.2 y se encontró que era igual a 0.14 W / m K. Sobre la base de este valor de k_s , la conductividad térmica de la puzolana, como se dijo antes, se considera que es igual a la de la ceniza volcánica y se calculó a diferentes temperaturas por medio de la ecuación 2.2. La Figura 2.4 (a) muestra los valores calculados de conductividad térmica para la toba y la puzolana de Nápoles.

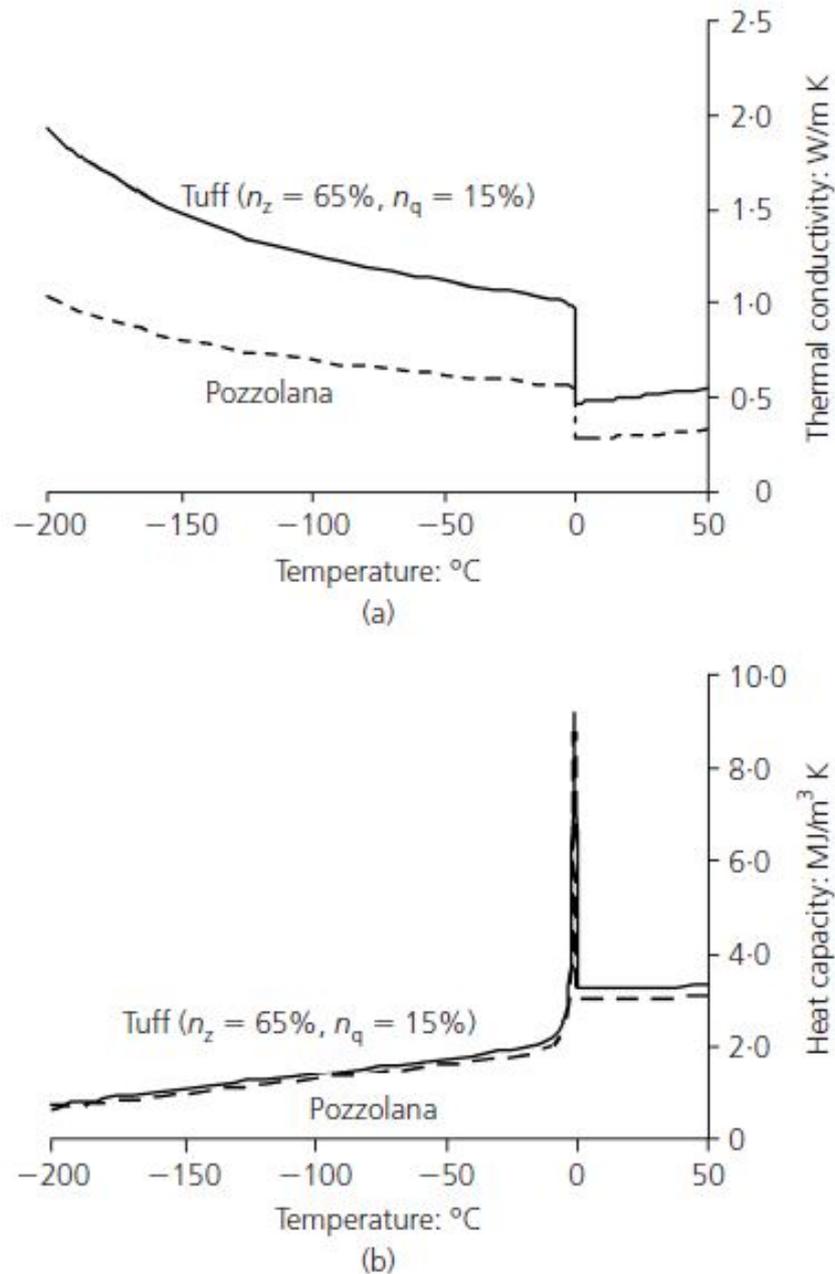


Figura 2.4 (a) Conductividad térmica y (b) capacidad calorífica de la toba y puzolana de Nápoles (Papakonstantinou et al 2011).

2.5.2 Capacidad calorífica

La capacidad de calor volumétrica del terreno es la siguiente (Williams, 1974)

$$C_v = \rho_d [c_s + w_u c_w + (w - w_u) c_{ice}] \quad (2.8)$$

donde ρ_d , C_w , C_{ice} y C_s denotan la densidad del suelo seco y los calores específicos del agua, del hielo y de la mezcla de mineral, respectivamente. La capacidad de calor específico del agua C_w es 4190 J/kg K, mientras que la capacidad C_{ice} calor específico del hielo depende de la temperatura (Makowski, 1986)

$$c_{ice} = \left(2110 + 7.79 \frac{T}{T_{ref}} \right) \quad \frac{J}{kg K} \quad (2.9)$$

La capacidad de calor específico C_s de la mezcla puede ser calculada suponiendo una temperatura lineal por tramos-dependencia (Johansen y Frivik, 1980)

$$c_s = \begin{cases} c_{0,unf} + d_{c,unf} T & (\text{for } T \geq T_0) \\ c_{0,fr} + d_{c,fr} T & (\text{for } T < T_0) \end{cases} \quad (2.10)$$

donde $C_{0,unf}$ y $C_{0,fr}$ son las capacidades caloríficas específicas de la mezcla mineral a $T = 0^\circ\text{C}$, mientras que las $dc_{,unf}$ y $dc_{,fr}$ indican el gradiente de temperatura de la capacidad de calor específico para temperaturas positivas y negativas, respectivamente. La Tabla 2.1 muestra los valores supuestos de estas constantes que dependen de la categoría de suelo (Johansen y Frivik, 1980). Las capacidades caloríficas específicas dependen en gran medida del contenido de agua, pero son independientes de la composición mineralógica del suelo (Johansen y Frivik, 1980).

La Figura 2.4 (b) incluye capacidades caloríficas de terreno no congelado y congelados calculada por medio de las ecuaciones 2.8 y 2.10.

2.6 LA TÉCNICA DE LA CONGELACIÓN ARTIFICIAL DE SUELOS

El objetivo principal de la congelación artificial del suelo es extraer el calor desde el suelo hasta que su temperatura cae por debajo del punto de congelación del agua subterránea en el mismo (etapa de congelación) y luego mantener el nivel de temperatura alcanzado regulando apropiadamente el flujo de calor extraído hasta que las operaciones de excavación y la construcción se completen (etapa de mantenimiento).

El suelo se enfría haciendo que el fluido refrigerante circule a través de las tuberías de congelación fijadas en el suelo que consta de dos tubos concéntricos (Figura 2.5). La tubería exterior está cerrada en el extremo, mientras que la tubería interior está abierta. Generalmente el fluido refrigerante entra en el tubo interior y alcanza el punto más profundo. En su viaje de retorno después de pasar a través de la abertura entre los dos tubos, el fluido refrigerante extrae calor de la tierra.

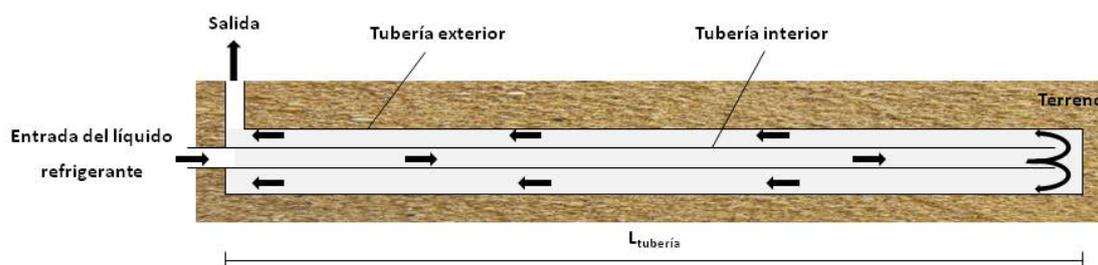


Figura 2.5 Esquema de las tuberías de congelación concéntricas.

Hay dos métodos de congelación disponibles (Crippa et al 2007): el método indirecto (con salmuera) y el método directo (con nitrógeno líquido).

El método indirecto (Figura 2.6) se basa en un proceso cerrado y requiere el uso de una planta de refrigeración industrial, que alimente un circuito cerrado. El refrigerante se envía y regresa de los tubos de congelación a través de entrega aislada y tubos de retorno.

La salmuera caliente que regresa de las tuberías de congelación se enfría de nuevo y se devuelve a las tuberías de congelación. Las tuberías de salmuera helada generalmente consisten en un tubo exterior de acero y un tubo interior de acero o de polietileno (el acero utilizado es altamente resistente a bajas temperaturas). El líquido refrigerante consiste en una solución acuosa de cloruro de calcio (salmuera), enfriada a una temperatura de entre -25 y -40°C.

Por otro lado, el método directo se basa en un proceso abierto (Figura 2.7). El líquido refrigerante consiste en nitrógeno líquido a -196°C. El nitrógeno líquido es enviado directamente a los tubos de congelación a través de tubos aislados. Los dos tubos concéntricos que forman las tuberías de congelación están hechos generalmente de cobre o de acero inoxidable. El nitrógeno líquido se evapora a medida que pasa a través de las

*Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo*

tuberías de congelación. Se extrae el calor del suelo como resultado tanto de su cambio de estado (choque térmico) como de la diferencia entre las temperaturas de entrada y de salida. El gas producido se libera y se dispersa en la atmósfera (Figura 2.8) a una temperatura de entre -100°C y -60°C .

Es posible utilizar una combinación de los dos procedimientos descritos o alternar el uso de ellos para congelar el mismo terreno, siempre y cuando las tuberías de congelación sean adecuadas para la circulación de ambos fluidos refrigerantes. Una posibilidad que a veces se aprovecha es utilizar el método directo para la etapa de congelación y el método indirecto para la etapa de mantenimiento.

La elección de qué procedimiento de congelación adoptar se basa en una serie de factores de diseño y de funcionamiento económico: las características mecánicas requeridas por el diseño del suelo congelado, el tiempo disponible para la etapa de congelación, la duración del período de mantenimiento, las condiciones de logística, etc.

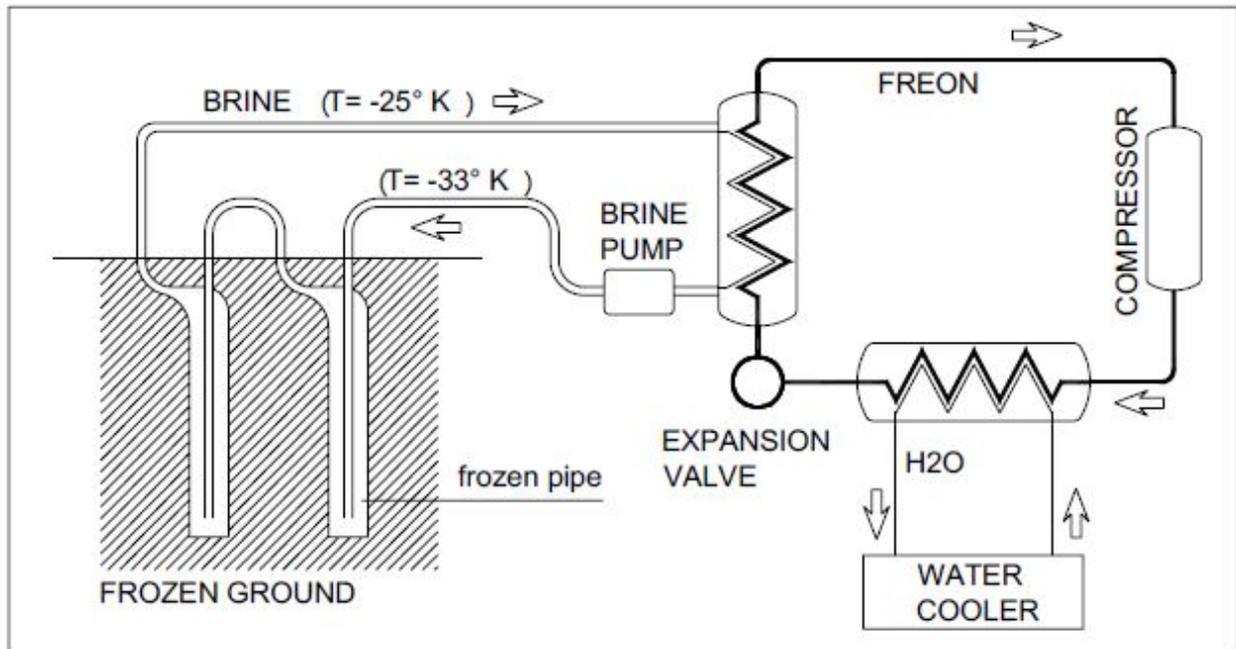


Figura 2.6 Diagrama esquemático de congelación indirecta (Colombo et al 2008).

*Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo*

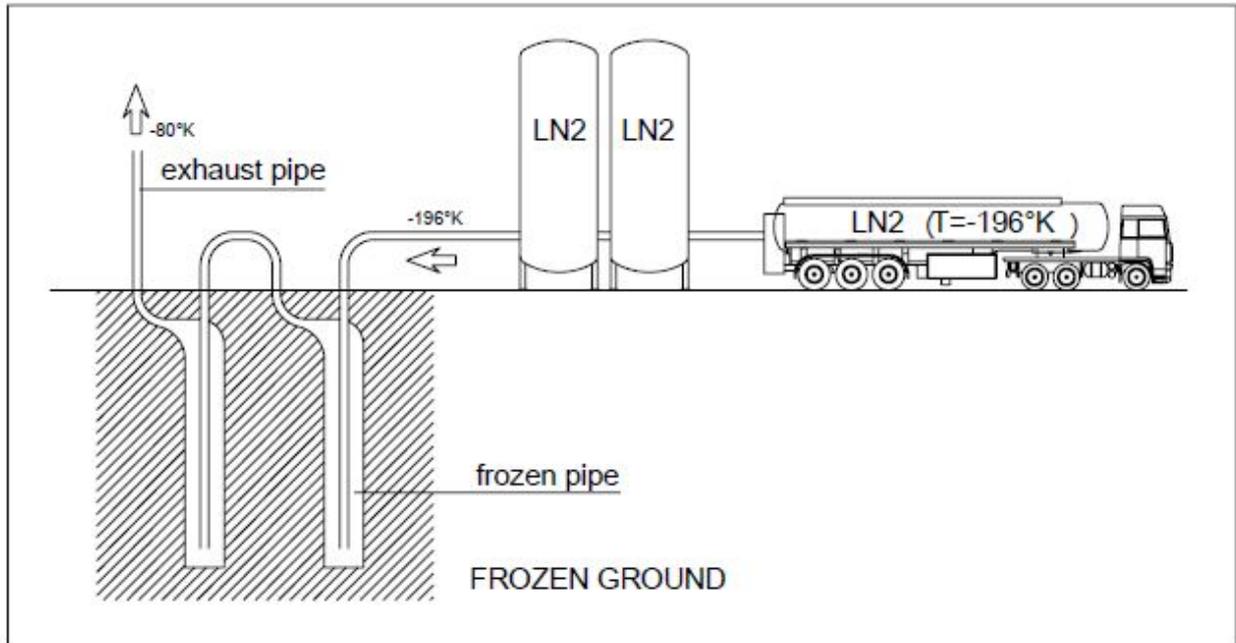


Figura 2.7 Diagrama esquemático de congelación directa (Colombo et al 2008).



Figura 2.8 Expulsión del nitrógeno líquido a la atmosfera a temperatura entre -100°C y -60°C . (Studio Cavuoto en www.studiocavuoto.com).

2.7 DISEÑO DEL MÉTODO DE CONGELACIÓN APLICADO

2.7.1 Geometría de las tuberías de congelación

Para la congelación de los túneles de plataforma se adaptó una geometría que consiste en una única fila de tuberías de congelación alrededor de todo el perímetro de la sección transversal del túnel.

La distancia teórica entre centros de los tubos se fijó en 0.75m para permitir las tolerancias admisibles en la perforación de los sondas de congelación de 0,5%. Dado que la longitud de los tubos es generalmente de 50m, la desviación admisible máxima alcanza los 0.25m. Si el caso teóricamente posible ocurre que dos sondas que se desvían al máximo en direcciones opuestas, entonces una distancia entre centros de entre 0.25 m y 1.25 m es posible.

Mientras que colocar las tuberías más juntas no crea ningún problema significativo, si están demasiado separadas podría ser imposible crear las juntas entre los cilindros de hielo que se forman en torno a dos tubos adyacentes que dejarían un "agujero" en el suelo congelado. Discontinuidades como éstas constituyen un peligro potencial para el mantenimiento de la congelación durante la excavación, ya que podría permitir que el agua se filtre a temperaturas normales y ese hecho provocaría inevitablemente que el hielo circundante se funda gradualmente.

Cuando la toba se encontraba a una profundidad menor que la de la corona del túnel, que salió de la parte superior de la excavación en la puzolana, se instaló una doble fila de tuberías de congelación con el fin de obtener una banda más gruesa de hielo para que el suelo tratado pudiera realizar funciones tanto estructurales como de impermeabilización.

2.7.2 La tecnología de congelación empleada

El tratamiento empleado para las estaciones en cuestión se realizó mediante la adopción de las dos técnicas de congelación descritas en la sección 2.6 principalmente por el alto grado de porosidad (55%), que se tradujo en grandes cantidades de agua en el suelo que iba a ser congelado. Más específicamente:

- El método directo se adoptó para la etapa de congelación con la inserción de nitrógeno líquido en los tubos de congelación a una temperatura de -196°C . La presión a la que se bombeó estaba regulada como una función de la temperatura de salida del vapor que se mantuvo entre -60°C y -100°C .
- Esta etapa continúa hasta que los objetivos de diseño se han alcanzado, se define como la creación de una pared congelada con una temperatura de $\leq -10^{\circ}\text{C}$ y un espesor mínimo de 1 m. Este fue el equivalente de obtener una temperatura de $T \leq -10^{\circ}\text{C}$ a una distancia de 0,50 m de las tuberías de congelación.

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

- La siguiente fase de mantenimiento se realizó con el método indirecto, mediante la circulación de una solución saturada de CaCl en los tubos a una temperatura de alrededor de -30°C mantenida por un sistema de refrigeración con una potencia total de 500 Mcal/h (600 KW/h).

Merece la pena señalar que la temperatura alrededor de los tubos de congelación se puede estimar mediante la integración de la ecuación de Fourier que, con coordenadas polares y suponiendo condiciones estacionarias (debido a la propagación extremadamente lenta de las isothermas) da:

$$T(r) = A \cdot \ln \frac{r}{B} \quad (2.11)$$

donde r es la distancia desde las tuberías y donde A y B se pueden calcular, en el caso de congelación usando el método indirecto, suponiendo que la temperatura en el borde de la tubería es el mismo que el de la salmuera (-30°C) y que el valor de T a 0,50 m es de -10°C.

Una vez que para el caso en cuestión se calculan las constantes a través de la curva de temperatura se demuestra, entre otras cosas, que la isoterma $T=0^{\circ}\text{C}$ ha sido empujada a 1.55 m de la línea central de los tubos de congelación.

Este resultado se confirmó cualitativamente por las obras realizadas en Nápoles. De hecho, la formación de escarcha sobre la cara en las zonas congeladas mostró temperaturas inferiores a 0°C , incluso a distancias considerables de las tuberías, por lo menos en el lado interior de la sección transversal claramente visible en la cara (Figura 2.9).



Figura 2.9 Aspecto de la toba con la congelación de un espesor considerable de terreno claramente evidente (Colombo et al 2008).

A medida que la excavación del túnel procedió, se observó una tendencia marcada del suelo al calor principalmente en la corona, ya que los volúmenes de suelo a bajas temperaturas se habían eliminado. El problema se resolvió de nuevo mediante bombeo de nitrógeno en los tubos adyacentes a las zonas más críticas. Por consiguiente, fue necesario adoptar tanto los sistemas de congelación directos e indirectos al mismo tiempo durante la etapa de mantenimiento por períodos que a menudo duraban hasta que los revestimientos finales de los túneles estaban colocados.

2.8 CUESTIONES DE DISEÑO

En las primeras etapas del diseño, la línea que pretendía ser una poco profunda de corte y cubierta del túnel. En una etapa posterior, se decidió excavar túneles mucho más profundos, con las ventajas de:

- ✓ Permaneciendo por debajo de la capa arqueológica;
- ✓ Ejecutándose predominantemente dentro de la formación de toba, lo que elimina prácticamente los asentamientos y el daño potencial en la superficie;
- ✓ Evitando la pesada y de largo plazo limitación de tráfico de superficie durante la construcción.

La línea se compone de dos túneles de vía única de funcionamiento con un diámetro exterior de 6,75 m, con un promedio de espacio de eje a eje de unos 14 m.

Municipio (Ayuntamiento), Università, Duomo y Garibaldi (Estación central) estaciones que requerían excavaciones profundas en suelos de grano grueso por debajo del nivel freático, con una carga hidráulica máxima de unos 35 m. Se componen de pozos rectangulares que contienen las escaleras mecánicas y otras plantas, sus dimensiones en el rango plan de entre 46 m × 23 m y 44 m × 16 m, su profundidad de entre 35 y 45 m (Maiorano et al 2002). Cuatro túneles de plataforma de 50 m de largo, y otros pasillos horizontales e inclinados están situados fuera de los ejes (Figura 2.10).

Aproximadamente a mitad de camino entre las estaciones, hay conductos de ventilación con un diámetro de 6 m. Están situados fuera del eje de los túneles de circulación, y están conectados a ellos por conductos horizontales.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

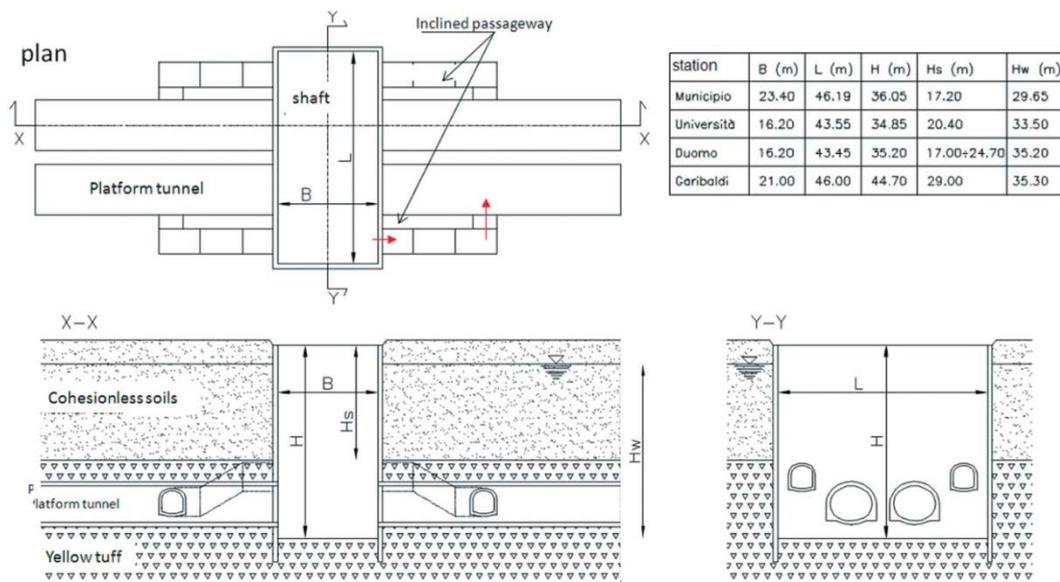


Figura 2.10 Características principales de las estaciones del tramo inferior de la línea 1 (Russo et al 2012).

Los pozos de las estaciones y los túneles de plataforma fueron excavados primero, a partir de entonces la tuneladora cruzó la estación, entrando por el túnel de plataforma oeste y saliendo por el del este.

2.8.1.1 Excavaciones profundas para las estaciones

Las excavaciones abiertas para las cuatro estaciones se han reportado en otras partes de algunos detalles de Viggiani et al 2011, Maiorano et al 2002, Mandolini et al 2004, De Sanctis et al 2006. Fueron excavadas en un entorno densamente construido a través de depósitos granulares no cohesivos 17 a 30 m de espesor, y luego en la toba volcánica amarilla, con la capa freática de 30 a 35 m por encima del fondo de la excavación. El soporte a la excavación fue proporcionado por muros pantalla de hormigón armado excavados por hydromill en Paneles de 2,5 m de ancho y 1 m de espesor. Los muros estaban soportados por puntales de acero tubular en la superficie y de 4 a 6 niveles de anclajes al terreno, de arriba hacia abajo de la construcción de las cajas de estación también fue adoptada en algunos casos.

En la estación Municipio, la excavación expuso una parte del puerto romano de la ciudad, con la recuperación de tres naves romanas. En la estación Duomo, se descubrieron una fuente medieval del siglo XIII y un edificio romano de época imperial con importantes mármoles y mosaicos; en este caso, el diseño original de la estación tuvo que ser cambiado para adaptarse a los hallazgos arqueológicos pendientes lo que supuso que la finalización de la estación se esté quedando atrás del resto de la línea.

Vale la pena mencionar que los asentamientos directamente asociados con la excavación de los pozos de la estación fueron de sólo unos pocos milímetros, en buen acuerdo con la

evidencia disponible anteriormente (Clough et al 1990). Una parte importante de los asentamientos finales observados derivados de la reducción de la capa freática debido al flujo de agua en la caja de la estación, ya sea a través de los agujeros perforados en las paredes de diafragma para instalar los anclajes y los tubos de congelación, o a través de las imperfecciones en la conexión entre el collar suelo artificialmente congelado y la pared del diafragma (Viggiani et al 2011).

2.8.1.2 Túneles de plataforma

En las estaciones de Municipio, Università y Garibaldi, la excavación de los túneles de plataforma comenzó después de la terminación de la excavación del pozo principal, cortando una porción de la pared del diafragma. Aun cuando la corona túnel siempre se ha mantenido dentro de la formación de toba amarilla, la congelación del suelo artificial se implementó como una medida de protección antes de la excavación. La intención era crear un tubo impermeable alrededor de cada túnel para evitar el flujo de agua en el área excavada desde el sistema anteriormente mencionado de fracturas subverticales, la erosión y el transporte de los suelos no cohesivos por encima (puzolana) y fallas catastróficas de estallido de la toba por presión dentro de las fisuras cerca del frente de la excavación.

La historia de asentamiento de un punto en un edificio adyacente al túnel de plataforma en la estación de Garibaldi se muestra en la Figura 2.11 como un ejemplo de los efectos de la congelación y la descongelación. Durante la excavación del túnel y la posterior instalación del revestimiento permanente en el suelo helado, el asentamiento del edificio aumentó y continuó aumentando con un gradiente mayor que la descongelación procedida. En este caso, el edificio ha sido apuntalado con micropilotes, deteniendo así el asentamiento.

En la estación de Duomo, como se mencionó anteriormente, la excavación del pozo se retrasó por hallazgos arqueológicos y en consecuencia, los túneles de circulación pasaron a través del lugar antes de la excavación. Después de la excavación de la caja de la estación, se ampliaron los túneles de circulación para obtener las plataformas mediante la demolición de los anillos prefabricados de revestimiento después de primero haber inyectado la toba circundante a través de las paredes. Durante esta etapa, los asentamientos de los edificios en la superficie fueron más bien pequeños, con un máximo de 7 mm.

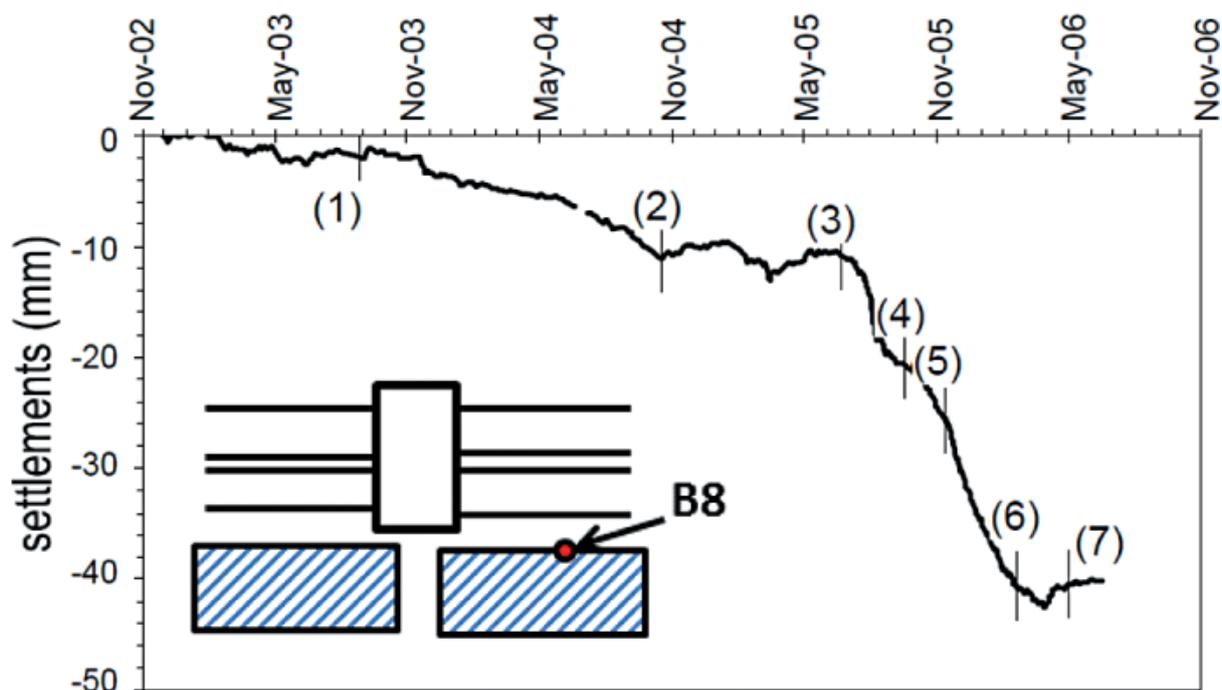


Figura 2.11 Asentamientos de punto de referencia B8. (1) a (2): instalación de anclajes; (2) a (3): congelación del terreno; (4): excavación del túnel de plataforma; (5): instalación de revestimiento permanente; (5) a (6): descongelación; (7): apuntalamiento (Russo et al 2012).

2.8.1.3 Túneles de circulación

El pozo de puesta en marcha de las tuneladoras se encuentra aproximadamente a 1 km al oeste de la estación Garibaldi, a unos 17 m por debajo del nivel del suelo. Los túneles gemelos pasan a través de las arenas aluviales y arenas limosas debajo del nivel freático hasta la estación Garibaldi, donde entran en la formación de toba amarilla y se mantienen en su interior hasta el final del tramo.

Los asentamientos observados inducidos por la excavación del túnel eran pequeños y a menudo insignificantes. En el oeste del tramo inicial de la estación Garibaldi (Figura 2.12), los asentamientos se registraron en un número de secciones de campo verde, ya que la zona está virtualmente desocupada. Incluso en este tramo del subsuelo sin cohesión, los asentamientos observados eran bastante pequeños. Algunos de los perfiles de asentamiento longitudinales y transversales más significativos grabados se muestran en la Figura 2.13. El asentamiento máximo a lo largo del eje del primer túnel excavado raramente excede de 10 mm.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

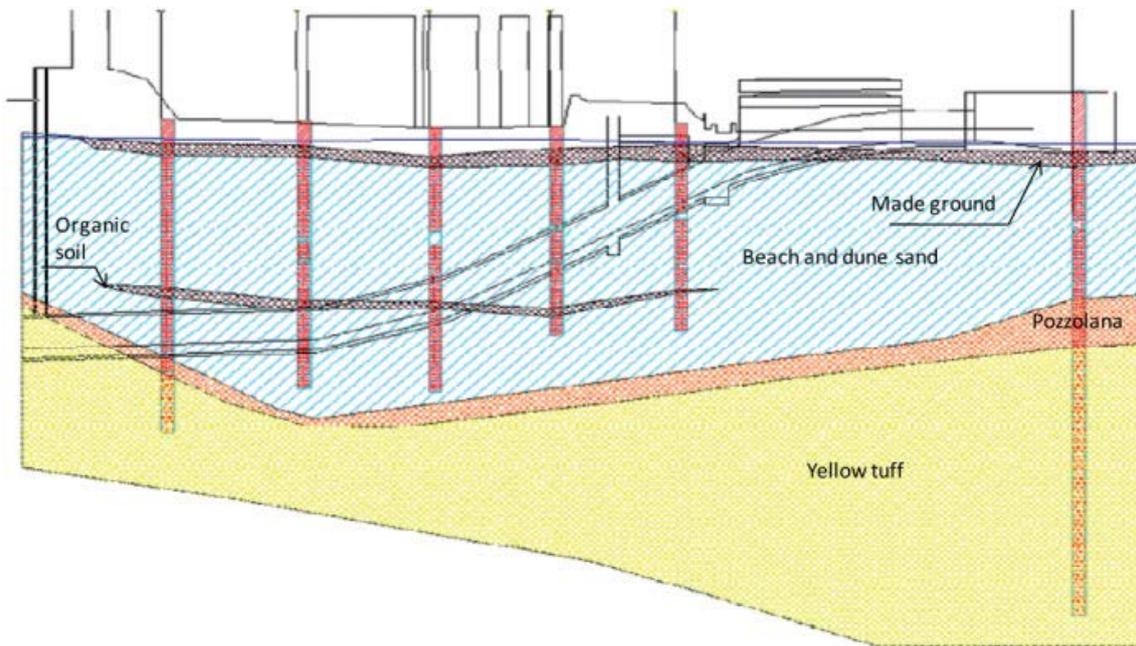


Figura 2.12 Perfil del subsuelo a lo largo del túnel oeste de la estación Garibaldi (Russo et al 2012)

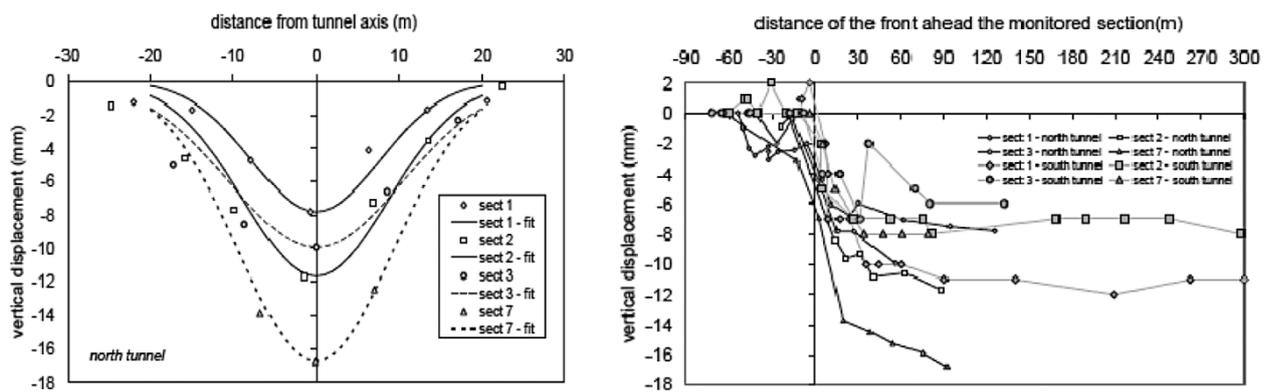


Figura 2.13 Perfiles de asentamientos longitudinales y transversales sobre los túneles de circulación (Russo et al 2012).

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan detalladamente las distintas modificaciones realizadas a los equipos disponibles en el laboratorio, con el fin de conseguir una configuración de conjunto de los mismos que permita llevar a cabo ensayos edométricos, a temperaturas inferiores al punto de congelación del agua ($22^{\circ}\text{C} \leftrightarrow -20^{\circ}\text{C}$).

Inicialmente con el equipo refrigerador y una célula edométrica térmica se llevó a cabo la realización de un ensayo de prueba, con la finalidad de observar el acoplamiento y funcionamiento de las distintas partes. En la Figura 3.1 se presenta dicha configuración inicial en detalle.

Para la ejecución de este ensayo se colocó el material en la célula edométrica, la que a su vez fue dispuesta en el interior del equipo refrigerador y se dio inicio a la etapa de consolidación del ensayo.

Cuando finalizó la etapa de consolidación se procedió a la inserción del anticongelante refrigerante en el interior del baño del equipo para dar inicio a la etapa térmica (congelación-descongelación). Este líquido tiene la función de transmitir los cambios de temperatura que se apliquen en el regulador (termostato) del refrigerador a la célula edométrica y esta a su vez a la muestra de material en su interior. Esta etapa se programó para llegar a -10°C desde la temperatura del laboratorio ($22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$) y una vez alcanzada, se mantuvo durante 48 horas, y después se regresó al punto de partida. Todo este procedimiento se ejecutó a través de gradientes de temperatura (ΔT) escalonados ($22^{\circ} \rightarrow 4^{\circ} \rightarrow 0^{\circ} \rightarrow -5^{\circ} \rightarrow -10^{\circ} \rightarrow -5^{\circ} \rightarrow 0^{\circ} \rightarrow 4^{\circ} \rightarrow 22^{\circ}\text{C}$).

Sin embargo, al encender el equipo y comenzar a aplicar la disminución de temperatura (para $T=0^{\circ}\text{C}$) se percibió una condensación de vapor de agua (proveniente de la masa de aire saturado del entorno) en la parte superior de la célula edométrica (no sumergida). Este efecto de condensación es producto de las diferencias existentes entre la temperatura del laboratorio y la de la parte superior de la célula en el interior del baño térmico ($\Delta T \approx 20^{\circ}$).

Esta condensación inicial a 0° pasó con los ajustes posteriores ($0 \rightarrow -5^{\circ} \rightarrow -10^{\circ}$) a convertirse en hielo sobre la parte superior del edómetro. Además, con el transcurso del tiempo se extendió el cuerpo de hielo sobre el lugar de contacto del vástago del pistón y el LVDT, dejando cierta incertidumbre en si los registros que se estaban realizando correspondían a cambios volumétricos en la muestra o a la formación de hielo entre el equipo de medición y el vástago del pistón.

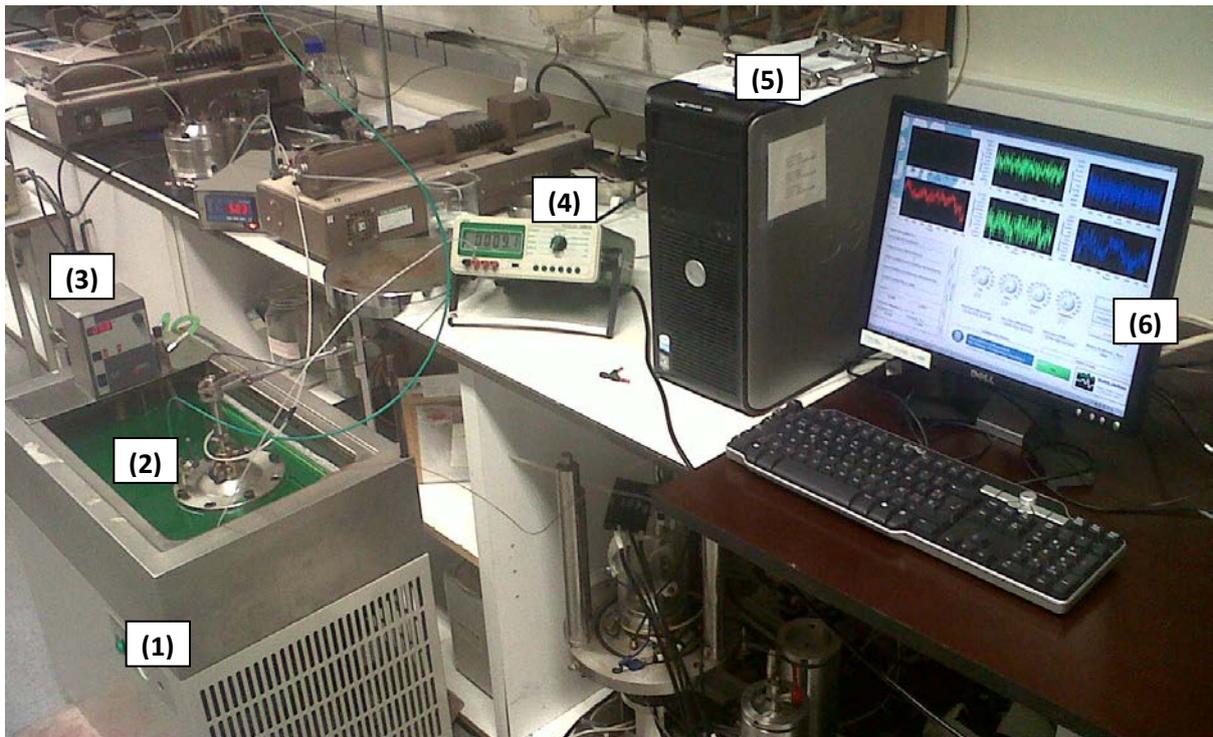


Figura 3.1 Configuración inicial del equipo durante el ensayo de prueba. (1) Equipo refrigerador; (2) célula edométrica; (3) Termostato DT1; (4) Control de temperatura externo; (5) Sistema Adquisición de datos; (6) Plataforma software de registro de desplazamientos y temperaturas.

Además de la ocurrencia de estas irregularidades hubo otras de menor envergadura como la congelación en el interior de la cámara del pistón y movimientos en la base soporte del LVDT colocada sobre una mesa exterior. También se observó la necesidad de insertar una segunda célula para ensayos simultáneos de toba y puzolana, de controlar y registrar la temperatura lo más próximo posible al material (interior de la célula) y de poder alcanzar temperaturas de -20°C mediante un cambio en el anticongelante refrigerante.

Para desarrollar una configuración de los equipos más eficiente y adecuada a este caso se llevaron a cabo una serie de acciones sobre cada problema observado y también se añadieron mejoras puntuales.

A continuación se presentan detalladamente las acciones sobre cada problema y las adaptaciones añadidas.

3.2 EQUIPO REFRIGERADOR



Figura 3.2 Equipo refrigerador Hetofrig Modelo DT 1 CB 8-30. Laboratorio de Geotecnia, UPC.

El sistema de refrigeración es un baño de enfriamiento de Heto, modelo DT 1 CB 8-30 e. Es posible regular la temperatura entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.2). Hay dos equipos separados en el mismo tanque: un refrigerador y un calentador. La fuente de enfriamiento es continua con la temperatura controlada por una válvula de presión constante: esto significa que la presión del compresor regula la temperatura del enfriador. La potencia del refrigerador es de 630 W. La bobina se encuentra refrigerador en las paredes del depósito en contacto con el líquido. El calentador tiene una potencia de 1200 W y tiene un termostato digital con una precisión de $\pm 0,005\%$ y una resolución de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el calentador mismo hay una bomba sumergible con un caudal de 14 l / min . Esta bomba se utiliza para crear un flujo en el baño para tener una temperatura uniforme en el baño entero y para bombear el fluido en una bomba más grande cuya tarea principal es bombear el líquido en los transmisores de temperatura a una velocidad de flujo suficiente para mantener la temperatura constante en la muestra del lado frío.

3.3 MODIFICACIONES SOBRE EL EQUIPO REFRIGERADOR

3.3.1 Aislamiento térmico

Con la finalidad de mitigar los efectos de condensación del vapor de agua producidos por el aire saturado del entorno y evitar la aparición de masas de hielo en la superficie de la tapa de la célula, en el contacto vástago del pistón-LVDT, y en el perímetro superior del baño térmico se procedió a construir una estructura de aislamiento hermética que generase una especie de microclima en el interior del equipo en donde no existiese una diferencia de temperatura considerable entre el baño térmico y la parte superior del edómetro.

Dicho cerramiento se fabricó con polietileno reticulado y con perfiles L en PVC (policloruro de vinilo) que aportaban rigidez a la estructura, mientras que la unión entre ambos materiales fue provista por cinta adhesiva de alto rendimiento.

En la tapa del refrigerador construida se colocó un pequeño visor de metacrilato de dimensiones de 100 mm x 150 mm a través del cual se puede observar la parte superior de las células y verificar la temperatura en el regulador digital del refrigerador (Figura 3.3 (b)).

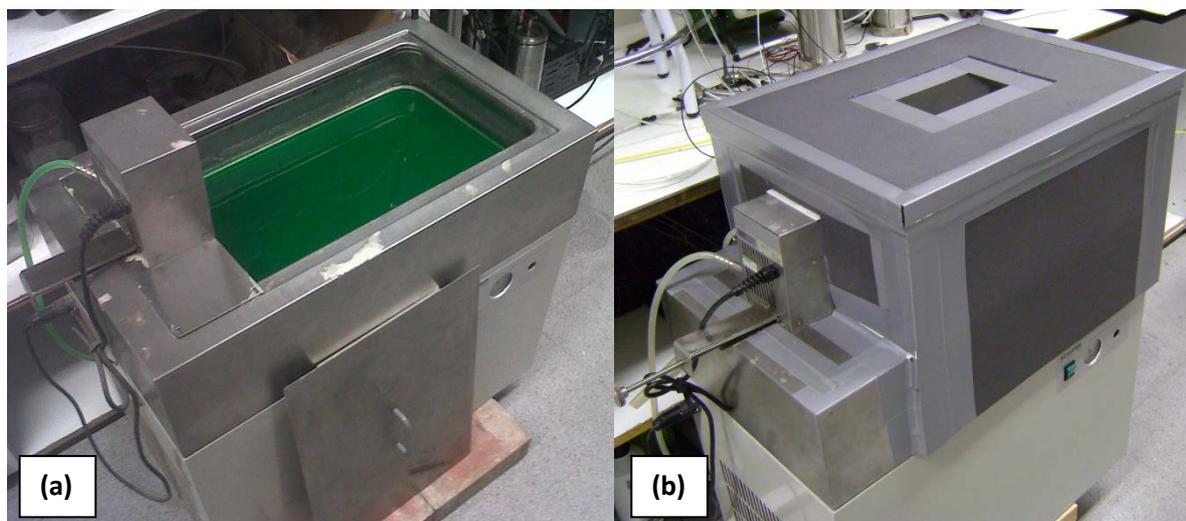


Figura 3.3 (a) Equipo refrigerador antes de la modificación; (b) Equipo refrigerador con la estructura de aislamiento en polietileno.

3.3.2 Panel de entrada de LVDT's, termopares, y tubos de presión aire y presión de cola

Continuando con la búsqueda de hermetismo en el conjunto se hizo necesaria la incorporación de un panel (Figura 3.4 (a)) en una de las paredes laterales a través del cual se introdujeran al equipo los LVDT's, los termopares, las tuberías de presión de aire, y las tuberías de presión de cola por medio de agua (entrada y drenaje).

3.3.3 Barra de Soporte de LVDT's

A raíz de la experiencia previa (necesidad de aislamiento) y en la búsqueda de un acoplamiento del conjunto se buscó la manera de insertar un soporte doble al cual estarían unidas las pinzas con sus respectivos LVDT's.

Esto se logró por medio de la colocación de una barra vertical de unos ≈ 10 mm de diámetro en una de las esquinas superiores del refrigerador. Luego, mediante una nuez se conectó la barra vertical con otra barra horizontal de unos 50 cm de longitud en la cual se fijaron los soportes del par de LVDT's. En la Figura 3.4 (b) se observa la disposición final de la barra integrada con los soportes.

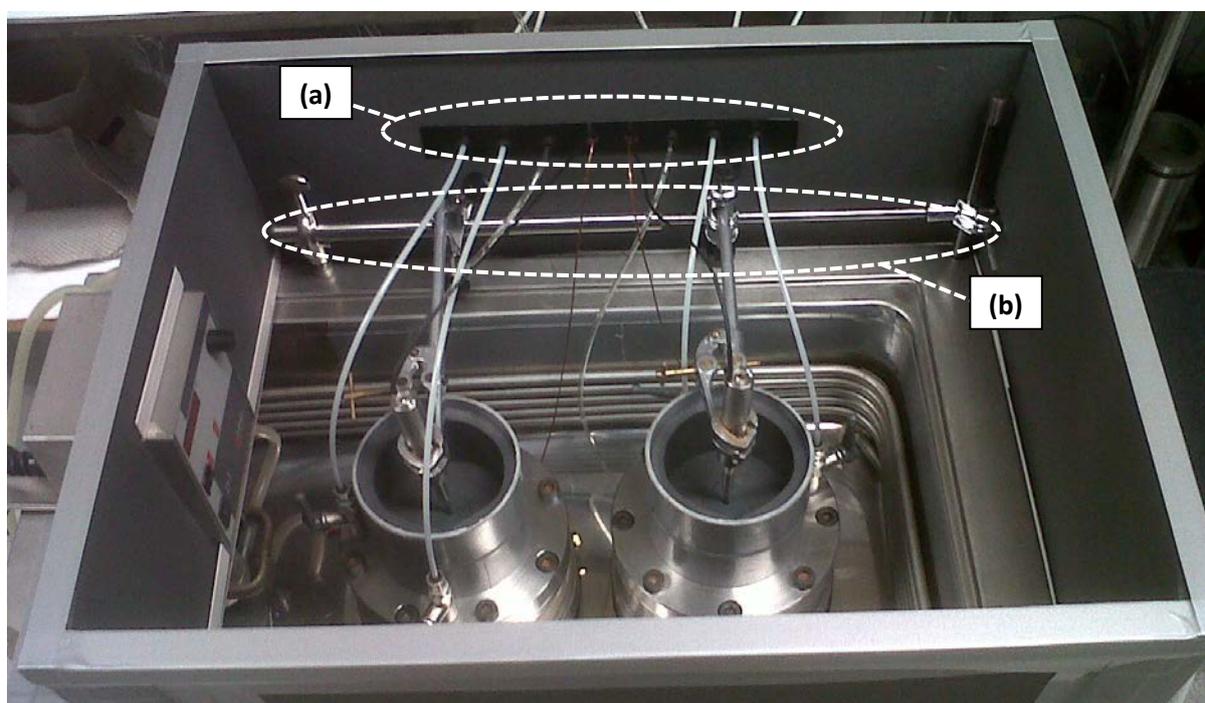


Figura 3.4 (a) Panel de entrada de LVDT, termopares, y tubos de presión aire y presión de cola; (b) barra de soporte integrada de los LVDT.

3.3.4 Anticongelante Refrigerante

Con el primer producto anticongelante no era posible alcanzar con seguridad temperaturas inferiores a -10°C , así que eso condujo a la búsqueda de uno que lo permitiese ya que el interés se centraba en alcanzar las temperaturas a las que a través del método de congelación artificial fueron expuestas la toba y la puzolana de Nápoles.

En el mercado se consiguió un producto anticongelante refrigerante universal concentrado que al mezclarse con agua al 50% se alcanzaban con seguridad temperaturas de hasta -36°C ,

lo que dejaba cubierta con margen la temperatura estipulada en el programa experimental de alcanzar -20°C .

Dentro de las características de la ficha técnica del anticongelante cabe destacar la excelente capacidad de transferencia térmica y la protección contra la corrosión de todos los metales.

3.4 CÉLULAS EDMÉTRICAS

El equipo utilizado corresponde a una célula edométrica con control de succión desarrollada por el Laboratorio de Geotecnia de la UPC, el cual cuenta con un anillo de dimensiones de 50mm de diámetro y 20mm de altura. En la Figura 3.5 se muestra una fotografía del equipo y sus componentes desarrollada en el Laboratorio de Geotecnia de la UPC.

La célula edométrica con control de secado e inundación de la muestra es un equipo metálico rígido que se compone de cinco partes fundamentales: 1) la base, 2) el anillo porta muestras, 3) el cuerpo central, 4) la parte superior y, 5) el eje de carga con pistón y membrana de estanqueidad (Figura 3.6).

La base del equipo está formada de dos piezas: el plato y una base apoya muestras. En el plato se alojan las conexiones para válvulas (agua y/o aire). Al centro de éste se coloca la base apoya muestras, que es intercambiable dependiendo del tipo de ensayo y de la técnica de control de succión a utilizar. Para la realización de los ensayos se contó con una piedra porosa metálica con dimensiones de 50mm de diámetro y 7.15mm de espesor.



Figura 3.5 Partes de la célula edométrica con control de secado e inundación. Laboratorio de Geotecnia, UPC.

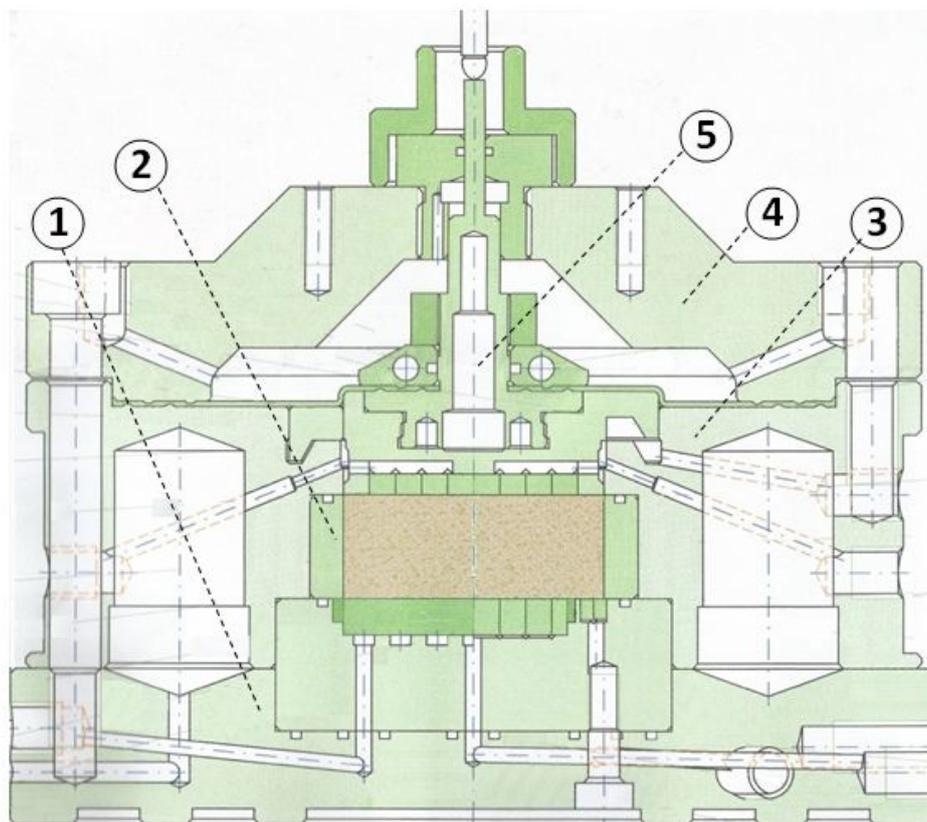


Figura 3.6 Esquema de la célula edométrica utilizada. Laboratorio de Geotecnia, UPC.

El anillo porta muestras se apoya de forma concéntrica sobre la base apoya muestras y permite realizar ensayos sobre probetas con altura variable entre 10 y 20mm.

El cuerpo central del equipo contiene al anillo porta muestras (restricción de movimiento horizontal) y aloja las conexiones para las válvulas de presión y circulación de aire.

3.5 MODIFICACIONES DE LAS CÉLULAS EDMÉTRICAS

3.5.1 Control de temperatura en el interior de las células edométricas

A efectos prácticos y debido a la disposición en el cuerpo central del edómetro se introdujo un termopar desde el exterior hasta el punto de contacto entre el pistón de carga y el anillo edométrico (Figura 3.7 (a)). Todo esto con la finalidad de conseguir una medición y un registro de la temperatura con la mayor proximidad posible a la muestra de ensayo. Con el termopar dentro del conducto se selló el extremo exterior con silicona (Figura 3.7 (b)) para impedir la entrada del anticongelante a la célula. Esto se realizó sobre los dos edómetros utilizados.

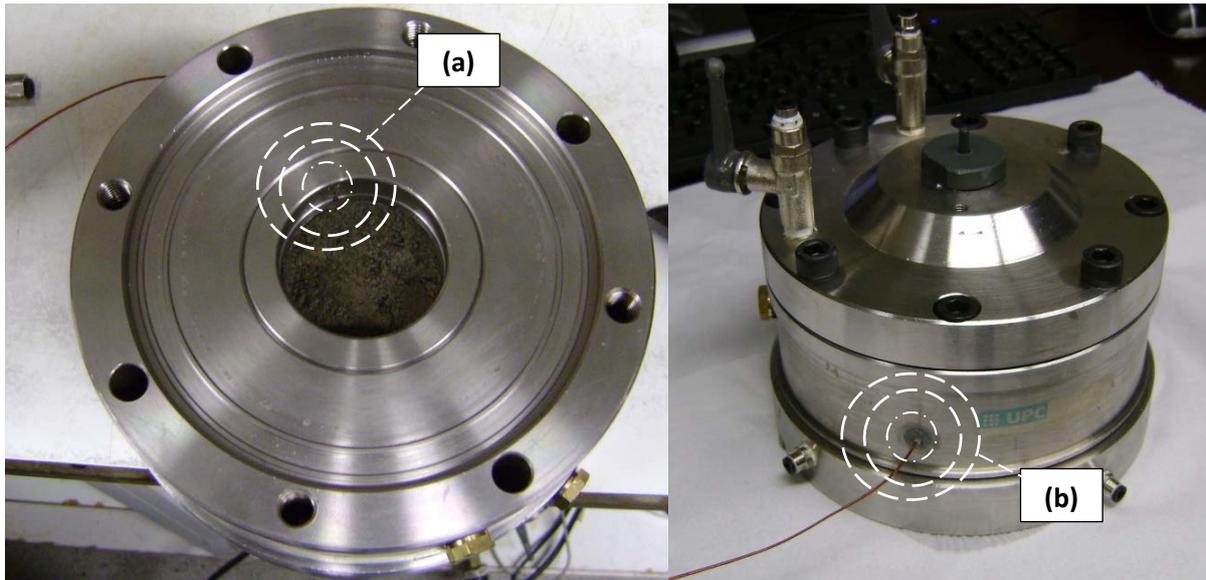


Figura 3.7 (a) Punto de medida del termopar; (b) entrada del termopar a la célula edométrica.

3.5.2 Cambio del casquillo guía y vástago del pistón a PVC

Después de múltiples pruebas, la solución a la congelación en la tapa del edómetro llegó con la sustitución del vástago del pistón y del casquillo guía que eran piezas fabricadas en latón cromado. Debido a la alta conductividad térmica de este metal que oscila entre 81-116 W/m·K y todo el vapor de agua condensado sobre este sucedía que rápidamente se creaba una capa de hielo que se extendía sobre toda la superficie afectando la zona de auscultación (Figura 3.8 (b)).

Dichas piezas fueron sustituidas por otras de igual dimensión moldeadas con un plástico de PVC (policloruro de vinilo). La elección de un material de plástico se dio por su baja conductividad térmica (para PVC varía entre 0.12-0.25 W/m·K) que resulta ínfima en comparación a las de latón u otros metales. El hecho de que las nuevas piezas se construyeran en PVC resultó de la disponibilidad de plásticos en el taller de fabricación y de que la utilización de este material no suponía ningún inconveniente en cuanto a resistencia, dadas las cargas (resistencia a compresión de 610 Kg/cm²) y las bajas temperaturas (temperatura mínima permisible de utilización de -30°C) a las que estarían sometidas.

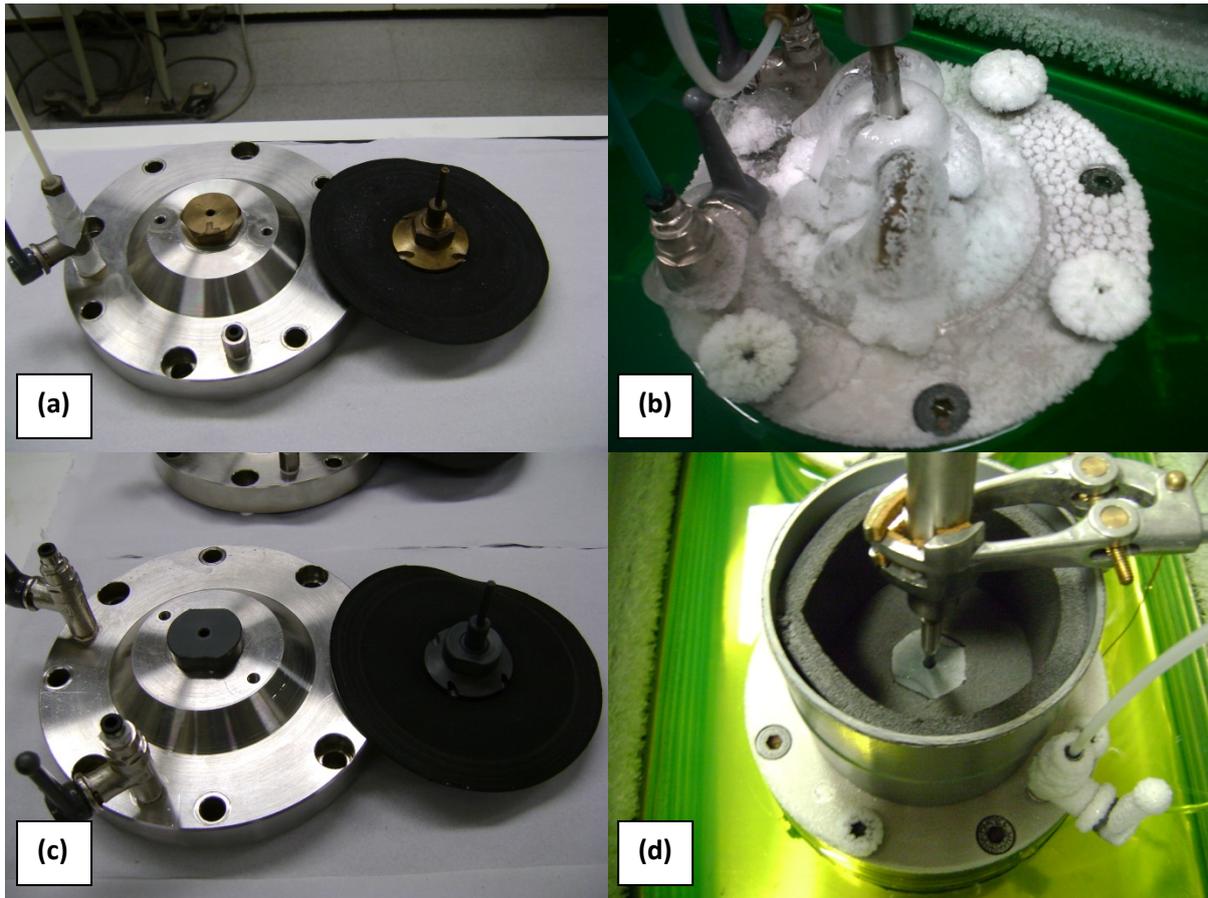


Figura 3.8 (a) Tapa superior con casquillo guía y vástago del pistón en latón; (b) Detalle de las piezas de latón a -10°C ; (c) Tapa superior con casquillo guía y vástago del pistón en PVC; (d) Detalle de las piezas de PVC a -20°C .

3.5.3 Aislamiento de zona de contacto vástago del pistón-LVDT

Además del cambio en el material de las piezas se realizó un aislamiento de la zona de contacto vástago-LVDT ya que las válvulas a través de las cuales llega y se controla el aire a presión están hechas de hierro y continuaban congelándose. Para evitar que la masa de hielo alcanzase el punto de contacto se colocó una sección de tubo de PVC de 100 mm de diámetro interior y una longitud de 100 mm sobre la parte superior de la célula e internamente se recubrió con el polietileno reticulado dejando de ese modo aislado el punto de contacto (vástago-LVDT) del hielo de las válvulas. En la Figura 3.9 se observa un detalle de las piezas colocadas con este fin.



Figura 3.9 Aislamiento zona de contacto vástago del pistón-LVDT con sección de PVC y revestimiento interno de polietileno.

3.5.4 Cámaras de secado de aire

Partiendo de la formación de hielo encontrada (Figura 3.10(a)) en la prueba inicial sobre la parte interna del vástago en la cámara de carga se consideró necesario que las tuberías del sistema de aire a presión pasasen por un proceso de secado que redujese la humedad relativa del mismo ($HR \leq 10\%$) disminuyendo así la posibilidad de deposición de humedad contenida en el aire a presión y su posterior congelación, ya que esto se podría traducir en la restricción del movimiento vertical del pistón.

El proceso de secado se realizó haciendo pasar el aire a presión de cada edómetro por una cámara (sin membrana) con cloruro de litio (LiCl) en su interior y saliendo por otra válvula de la misma cámara hacia la célula edométrica. El cloruro de litio es un deshidratante utilizado cuando se requiere bajar mucho la humedad, los puntos de rocío que se necesitan pueden aproximarse al punto de congelación o menos. En la Figura 3.10 (b) se presentan las cámaras utilizadas con el cloruro de litio en su interior.

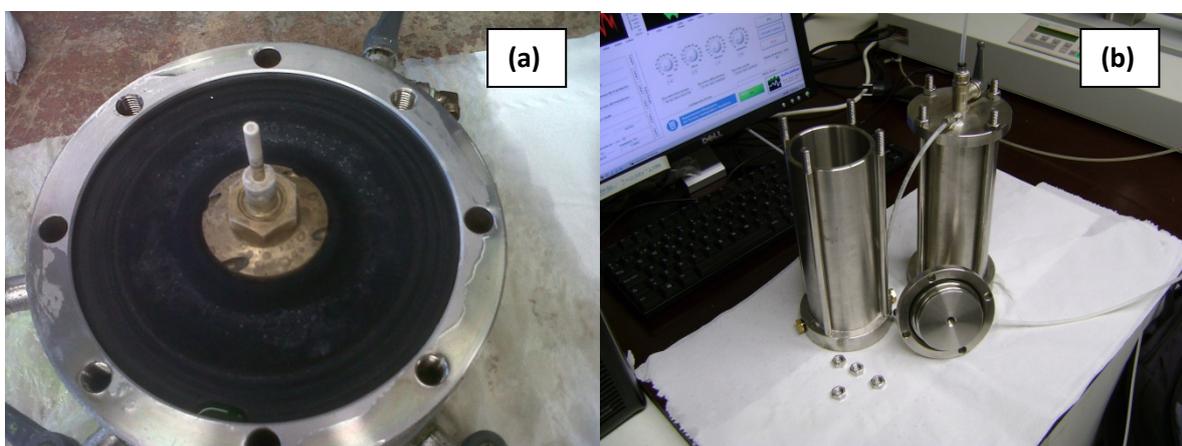


Figura 3.10 (a) Formación de escarcha sobre la parte del vástago del pistón, (b) Cámaras de secado de aire.

3.6 CONFIGURACIÓN DEFINITIVA DEL EQUIPO

A partir de todas las modificaciones tanto en el equipo refrigerador como en las células edométricas se obtuvo la configuración de equipo necesaria para realizar los ensayos previstos sin las complicaciones iniciales. En la Figura 3.11 se observa la configuración externa del equipo.

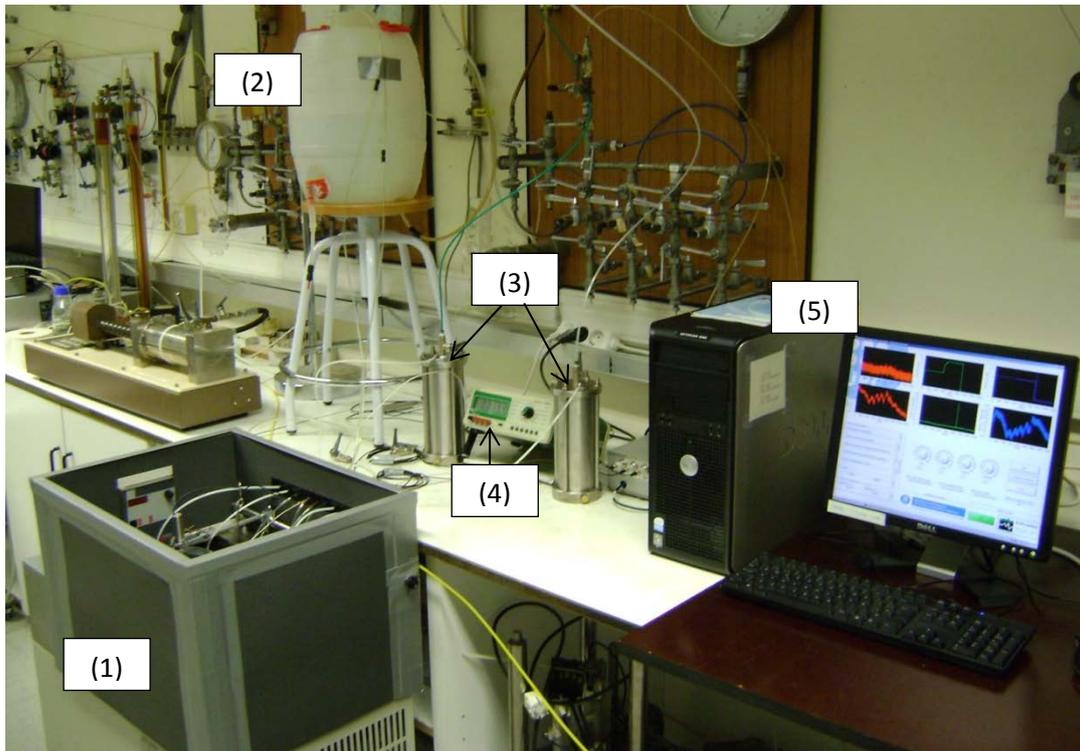


Figura 3.11 Configuración exterior. (1) Equipo refrigerador con células edométricas; (2) recipiente con columna de agua de presión de cola $\approx 10\text{KPa}$ (1metro de altura); (3) Cámaras de secado de aire (con cloruro de litio); (4) control de temperatura del baño externo (termopar); (5) Sistema de adquisición de datos.

El refrigerador durante la etapa de consolidación se mantiene apagado y el baño sin el anticongelante refrigerante (Figura 3.12). Para la etapa térmica se introduce el anticongelante y se enciende tanto el refrigerador como su termostato regulador interno (Figura 3.13).

*Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo*



Figura 3.12 Configuración interna en el refrigerador durante la etapa de consolidación.

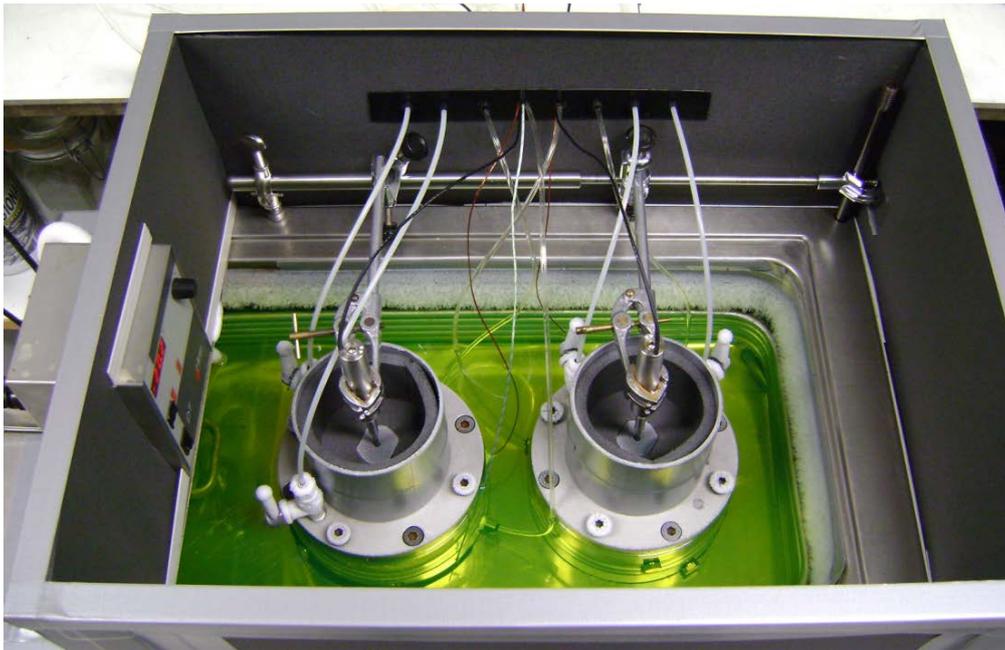


Figura 3.13 Configuración interna en el refrigerador durante la etapa térmica.

3.7 TÉCNICA EXPERIMENTAL COMPLEMENTARIA UTILIZADA

3.7.1 Porosímetro de intrusión de mercurio

La porosimetría por intrusión de mercurio en el ámbito de la geotecnia permite a través de la realización de ensayos de intrusión de mercurio (MIP), hacer una buena estimación de la distribución del tamaño de los poros que se encuentran interconectados entre sí dentro de un material; esto se realiza mediante la aplicación de niveles de presión a una muestra sumergida en mercurio. La presión aplicada hace que el llenado con mercurio de los poros se logre primero en los de mayor tamaño y luego en los de menor tamaño.

Los ensayos se realizaron en un porosímetro de mercurio fabricado por la casa Micromeritics, modelo AutoPore IV 9500, el cual permite realizar dos etapas en la aplicación de la presión. La primera, la cual corresponde a la etapa de baja presión en la que se aplican valores en un rango entre 0.0025 y 0.2MPa; y la segunda, la etapa de alta presión en la que se aplican valores en un rango entre 0.2 y 220MPa. En la etapa de baja presión, el equipo utiliza nitrógeno seco (aire seco) como fluido para aplicar la presión sobre el mercurio, mientras que en la etapa de alta presión utiliza aceite. El equipo y sus puertos se muestran en la Figura 3.14.

El porosímetro mide el volumen total de mercurio inyectado en los poros de la muestra y la presión aplicada para lograrlo. Así, cuando se aumenta la presión se calcula el tamaño del poro para cada incremento de presión, al mismo tiempo que se mide el volumen de mercurio necesario para llenar estos poros. La presión aplicada al mercurio en cada incremento nos da información del tamaño de los poros y el volumen total de mercurio inyectado nos da información sobre el índice de poros en la muestra.

3.7.2 Procedimiento de ensayo de porosimetría

El tamaño de las muestras está condicionado por el tamaño del soporte de la muestra o volumen del penetrómetro: forma cúbica con un tamaño aproximado de 10 mm.

Siguiendo el procedimiento ASTM D4404-10 de prueba, una vez que la muestra se corta y se secó por un proceso de 'freeze drying', se pesa y se coloca en el puerto de baja presión para una aplicación de vacío inicialmente (el soporte de muestra se llena con mercurio). Entonces, la presión de mercurio se eleva 0,0025 a 0,2 MPa, llenando primero los poros más grandes. Después de esta etapa, el penetrómetro se retira del puerto, se pesa nuevamente (incluyendo la muestra y la masa de mercurio inyectado) y se coloca en el interior del puerto de alta presión para llenar los poros más pequeños hasta una presión máxima de 220 MPa (tamaños de poro de entrada alrededor de 7 nm). Después de completar esta etapa de

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

llenado último, la trayectoria de extrusión comienza liberar la presión del mercurio. Algunas partículas de mercurio quedan no son extruidas quedando atrapadas de manera permanente en los porosidad no conectada después de la liberación de presión (Romero y Simms, 2008). Proceso de liofilización parece ser adecuada, ya que los efectos de la tensión superficial inducida por el retroceso de las interfaces de aire-agua son eliminados (Romero y Simms, 2008).

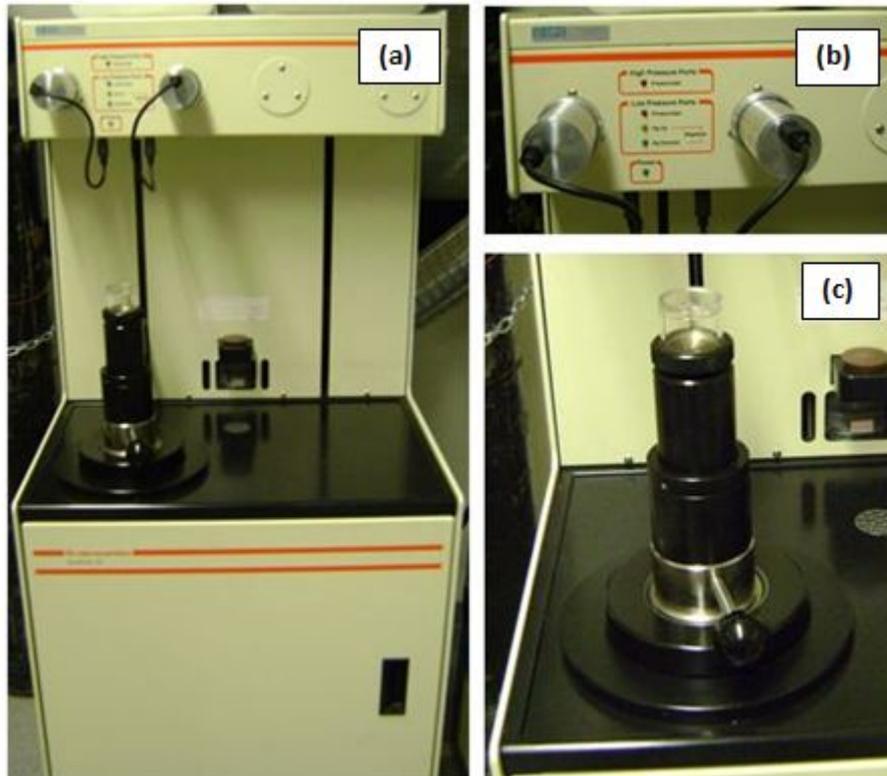


Figura 3.14 (a) Porosímetro de mercurio (Autopore IV 9500); (b) Puertos de baja presión; (c) Puerto de alta presión.

CAPÍTULO 4. MATERIAL UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centra en la caracterización geotécnica de los materiales (toba y puzolana) del caso expuesto en el capítulo 2. Inicialmente se presentara la caracterización del estado inicial de las muestras en una tabla resumen de ambos materiales. Finalmente se muestra la distribución de tamaño de partículas para cada material ensayado.

4.2 ORIGEN DE LOS MATERIALES

Los materiales fueron extraídos y facilitados por Tecno-in SpA (Nápoles) en la Plaza Municipio de Nápoles (Figura 4.1), lugar de una de las estaciones de metro en que se aplicó la congelación artificial. Las muestras intactas de puzolana corresponden a sondeos realizados a una profundidad de 10 a 12 m; mientras que las de toba provienen de extracciones a profundidades entre 20 a 24 m.

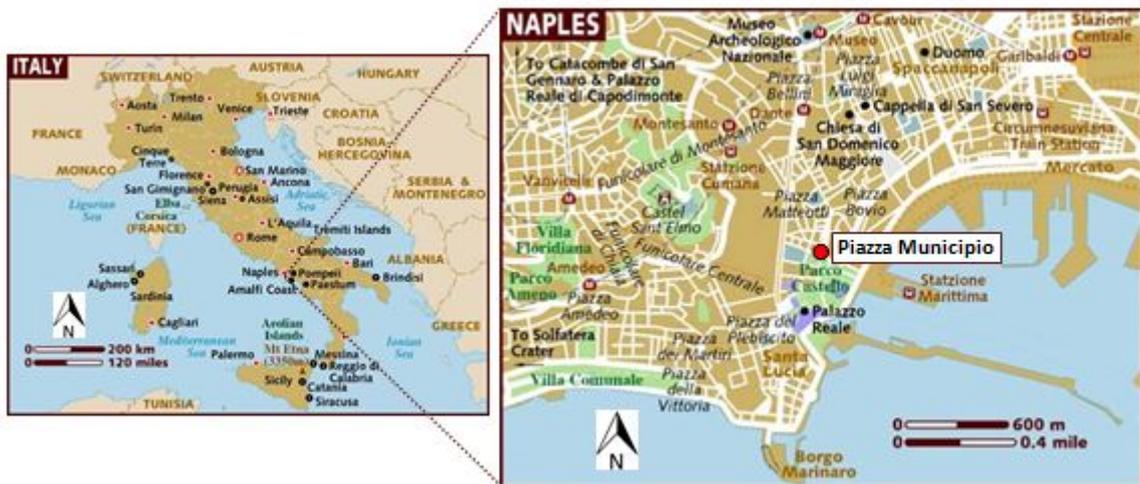


Figura 4.1 Mapa de situación geográfica de los materiales de estudio.

4.3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Con el fin de caracterizar el material de toba y puzolana (Figura 4.2) desde el punto de vista geotécnico, se realizaron diversos ensayos de laboratorio para conocer y clasificar las propiedades del suelo utilizado en este estudio. Como parte de la clasificación geotécnica macroestructural se realizaron los siguientes ensayos: peso específico de los sólidos

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

(Gravedad específica de partículas) según la norma UNE 103302-1994, peso específico natural según la norma UNE 103301-1994, humedad del material según la norma UNE 103300-1993 y los ensayos de distribución de tamaño de las partículas según la serie de tamices ASTM. Se presenta un resumen de la caracterización de ambos materiales en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Caracterización geotécnica de la puzolana y toba

Parámetros del suelo	Puzolana	Toba
Peso específico natural γ_{nat}	1.67 g/cm ³	1.15 g/cm ³
Peso específico seco γ_d	1.33 g/cm ³	1.03 g/cm ³
Peso específico de los sólidos del suelo γ_s	2.46 g/cm ³	2.46 g/cm ³
Índice de poros, e_0	0.84	1.38
Porosidad, n	0.46	0.58
Humedad, w	24.46 %	11.17 %
Grado de saturación, Sr_0	70.64 %	19.90 %

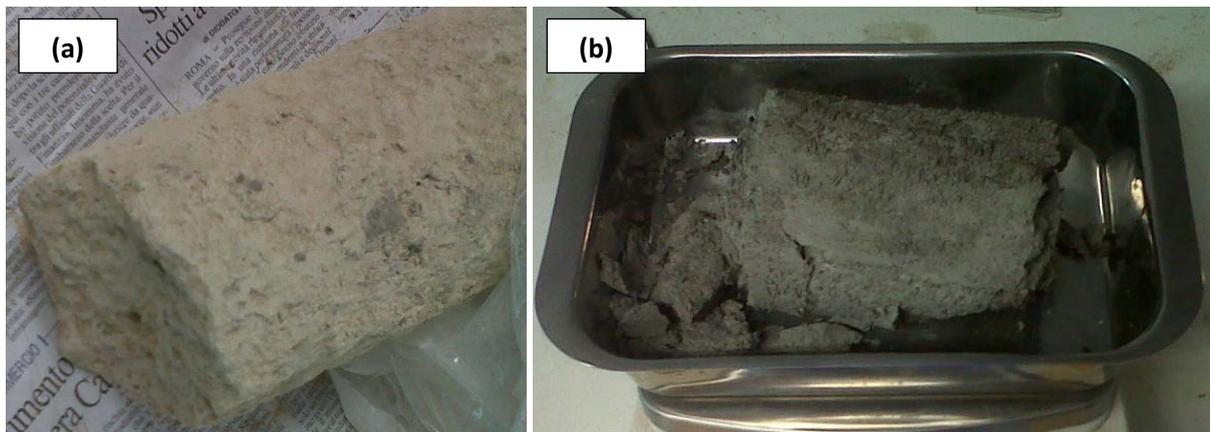


Figura 4.2 Materiales caracterizados en su estado inalterado. (a) Toba; (b) puzolana.

En la figura 4.3 se observa el ensayo distribución de tamaño de partículas de la puzolana de Nápoles con un tamaño máximo de partículas de aproximadamente 5 mm. y un 2.49 % de partículas menores a las 100 μm .

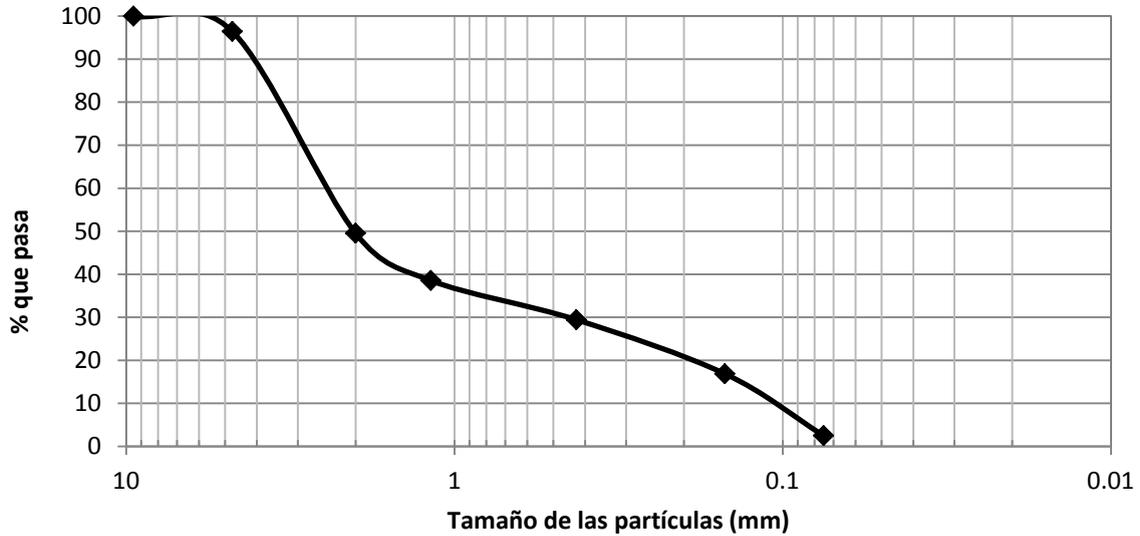


Figura 4.3 Granulometría de la puzolana de Nápoles.

En la figura 4.4 se observa el ensayo distribución de tamaño de partículas de la toba amarilla de Nápoles destructurada; con un tamaño máximo de partículas de aproximadamente 5 mm. y próximo al 10% de partículas menores a las 100 μm .

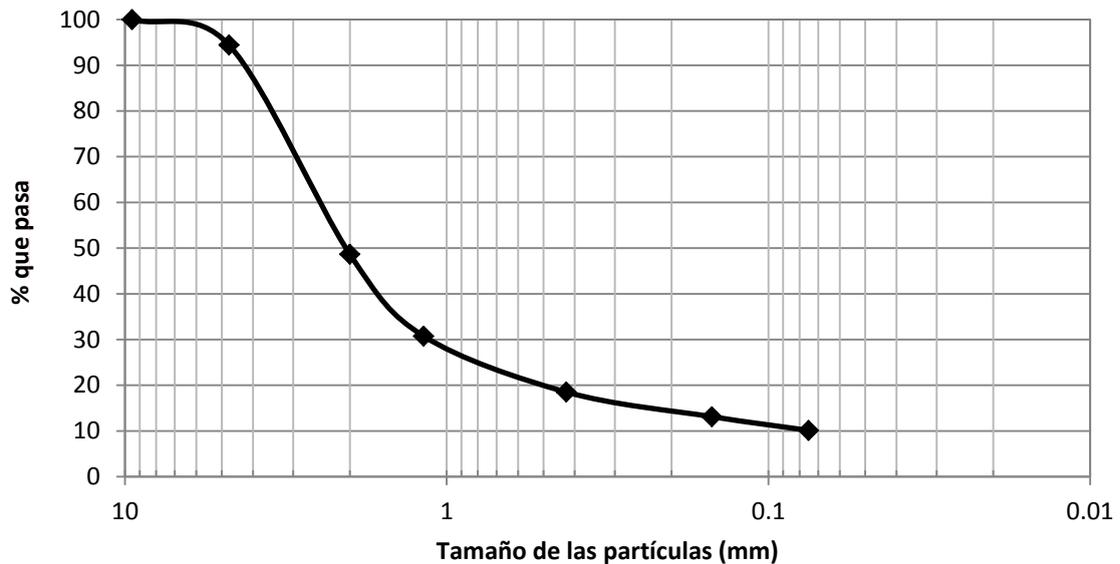


Figura 4.4 Granulometría de la toba amarilla de Nápoles destructurada.

***Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo***

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 ENSAYOS EDMÉTRICOS A BAJA TEMPERATURA

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la investigación experimental realizada sobre los materiales provenientes de Nápoles, Italia. Se presentaran los ensayos edométricos a baja temperatura, comenzando por el ensayo de calibración del equipo desarrollado; y posteriormente los llevados a cabo sobre la toba y puzolana según el programa detallado en la sección xx para cada uno de estos.

Finalmente se presentaran los resultados de las porosimetría por intrusión de mercurio de ambos materiales en su estado inalterado y posterior a los ensayos edométricos a baja temperatura

5.1.1 Calibración del equipo

Para el ensayo de calibración del equipo se colocó un una pieza rígida de 50 mm x 20 mm a fin de medir la deformación del equipo durante la etapa de tensión vertical (σ_v) y la etapa del ciclo térmico (ΔT).

En la Figura 5.1 se presenta la trayectoria de tensiones y cambios de temperatura realizados durante el ensayo de calibración.

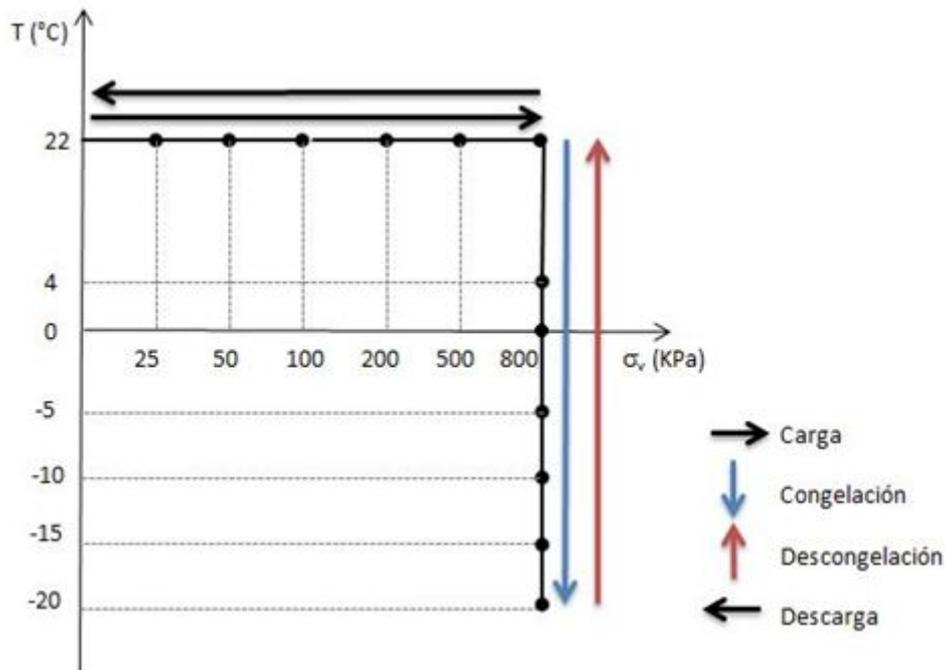


Figura 5.1 Trayectoria de carga, ciclo de temperatura y descarga ensayo de calibración.

5.1.1.1 Efecto de la tensión vertical (σ'_v)

En la etapa de aplicación de la tensión vertical (temperatura constante) por escalones de carga (25 → 50 → 100 → 200 → 500 → 800 KPa) se obtuvieron los gráficos de deformación del equipo con el tiempo ($\Delta H - t$). A continuación, mediante estos se graficó la deformación del equipo con la tensión vertical ($-\Delta H/H_0$ vs. σ'_v) que se presenta en la Figura 5.2.

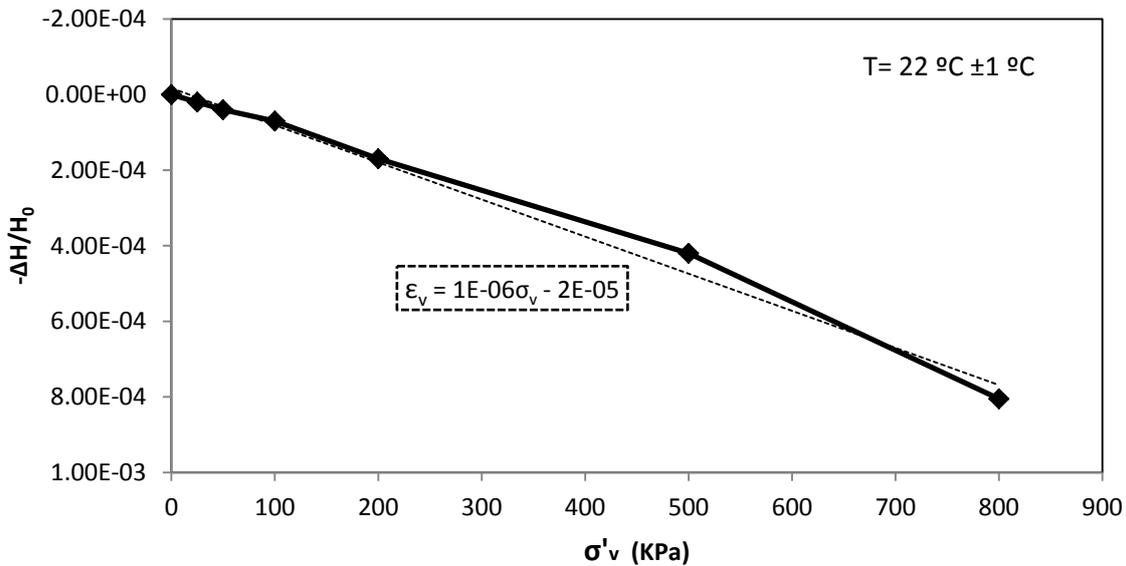


Figura 5.2 Deformación –tensión vertical del equipo hasta 800KPa.

De la deformación del equipo con la tensión vertical presentada en la Figura 5.2 se obtuvo una recta de regresión lineal (ecuación 5.1) definida por la pendiente que posteriormente se utiliza en la corrección de la etapa de consolidación en los ensayos de toba y puzolana.

$$\epsilon_v = 1 \cdot 10^{-6} \sigma_v - 2 \cdot 10^{-5} \quad (5.1)$$

5.1.1.2 Efecto de la temperatura

En la etapa de variación de la temperatura (tensión constante) por medio de incrementos (22 ↔ 4 ↔ 0 ↔ -5 ↔ -10 ↔ -15 ↔ -20 °C) se registró la deformación del equipo respecto al tiempo, tanto en la bajada como en la subida de temperatura. A partir de estos valores se realizó un gráfico de deformación del equipo por temperatura (Figura 5.3).

En dicho gráfico se observan 3 patrones de evolución de la deformación y, para cada uno de éstos se calculó su respectiva recta de regresión.

La primera de estas tendencias se produce en el cambio de temperatura para $T \geq 0^\circ\text{C}$ y está definida por la recta de regresión (ecuación 5.2) con una pendiente $(\Delta\epsilon_v/\Delta T) = -2.17 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

$$\epsilon_v = -2.17 \cdot 10^{-4} T + 4.75 \cdot 10^{-3} \quad (5.2)$$

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

La siguiente tendencia se produce en el cambio de temperatura para $-5 < T < 0^{\circ}\text{C}$ y está definida por la recta de regresión (Ecuación 5.3) con una pendiente $(\Delta\varepsilon_v/\Delta T) = -1.58 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Esta deformación de un orden mayor ha sido asociada a una recta de regresión que se presenta en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_v = -1.58 \cdot 10^{-4} T + 4.86 \cdot 10^{-3} \quad (5.3)$$

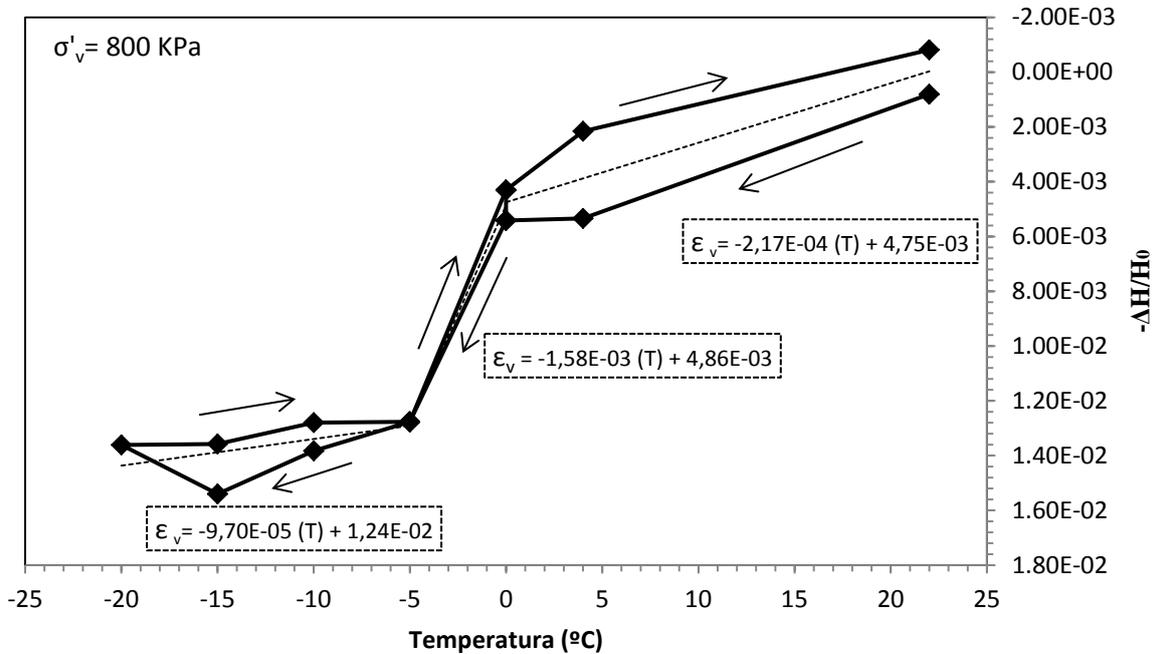


Figura 5.3 Deformación por temperatura del equipo a tensión constante (800KPa).

Finalmente, la tercera de las tendencias para $T \leq -5^{\circ}\text{C}$ que está definida por la recta de la ecuación 5.4 tiene una deformación volumétrica con la temperatura del orden de $-9.70 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Esta es de las tres, la menor en magnitud y no se asocia a procesos externos al equipo.

$$\varepsilon_v = -9.70 \cdot 10^{-5} T + 1.24 \cdot 10^{-2} \quad (5.4)$$

Todas las rectas de regresión anteriormente presentadas serán utilizadas en la corrección de los resultados en el correspondiente intervalo de temperaturas dentro de la fase térmica, tanto en los ensayos de toba como de la puzolana.

5.1.2 Puzolana

En la Figura 5.4 (a) y (b) se muestran las trayectorias de carga, ciclos de temperatura y descarga de los ensayos edométricos a baja temperatura para las muestras P200-20 y P500-20 cargadas hasta una tensión vertical efectiva ($\sigma_v - u_w$) de 200 y 500 KPa respectivamente. Posteriormente manteniendo estas tensiones constantes se aplicó un ciclo de temperatura de $22^\circ \leftrightarrow -20^\circ \text{C}$. Este ciclo se realizó mediante ajustes de temperatura de al menos 6 horas entre ellos y según las temperaturas de la Figura 5.4; excepto que al llegar a -20°C se mantuvo por 48 horas sin cambios y luego se procedió con la subida escalonada hasta 22°C . Una vez finalizado el ciclo térmico se realizó la descarga.

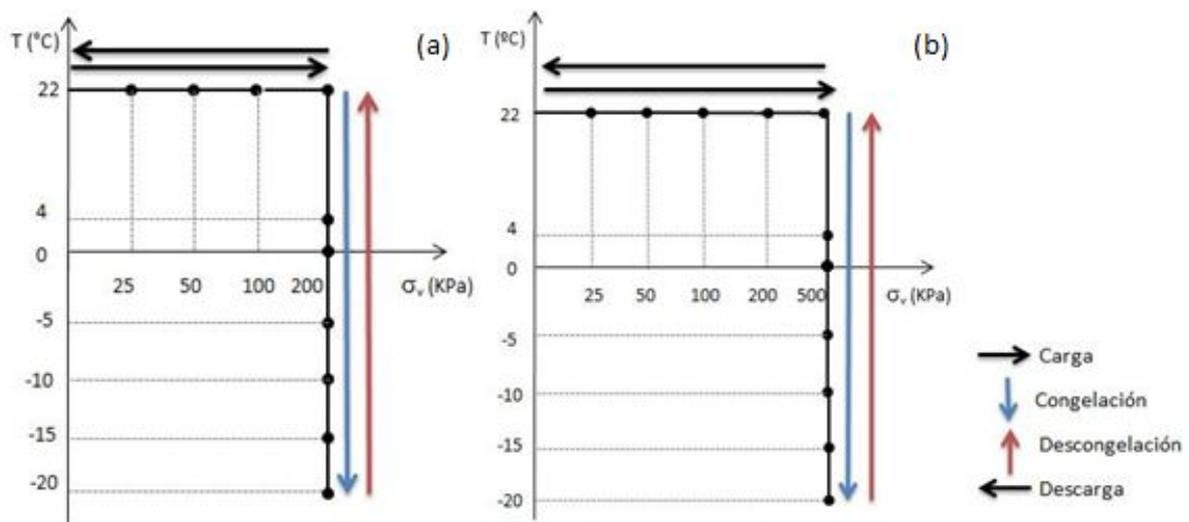


Figura 5.4 Trayectorias de ensayos en puzolana. (a) Ensayo en muestra P200-20; (b) ensayo en muestra P500-20.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se presentan las curvas edométricas resultantes de los ensayos en las muestra P200-20 y P500-20, respectivamente. Mediante una construcción geométrica en la figura 5.6 se estima el valor de la presión de preconsolidación de el material de ensayo en un valor de $p'_c = 200 \text{ KPa}$. En la Figura 5.5 no se determino el valor de la presión preconsolidación por considerarse que la carga máxima aplicada en este ensayo es inferior a este valor y por lo tanto hacen falta puntos para realizar la construcción geométrica.

En estas se observa una variación considerable de la relación de vacíos (Δe) tras la aplicación del ciclo térmico de 0.027 para la muestra P200-20 y 0.022 en la muestra P500-20.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

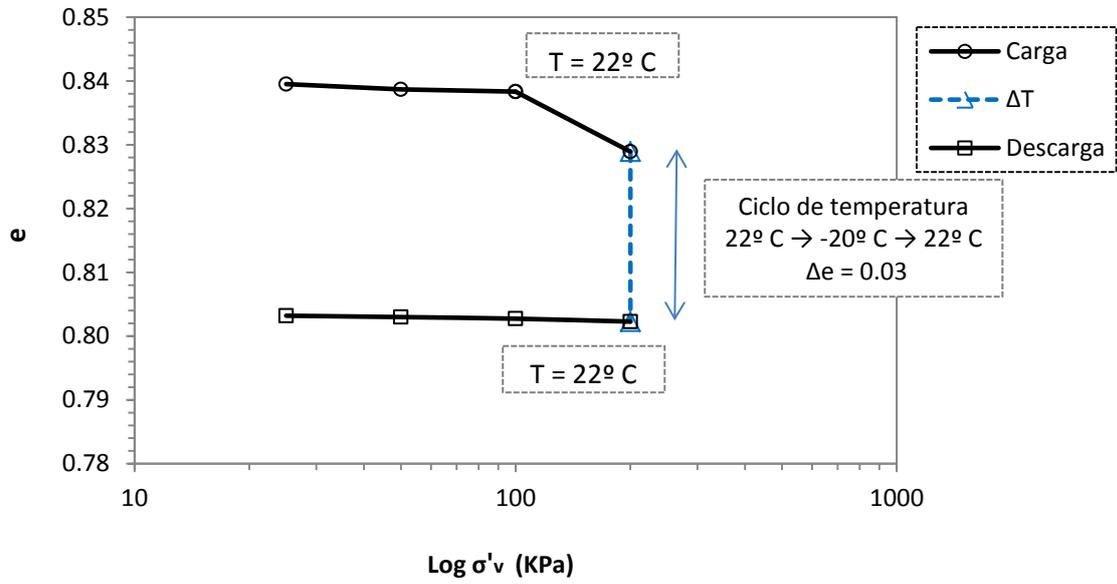


Figura 5.5 Curva edométrica muestra P200-20.

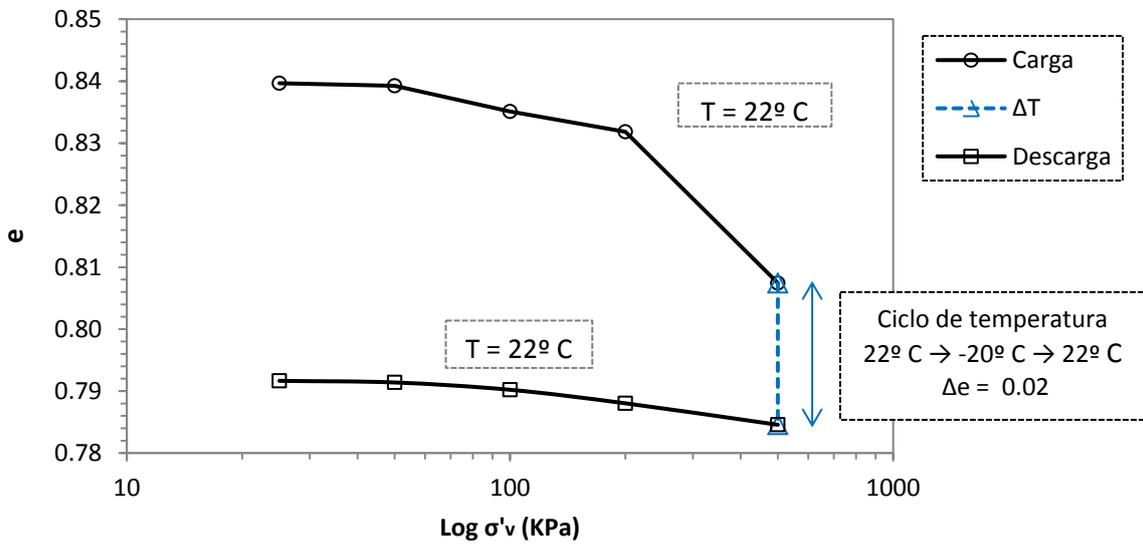


Figura 5.6 Curva edométrica muestra P500-20.

5.1.2.1 Efecto de la tensión vertical (σ'_v)

En las Figuras 5.7 y 5.8 se presenta el efecto de la tensión efectiva vertical (σ_{v-u_w}) en las muestras de puzolana P200-20 y P500-20. En la muestra P200-20 con una deformación volumétrica del 0.58% ($\Delta e = 0.01$) de la muestra a una tensión efectiva de 200 KPa; mientras que para la muestra P500-20 se alcanza una deformación volumétrica del 1.72 % a los 500 KPa de tensión efectiva vertical, correspondiente a un $\Delta e = 0.03$.

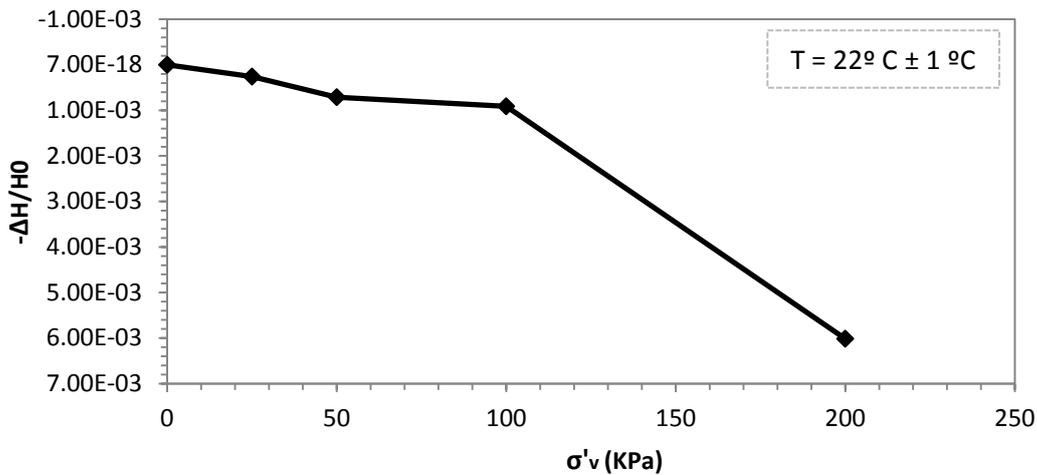


Figura 5.7 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra P200-20.

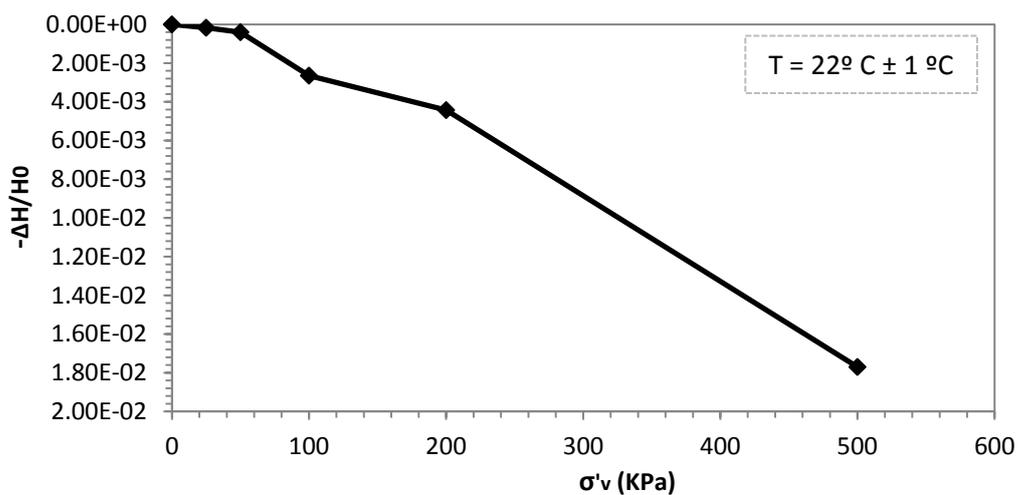


Figura 5.8 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra P500-20.

5.1.2.2 Efecto de la temperatura

En las Figuras 5.9 y 5.10 se presenta el efecto del ciclo no isotérmico que se aplicó a tensión (σ'_v) constante de 200 y 500 KPa sobre las muestras P200-20 y P500-20 respectivamente. En dichos ciclos se observa que ambas muestras siguen una misma tendencia del cambio de volumen con la variación de temperatura.

En la primera fase de bajada de temperatura entre 22^o→4^o C se observa una contracción de la muestras del orden de $1.07 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (P200-20) y de $9.06 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (P500-20).

En una segunda fase entre 4^o → 0^oC se comportan bastante similar, con una pequeña tendencia dilatante de $-7.50 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en P200-20 y de $-1.50 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ P500-20, asociada a la posible formación de hielo a 0 ^oC.

En una tercera fase comprendida de 0^o → -20^oC se produce para ambas un comportamiento dilatante (hinchamiento) asociado al cambio de volumen del agua con la congelación lenta. Durante esta etapa la muestra P200-20 se expande a razón de $-1.03 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y en la muestra P500-20 de $-1.30 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Durante esta fase se observa que la tendencia dilatante es inversamente proporcional a la tensión vertical efectiva a la que está sometido el material durante el ciclo no isoterma, con un orden de magnitud mayor en la muestra P200-20.

En una cuarta fase entre -20^o → -5^oC se observa que aunque se ha comenzado a subir la temperatura, el material continua aumentado en volumen pero en un orden de magnitud menor a la etapa anterior, donde para P200-20 cambia a razón de $-1.33 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y en P500-20 con pendiente de $-1.13 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Finalmente en la última fase entre -5^o →22^oC ambos materiales contraen con pendientes de $6.52 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en P200-20 y $1.11 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en P500-20.

Cuando se terminó el ciclo térmico ambas muestras experimentaron una reducción en su relación de vacíos $\Delta e \approx 0.03$.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

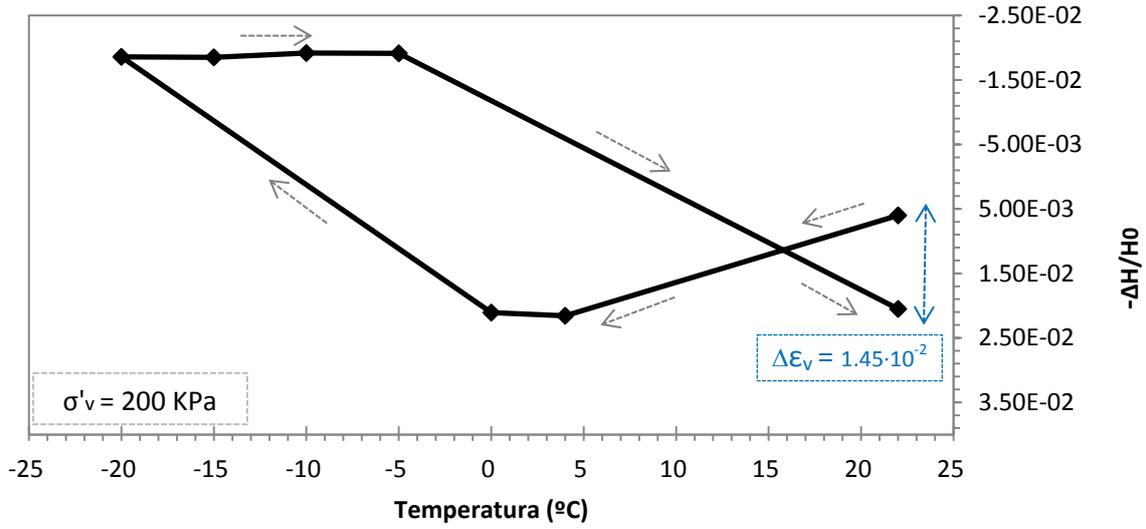


Figura 5.9 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra P200-20 a tensión constante 200 KPa.

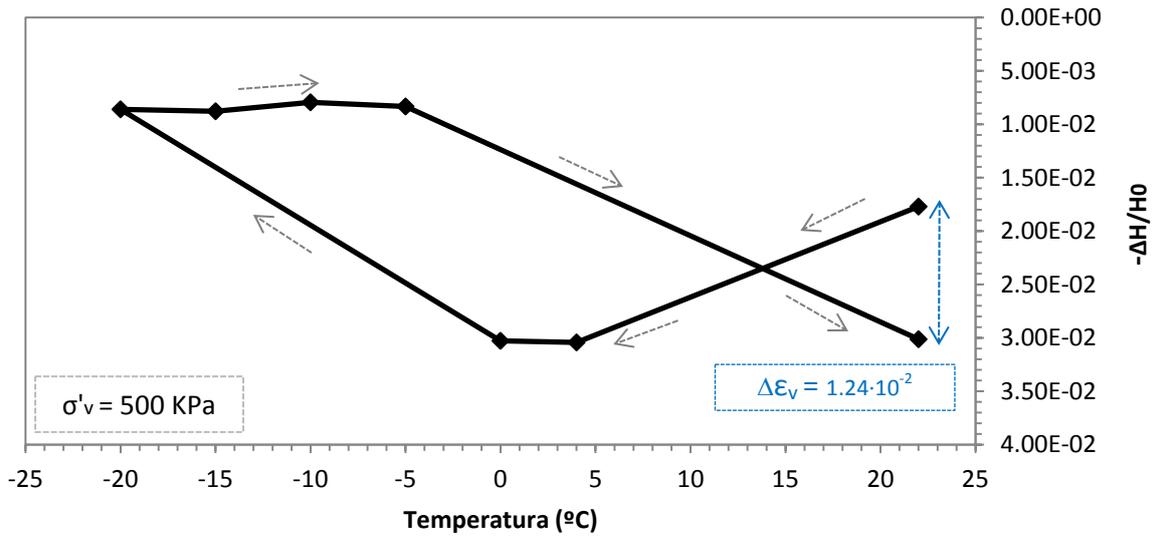


Figura 5.10 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra P500-20 a tensión constante 500 KPa.

5.1.3 Toba

En la figura 5.11 (a) y (b) se muestran las trayectorias de carga, ciclos de temperatura y descarga de los ensayos edométricos a baja temperatura para las muestras T500-20 y T800-20 cargadas hasta una tensión vertical efectiva ($\sigma_v - u_w$) de 500 y 800 KPa respectivamente. Posteriormente manteniendo estas tensiones constantes se aplicó un ciclo de temperatura de $22^\circ \leftrightarrow -20^\circ$ C. Este ciclo se realizó mediante ajustes de temperatura de al menos 6 horas entre ellos y según las temperaturas de la Figura 5.11; excepto que al llegar a -20° C se mantuvo por 48 horas sin cambios y luego se procedió con la subida escalonada hasta 22° C. Una vez finalizado el ciclo térmico se realizó la descarga.

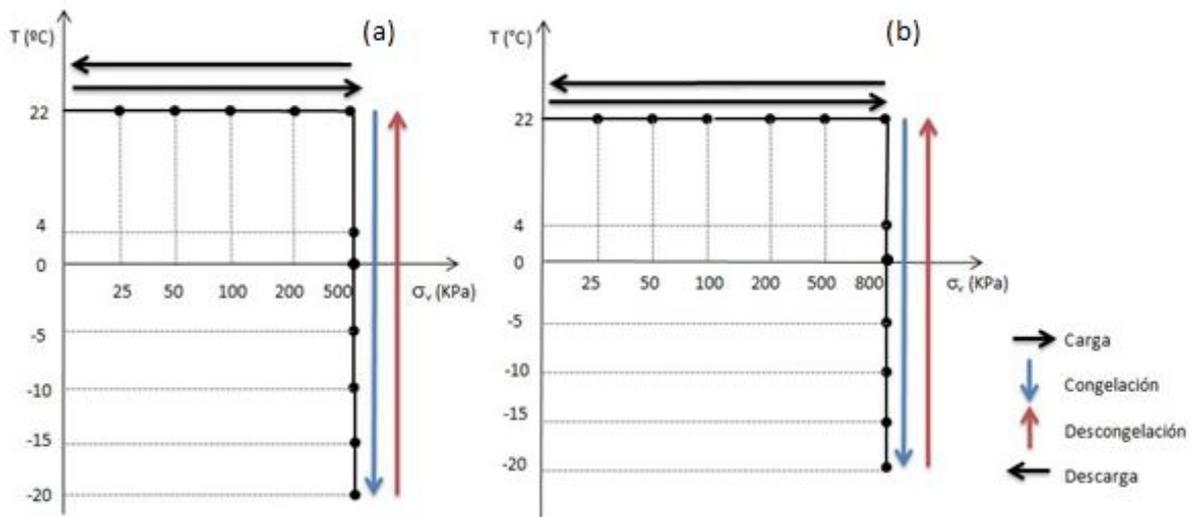


Figura 5.11 Trayectorias de carga, ciclo de temperatura y descarga en ensayos de puzolana. (a)Ensayo muestra T500-20; (b) ensayo muestra T800-20.

En las Figuras 5.12 y 5.13 se presentan las curvas edométricas resultantes de los ensayos en las muestra T500-20 y T800-20, respectivamente. En la toba no se determino el valor de la presión preconsolidación por considerarse que la carga máxima aplicada en este ensayo es inferior a este valor.

En estas se observa una variación de la relación de vacios tras la aplicación del ciclo térmico de Δe 0.012 para la muestra T500-20 y $\Delta e = 0.009$ en la muestra T800-20.

**Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo**

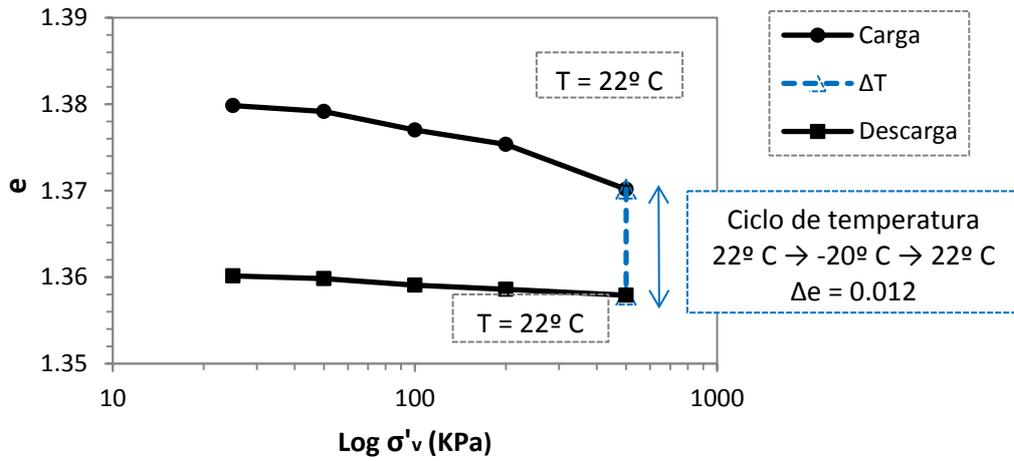


Figura 5.12 Curva edométrica T500-20.

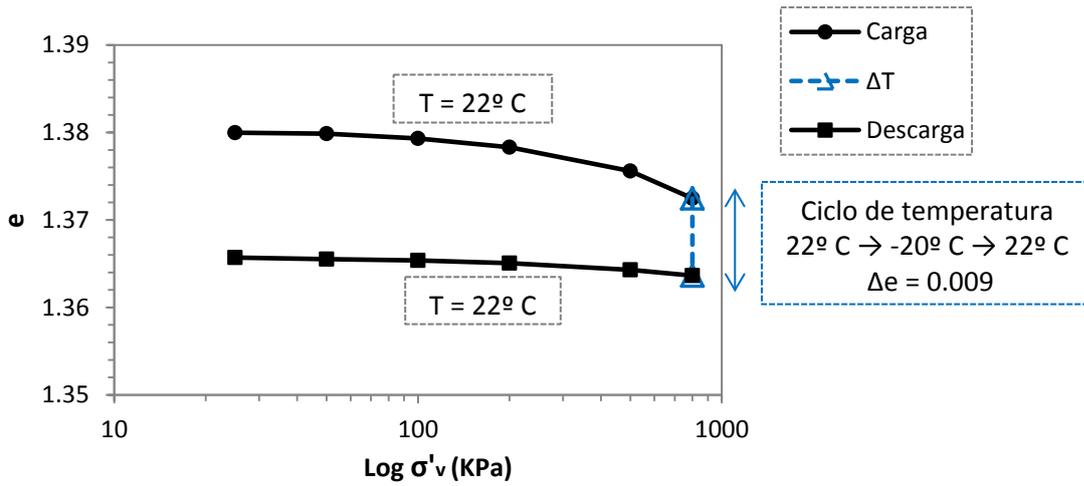


Figura 5.13 Curva edométrica T800-20.

5.1.3.1 Efecto de la tensión vertical (σ'_v)

En las Figuras 5.14 y 5.15 se presenta el efecto de la tensión efectiva vertical ($\sigma_v - u_w$) en las muestras de puzolana T500-20 y T800-20. En la muestra T500-20 con una deformación volumétrica del 0.40% de la muestra a una tensión efectiva de 500 KPa; mientras que para la muestra T800-20 se alcanza una deformación volumétrica del 0.33 % a los 800 KPa de tensión efectiva vertical. Este comportamiento distinto podría ser debido a rotura de partícula también si la tensión efectiva aplicada es baja para la roca blanda o debido a que es diferente el índice de vacíos inicial de la muestra..

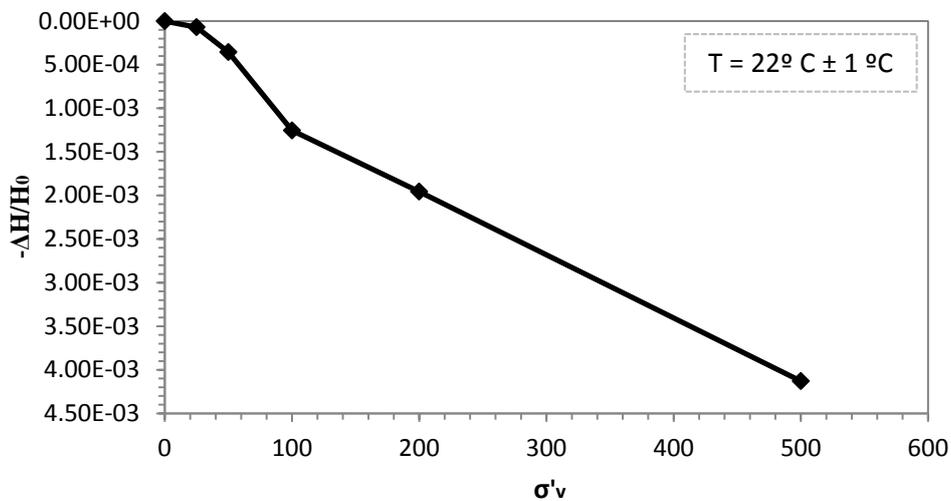


Figura 5.14 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra T500-20.

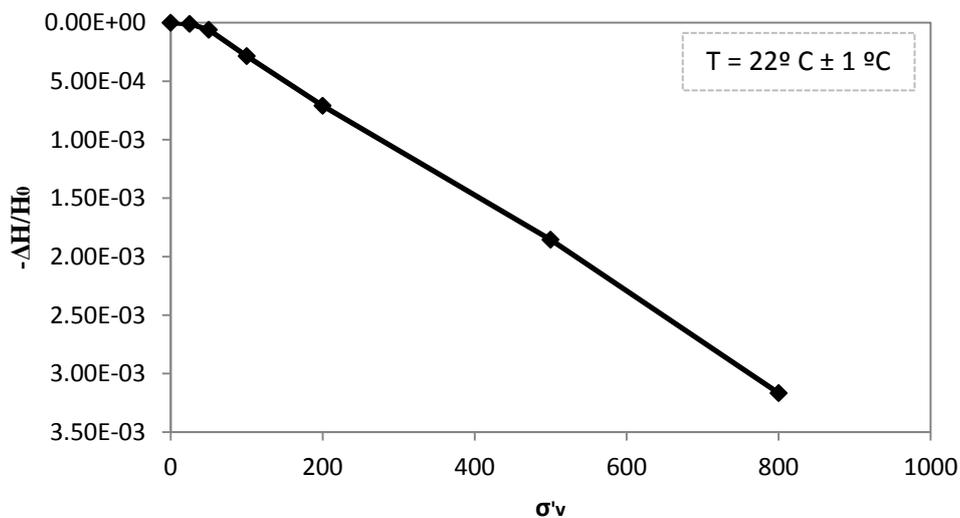


Figura 5.15 Deformación volumétrica con la tensión vertical efectiva en la muestra T800-20.

5.1.3.2 Efecto de la temperatura

En las Figuras 5.16 y 5.17 se representan los cambios volumétricos a tensión constante de las muestras T500-20 y T800-20 respectivamente durante el ciclo no isoterma. Se observa que en ambas se tiene un comportamiento contractante en la primera fase de este ciclo (22°→4° C), seguido por un comportamiento dilatante en todo el resto de la fase de bajada de temperatura (4°→-20°C) y la posterior contracción en la fase de subida de temperatura (-20°→22°C). Al final del ciclo térmico en ambas muestras se notó una reducción de su relación de vacíos.

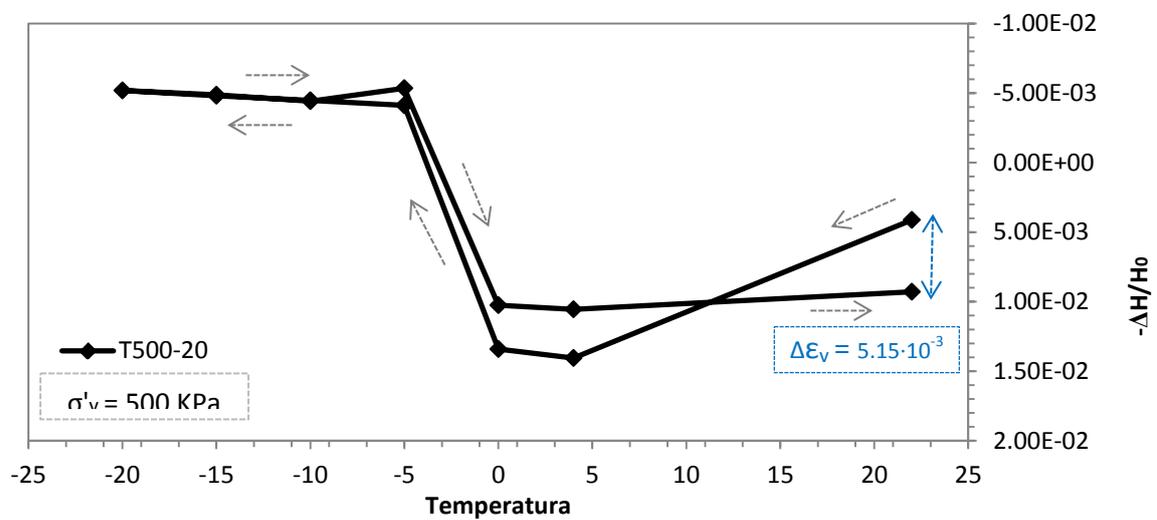


Figura 5.16 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra T500-20 a tensión constante 500 KPa.

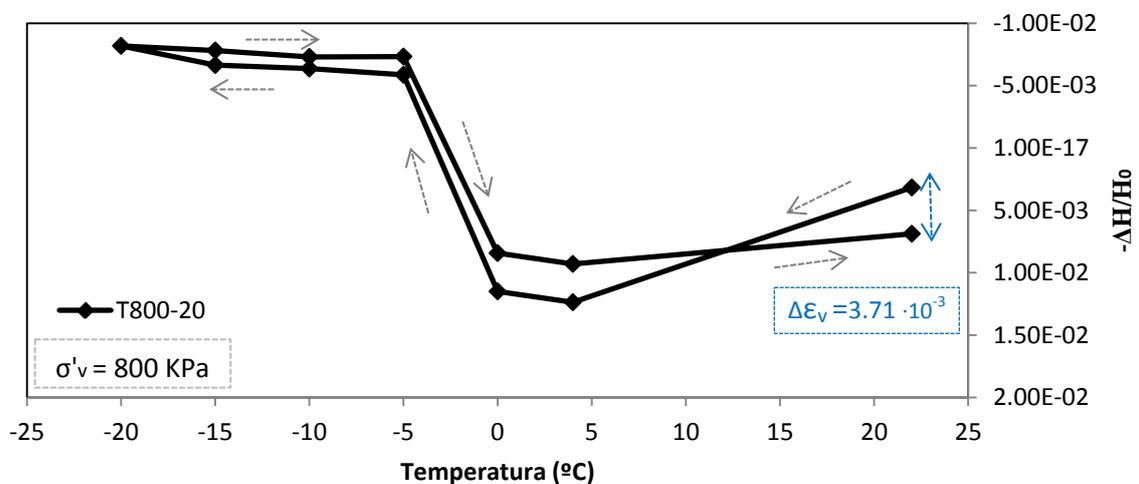


Figura 5.17 Efecto del ciclo de temperatura en la muestra T800-20 a tensión constante 800 KPa.

5.1.4 Comparación del efecto suelo

En la Figura 5.18 se presenta una la deformación volumétrica para una misma tensión efectiva vertical de 500 KPa en las muestras de toba T500-20 y puzolana P500-20, donde se observan diferencias de una orden de magnitud mayor en la puzolana.

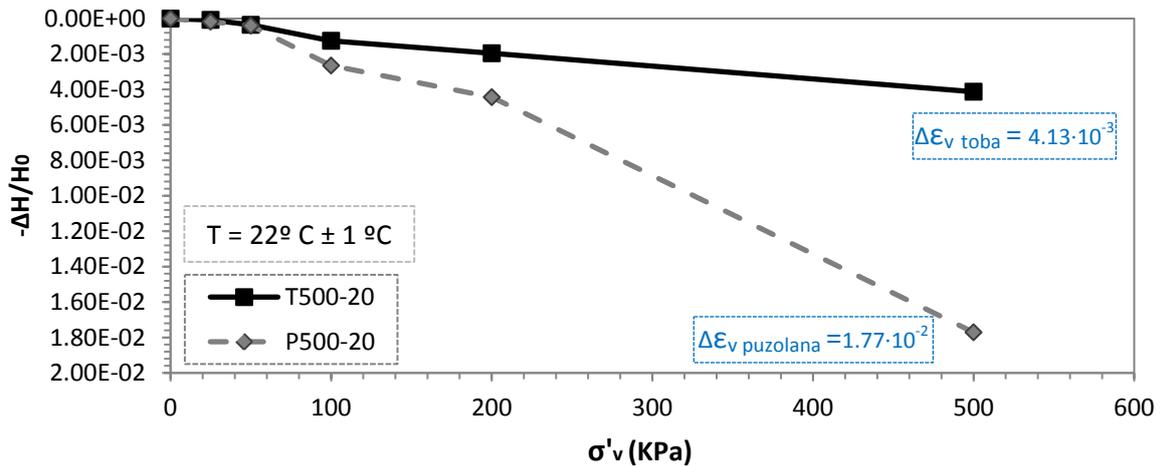


Figura 5.18 Comparación de la deformación volumétrica con la tensión efectiva vertical hasta $\sigma'_v = 500$ (KPa) entre las muestras P500-20 y T500-20.

En la Figura 5.19 se presenta la deformación volumétrica para una tensión de 500 KPa de las muestras de toba T500-20 y de puzolana P500-20 durante el ciclo de temperatura de dichos ensayos, observándose un comportamiento similar en ambos materiales que culmina en una contracción de la relación de vacíos de un orden magnitud mayor para la puzolana.

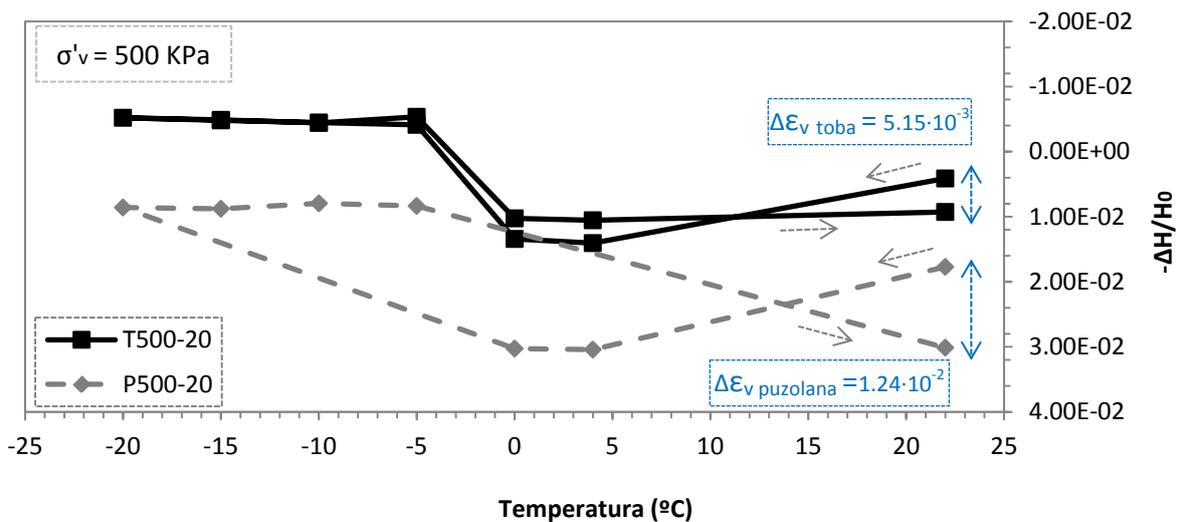


Figura 5.19 Ciclo de congelación / descongelación de las muestras P500-20 y T500-20.

5.2 POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO

Como técnica complementaria a los ensayos edométricos a baja temperatura se utilizó la porosimetría por intrusión de mercurio, con la finalidad de evaluar de la microestructura de los materiales en su estado natural y la evolución de esta tras la realización de los ensayos edométricos a baja temperatura.

5.2.1 Puzolana

Las Figuras 5.20 y 5.21 presentan la intrusión de mercurio sobre muestras de puzolana después de realizar los ensayos de congelación/descongelación a las dos tensiones investigadas, y después de someter a secado por 'freeze-drying'. La Figura 5.20 indica el grado de saturación de mercurio (S_{rnw}) durante la intrusión en términos del tamaño de poros. La Figura 5.21 presenta la misma distribución acumulada, pero expresada en términos del índice de poros intruido durante la inyección de mercurio. Tal como se observa, las muestras presentan una distribución acumulada bastante similar. La Figura 5.22 estudia la función de densidad de tamaño de poros, que se obtiene por las diferencias entre dos puntos de intrusión consecutivos. La función de densidad presenta mucho ruido, posiblemente afectado por compresión esquelética y rotura de partículas antes de la intrusión de mercurio (esto se ha detectado, ya que se ha intruido sistemáticamente más volumen de poros que el determinado macroscópicamente). La función densidad permite evidenciar dos niveles de poros, uno dominante hacia $1 \mu\text{m}$ correspondiente a un concepto inter-partícula, y otro dominante a un tamaño de 10 nm , más característico de intra-partícula. Lo que es importante resaltar es que el material presenta una doble estructura que indudablemente tiene consecuencias en el comportamiento de cambio de volumen durante un proceso de congelación y descongelación.

*Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo*

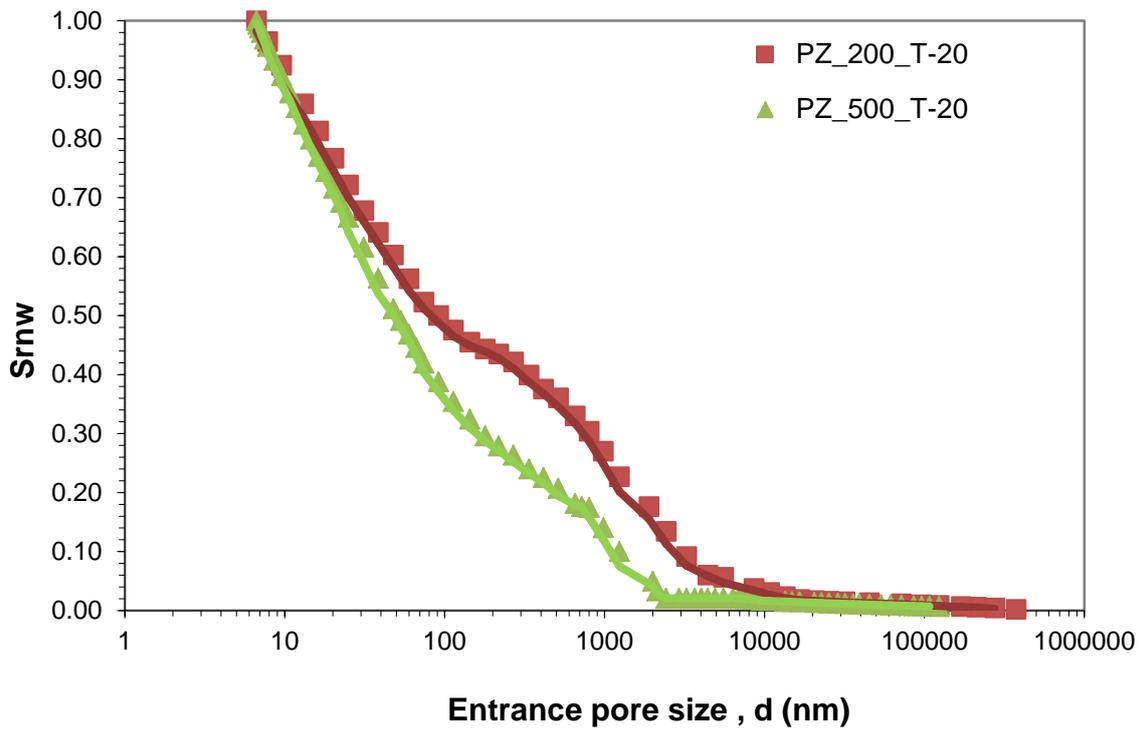


Figura 5.20 Grado de saturación de mercurio (S_{rnw}) durante la intrusión en términos del tamaño de poros (nm).

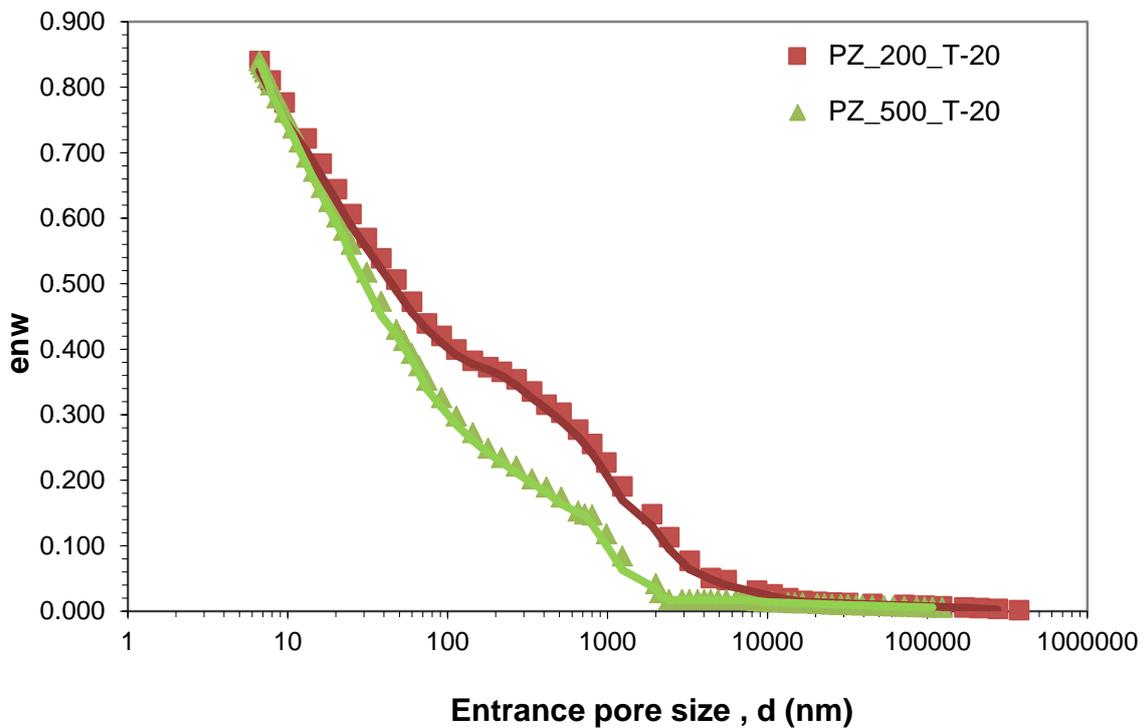


Figura 5.21 Distribución acumulada expresada en términos del índice de poros intruido.

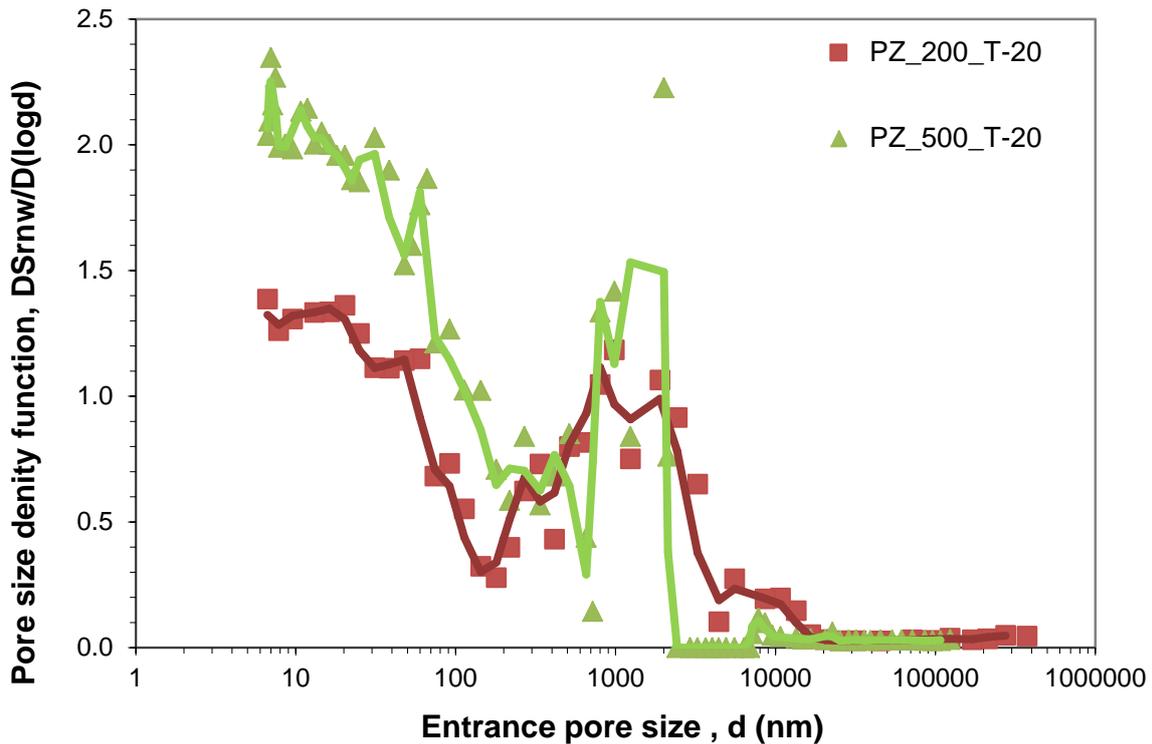


Figura 5.22 Función de densidad de tamaño de poros.

5.2.2 Toba

La Figura 5.23 muestra las curvas de intrusión acumuladas de tres muestras de toba en términos del tamaño de poros. Las muestras ensayadas (después de someter a secado mediante 'freeze-drying') son en estado natural, después de congelación/descongelación hasta -10°C , y después de congelación/descongelación a -20°C . Tal como se observa, la muestra natural es bastante similar a la sometida -10°C , mientras que el comportamiento de las muestras a -20°C difiere notablemente. La Figura 5.24 representa la misma distribución acumulada, pero en términos del índice de poros intruido. Tal como se indicó anteriormente, no hay mucha diferencia entre el volumen intruido de la natural y la muestra a -10°C . Sin embargo, ya se nota cierta tendencia a disminuir la macroporosidad (poros grandes). Esta tendencia se confirma con la distribución acumulada a -20°C , donde claramente la macroporosidad sigue disminuyendo.

La función de densidad de tamaño de poros se muestra en la Figura 5.25 Tanto la muestra natural como la de -10°C presentan una clara distribucional bimodal con tamaños de poros dominantes a $10\ \mu\text{m}$ correspondiente a un concepto inter-particular, y otro a $30\ \text{nm}$, más característico de intra-partícula. Se observa, sin embargo, cierta tendencia a reducir el volumen correspondiente a la macroporosidad. En la muestra sometida a -20°C , el volumen de macroporos ha disminuido considerablemente, aunque mantiene un pico dominante. Sin

embargo, es bueno aclarar que estos son resultados preliminares, que sería bueno constatar mediante futuros ensayos.

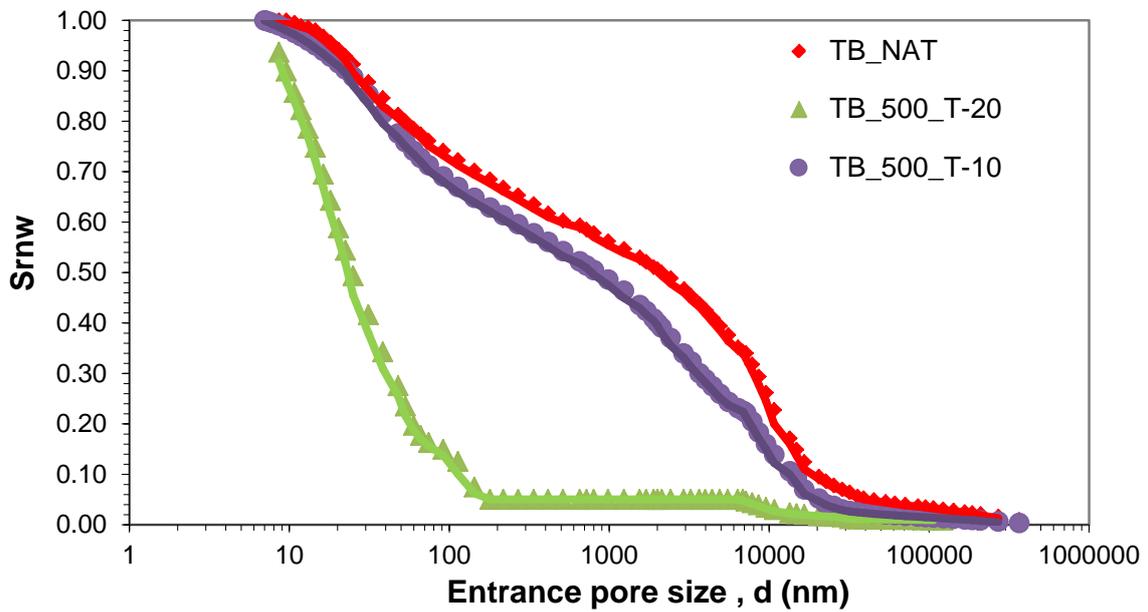


Figura 5.23 Grado de saturación de mercurio (S_{rnw}) durante la intrusión en términos del tamaño de poros (nm).

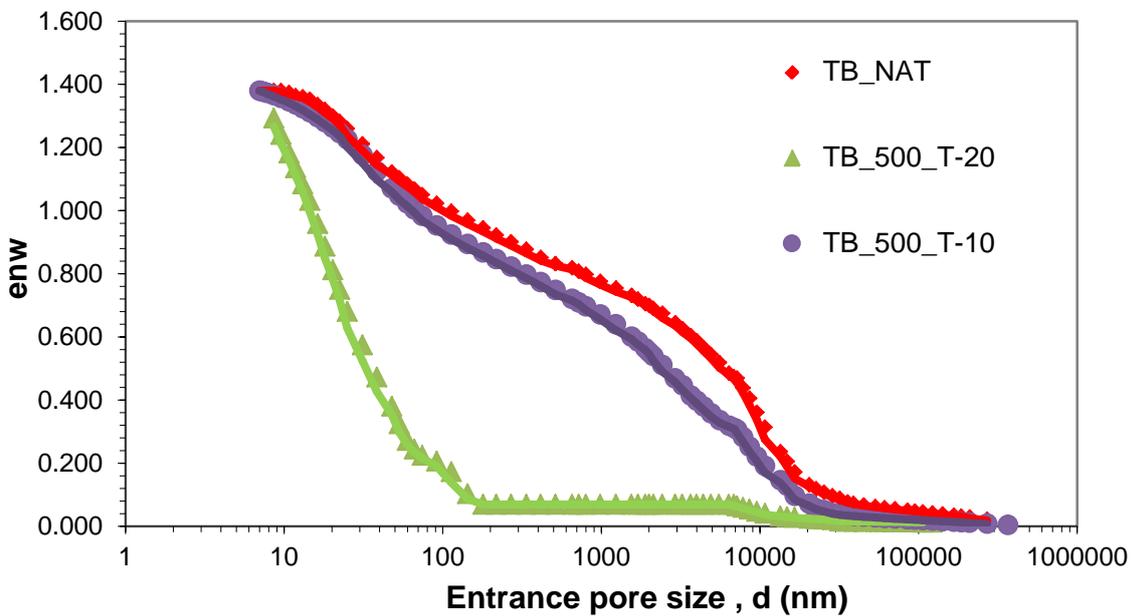


Figura 5.24 Distribución acumulada expresada en términos del índice de poros intruido.

*Congelación Artificial De Dos Suelos Naturales
Un Enfoque Experimental Con Desarrollo De Equipo*

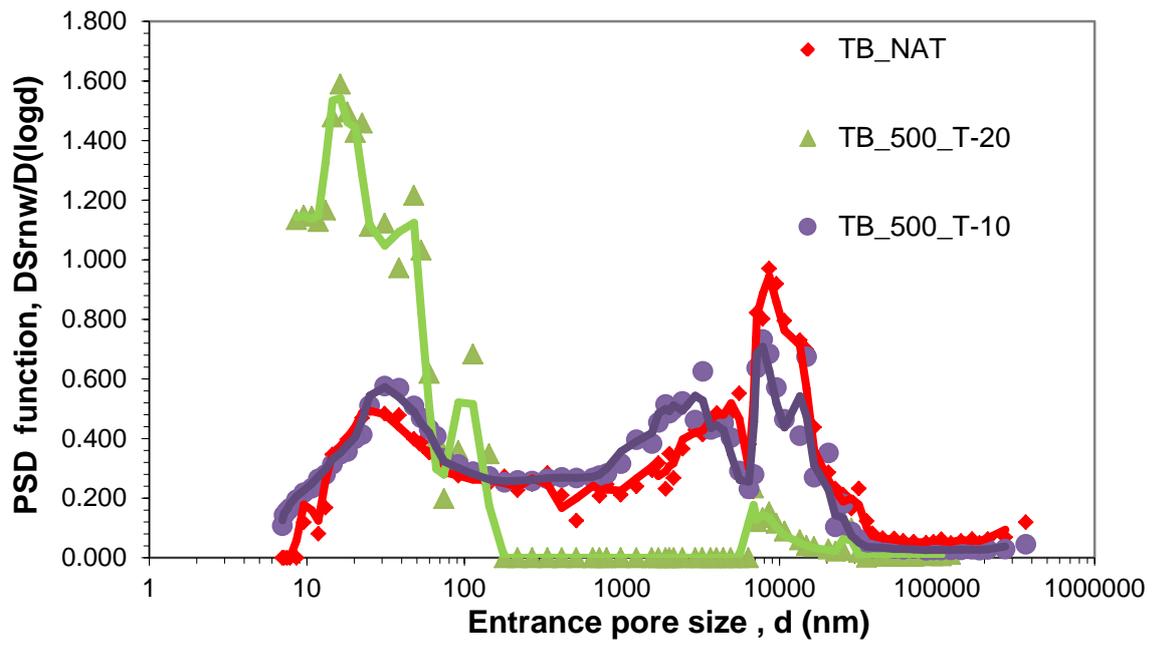


Figura 5.25 Función de densidad de tamaño de poros.

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

6.1.1 Revisión bibliográfica

Antes de comenzar con el desarrollo experimental, se hizo una revisión extensiva de la bibliografía relacionada con el caso práctico que dio origen a la tesina.

6.1.2 Equipo experimental desarrollado

En esta tesina se ha desarrollado, calibrado y utilizado un equipo edométrico para realizar congelación artificial bajo tensión vertical constante en dos suelos naturales. Esta parte de la investigación ha requerido un tiempo considerable (5 meses), dado que el Laboratorio no había trabajado anteriormente sobre estos aspectos. Las dificultades experimentales han estado principalmente asociadas a la estabilidad de la temperatura del laboratorio (más crítica a temperaturas bajas del suelo) y la formación de hielo en el punto de contacto entre el eje del pistón y el sistema LVDT de medida de desplazamiento. Los trabajos de desarrollo del equipo han incluido las siguientes etapas: a) puesta a punto del equipo de congelación; b) aislamiento del equipo de congelación para minimizar efecto ambiental; c) adaptación del equipo de congelación para utilizar dos células; d) implementación de una barra de soporte para los LVDT en el equipo refrigerador; e) construcción de un panel de interfaz para pasar conexiones eléctricas y cables de presión; f) instalación de termopares cerca del suelo y en el líquido refrigerante; g) cambio del eje del pistón de carga y casquillo guía por uno plástico de menor conductividad térmica pero con adecuada rigidez (esto evita la congelación del punto de contacto); h) instalación de una cámara de desecado para aplicación de aire seco para la tensión vertical (el aire húmedo durante la congelación inducía la formación de hielo); i) adaptación del sistema hidráulico de presión de cola, para permitir la congelación del fluido sin afectar a las componentes mecánicas del equipo.

6.1.3 Ensayo de calibración

La calibración del equipo durante los ciclos térmicos ha sido fundamental para interpretar la respuesta del suelo. El equipo dilata y contrae durante estos procesos, y hay que corregir esta componente de desplazamiento de la medida global que reporta el LVDT.

6.1.4 Caracterización geotécnica

Los suelos utilizados en esta investigación se corresponden a los de perfil estratigráfico de Nápoles en una de las estaciones donde se aplicó la técnica de la congelación. Los dos tipos de suelo utilizado son: la puzolana no cementada, que consiste casi completamente de depósitos de cenizas de erupciones volcánicas y por debajo de esta a unos 20 metros se encuentra la toba, un roca volcánica cementada y blanda. Ambos materiales fueron

extraídos y posteriormente caracterizado en su estado inalterado. Los resultados obtenidos de la caracterización son comparables con los obtenidos por otros autores en estudios previos.

6.1.5 Ensayos edométricos con ciclo de congelación / descongelación

Los ensayos realizados seguían trayectorias similares al proceso de ejecución in situ. Primero se cargaba la muestra hasta un nivel tensional equivalente a condiciones in situ, y después se sometía a congelación / descongelación controlada. Los dos materiales se investigaron a dos tensiones diferentes.

Los ensayos de compresión sobre el material saturado (toba y puzolana) indicaron que la puzolana era más compresible. Para un mismo valor de la tensión tuvo una deformación volumétrica 4.29 veces mayor que la toba.

Durante los ciclos de congelación / descongelación se detectaron diferentes etapas de deformación de la muestra. Entre temperatura ambiental y 4°C la muestra contrajo. Entre 4°C y 0°C la deformación aproximadamente se estabilizó debido a la competencia entre la contracción térmica y la formación de hielo. Entre 0°C y -20°C domina el hinchamiento debido a la formación del hielo. En el caso de la toba con más puntos, se identificó una expansión más notoria entre 0°C y -5°C, posiblemente asociada a la entrada de hielo (el hielo domina sobre el agua líquida). Durante el proceso de descongelación, la primera etapa entre -20°C y -5°C el suelo permanece aproximadamente a volumen constante. En el caso de la toba, parece que el valor de entrada de agua líquida (agua líquida es dominante sobre hielo) coincide con el del hielo, concentrándose la deformación entre -5°C y 0°C. En el caso de la puzolana (con menos puntos experimentales), se detecta histéresis entre los valores de entrada de hielo y de entrada de agua líquida. Durante la parte final de la descongelación, la deformación se estabiliza e incluso sigue contrayendo, posiblemente asociado a cierta degradación de las propiedades de deformación del material. En los dos casos, el material acumula deformación de compresión al finalizar el ciclo térmico. En el caso de la puzolana, esta acumulación de compresión corresponde a una deformación volumétrica de $\Delta\varepsilon_v = 1.24 \cdot 10^{-2}$, que es un orden de magnitud mayor que la de la toba con un valor de $\Delta\varepsilon_v = 5.15 \cdot 10^{-3}$ para la misma tensión vertical (500KPa).

6.1.6 Porosimetría por intrusión de mercurio

En lo referente a la caracterización microestructural realizada sobre cada material en su estado intacto y posterior al ciclo de congelación / descongelación se percibe en ambos materiales una distribución de tamaño de poros bimodal con un tamaño de poros dominante. No obstante esto, en la toba se observa una reducción de su macroporosidad entre su estado no alterado y el posterior al ciclo de temperatura, mientras que en la puzolana los resultados de la función de densidad presenta mucho ruido, posiblemente afectado por compresión esquelética y rotura de partículas antes de la intrusión de mercurio

(esto se ha detectado, ya que se ha intruido sistemáticamente más volumen de poros que el determinado macroscópicamente). Lo que es importante resaltar es que el material presenta una doble estructura que indudablemente tiene consecuencias en el comportamiento de cambio de volumen durante un proceso de congelación y descongelación y consideramos necesaria la realización de más ensayos de este tipo a fin de entender lo que ocurre este material tras el ciclo de congelación / descongelación.

6.2 Futuras líneas de investigación.

Hacer ensayos de porosimetría del estado intacto a fin de entender mejor la posible inducción de degradación bajo ciclo de congelación / descongelación. Verificar si la entrada de aire adecuadamente afectada es cónsona con la entrada de hielo (non wetting).

Realización de ensayos a distintas trayectorias evaluando la influencia del tiempo en los procesos de congelación / descongelación.

Actualización del equipo desarrollado que permita lograr una configuración que incluya medición de la presión de líquido en contacto con hielo. Tomografía eléctrica para averiguar distribución de hielo y líquidos a diferente temperatura.

Modelar los comportamientos obtenidos en lo experimental con la finalidad de validar modelos capaces de predecir el comportamiento.

REFERENCIAS

- Casini F., Gens A., Olivella S., Viggiani G.M.B. (2013).** Coupled phenomena induced by freezing in a granular material.
- Colombo G., Lunardi P., Cavagna B., Cassani G., Manassero V. 2008.** The artificial ground freezing technique application for the Naples underground. In V.K. Kanjlia et al. (eds), *World Tunnel Congress 2008; Proc. Underground Facilities for Better Enviroment and Safety, Agra, 22–24 September 2008*. New Delhi: Central Board of Irrigation & Power.
- Gens A., (2010).** Soil–environment interactions in geotechnical engineering. *Géotechnique* 60, No. 1, 3–74
- Gens A.** Mejoras del Terreno [Apuntes de Asignatura Ingeniería Geotécnica]. *Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.*
- Manassero V., Di Salvo G., Giannelli F. (2008).** A combination of artificial ground freezing and grouting for the excavation of large size tunnel below groundwater. *6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008*
- Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine J. (2009).** THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Géotechnique* 59, No. 3, 159–171
- Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2010).** Analysis of artificial ground freezing in the Pari-Duomo platform tunnel of the Naples metro.
- Papakonstantinou S., Pimentel E., Anagnostou G. (2011).** Evaluation of ground freezing data from the Naples subway.
- Romero E., Simms P. (2011).** Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26: 93-115.
- Russo G., Viggiani C., Viggiani G.M.B. (2012).** Geotechnical design and construction issues for Lines 1 and 6 of the Naples Underground. *Geomechanik und Tunnelbau* 5(3): 300-311.