



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA DETERMINAR
DEFORMACIONES VOLUMÉTRICAS EN ARCILLAS FRENTE A
VARIACIONES TÉRMICAS”**

TESIS

PRESENTADA POR:

HIDEN JAIME MACHACA HUANCOLLO

PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

HIDEN J. MACHACA

A Dios por permitirme cumplir mis sueños, por perdonarme y protegerme siempre en el trajinar de mi vida.

A mis padres Evangelina Huancollo y Constancio Machaca por darme la vida y apoyarme constantemente. En especial mi amor y gratitud a mi madre que me educo en los valores del trabajo y la humildad, este grado se la dedico a ella por todo el esfuerzo.

A mi hermano Santos por su humilde apoyo incondicional, a mis hermanas Kely y Zaday por estar siempre a la vanguardia.

A mi amigo y educador Prof. Fernando Saboya por su amistad y asesoría constante en la investigación de la Ingeniería Civil.

A mis amigos(as) por sus mensajes de constante motivación.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a concluir mis estudios de pregrado.

A mi familia por su motivación y ánimo.

A la Universidad Nacional del Altiplano por ser la entidad que me formo en sus ambientes como profesional, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, y en especial a mi director de Tesis Dr. Samuel Huaquisto Cáceres quien, con toda su sapiencia, tolerancia y sabios consejos, estuvo predispuesto en todo momento para el asesoramiento y apoyo de la presente tesis. A los jurados por su tiempo, predisposición y consejos tan acertados, M.Sc. Mariano Roberto García Loayza, Ing. Tania Zapata Coacalla, Ing. Gleny Zoila De La Riva Tapia.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 12

ABSTRACT..... 13

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de la investigación..... 14

1.2 Antecedentes de la investigación 15

1.3 Formulación del problema 17

1.3.1 Problema general..... 17

1.3.2 Problemas específicos (PE)..... 17

1.4 Importancia y utilidad del estudio 17

1.5 Objetivos de la investigación 18

1.5.1 Objetivo general 18

1.5.2 Objetivos específicos (OE) 18

1.6 Hipótesis de la investigación..... 18

1.6.1 Hipótesis general..... 18

1.6.2 Hipótesis específicas (HE)..... 19

1.7 Organización del trabajo 19



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico	21
2.1.1 Generalidades	21
2.1.2 Influencia de la temperatura en arcillas	21
2.1.3 Influencia de la temperatura en la tensión de pre- consolidación ($\sigma'v$)	
32	
2.1.4 Modelos termo-mecánicos existentes	34
2.1.5 Influencia de la temperatura en la microestructura de las arcillas ...	43

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción	55
3.2 Materiales	55
3.2.1 Suelo.....	55
3.2.2 Equipo para la reconstitución de muestras.....	57
3.2.3 Triaxial convencional.....	59
3.2.4 Triaxial térmico.....	60
3.3 Metodología	63
3.3.1 Procedimiento para la reconstitución de muestras.....	63
3.3.2 Procedimiento estándar para ensayos de consolidación térmica a temperaturas superiores al ambiente (temperatura controlada).....	64

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Datos experimentales obtenidos en laboratorio	68
4.1.1 Clasificación del suelo	68



4.1.2	Parámetros de resistencia del suelo.....	74
4.1.3	Ensayos de consolidación térmica	82
4.2	Desarrollo de la formulación matemática	96
4.3	Validación del modelo	105
V.	CONCLUSIONES.....	116
VI.	RECOMENDACIONES	118
VII.	REFERENCIAS.....	119
ANEXOS.....		124

TEMA: Análisis numérico y experimental.

AREA: Geotecnia.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 08 DE JUNIO DEL 2022.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:	Comportamiento del volumen en la arcilla por la variación térmica.	22
Figura 2.2:	Efectos del incremento de la temperatura en una consolidación isotrópica de una arcilla saturada.	23
Figura 2.3:	Deformaciones volumétricas térmicas resultantes sobre etapas de carga y descarga térmicas.....	28
Figura 2.4:	Curvas de deformación volumétrica térmica a diferentes nivel de sobre-consolidación (OCR).	29
Figura 2.5:	Trayectorias de incremento de la tensión media efectiva y la temperatura en los ensayos de consolidación isotrópica.	30
Figura 2.6:	Curvas de consolidación isotrópica.	31
Figura 2.7:	Curvas de presión de poro normalizada inducida por temperatura.	32
Figura 2.8:	Relación entre la temperatura vs la tensión de pre-consolidación.....	33
Figura 2.9:	Relación entre la tensión de pre-consolidación con la temperatura.	34
Figura 2.10:	Diagrama de la superficie termo-elasto-plástico isotrópico.	35
Figura 2.11:	Diagrama tridimensional $p' \times q \times T$	36
Figura 2.12:	Diagrama termo elasto – plástica para arcillas saturadas.	37
Figura 2.13:	Dominio termo – elástico de los modelos en el plano ($p' \times T$).	41
Figura 2.14:	Ensayos de permeabilidad en arcilla Boom Clay a diferentes niveles de temperatura.	44
Figura 2.15:	Relaciones de flujo de tiempo vs agua inyectada en cada nivel de temperatura en dirección paralela al plano de estratificación.....	45
Figura 2.16:	Relaciones de flujo de tiempo vs agua inyectada en cada nivel de temperatura en dirección perpendicular al plano de estratificación.	45
Figura 2.17:	Relación de la conductividad hidráulica vs la temperatura en dirección paralela a la estratificación. Fuente: (Chen et al., 2017)	47
Figura 2.18:	Relación de la conductividad hidráulica vs la temperatura en dirección perpendicular a la estratificación. Fuente: (Chen et al., 2017).....	47
Figura 2.19:	Variación de la permeabilidad intrínseca respecto a la temperatura.	48
Figura 2.20:	Microestructura de la arcilla Boom Clay perpendicular al plano de estratificación. a) x500 b) x2000	49
Figura 2.21:	Microestructura de la arcilla Boom Clay paralelo al plano de estratificación. a) x500 b) x2000.....	49



Figura 2.22: Resonancia Magnética Nuclear en la arcilla Boom Clay.	50
Figura 2.23: Tipos de contacto en suelos.	52
Figura 3.1: Muestra recolectada por muestreadores tipo Shelby.	56
Figura 3.2: Extracción de las muestras de los tubos Shelby.	56
Figura 3.3: Muestra homogeneizada y guardada en un recipiente de tecnopor.	57
Figura 3.4: Equipo para la reconstitución de muestras.	58
Figura 3.5: Vista al interior del equipo de reconstitución.	58
Figura 3.6: Molde bipartido para la reconstitución de muestras.	59
Figura 3.7: Equipo triaxial convencional.	59
Figura 3.8: Bombas de control de presión en el equipo triaxial.	60
Figura 3.9: Partes principales de un triaxial térmico.	61
Figura 3.10: Cobertor de aislamiento térmico del triaxial térmico.	61
Figura 3.11: Celda térmica triaxial.	62
Figura 3.12: Equipo de control de temperatura.	62
Figura 3.13: Equipo triaxial térmico con todas sus partes.	62
Figura 3.14: Muestra N°1.	64
Figura 3.15: Procedimiento estándar para ensayos de consolidación térmica a temperaturas superiores al ambiente (temperatura controlada).	65
Figura 3.16: Saturación del equipo triaxial.	66
Figura 3.17: Instalación de la celda triaxial térmica.	67
Figura 4.1: Curva del ensayo estándar limite líquido.	70
Figura 4.2: Ensayo de análisis granulométrico.	71
Figura 4.3: Proceso de instalación de las muestras en el equipo triaxial.	75
Figura 4.4: Recolección de datos en tiempo real del ensayo en el Software.	76
Figura 4.5: Curvas de deformación axial vs esfuerzo desviador.	79
Figura 4.6: Curvas de deformación axial vs incremento de la presión de poro.	80
Figura 4.7: Trayectorias de esfuerzos efectivos y totales de las muestras.	81
Figura 4.8: Índice de vacíos vs esfuerzo medio efectivo.	82
Figura 4.9: Curvas de consolidación mecánica y térmica del E6 en el software de control.	83
Figura 4.10: Procedimientos del ensayo de consolidación térmica.	84
Figura 4.11: Curvas de consolidación mecánica más térmica a 40°C.	88
Figura 4.12: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E6.	88



Figura 4.13: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E7.....	89
Figura 4.14: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E8.....	89
Figura 4.15: Curvas de consolidación mecánica más térmica a 55°C.....	92
Figura 4.16: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E9.....	93
Figura 4.17: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E10.....	94
Figura 4.18: Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E11.....	94
Figura 4.19: Diagrama de simulación para la consolidación térmica.....	97
Figura 4.20: Diagrama de curvas de consolidación térmica para diferentes niveles de temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 4.21: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 100kPa a 40°C.....	107
Figura 4.22: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 200kPa a 40°C.....	108
Figura 4.23: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 400kPa a 40°C.....	109
Figura 4.24: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 100kPa a 55°C.....	110
Figura 4.25: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 200kPa a 55°C.....	111
Figura 4.26: Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 400kPa a 55°C.....	112
Figura 4.27: Porcentaje de error de aproximación del modelo numérico.....	115



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Resumen de ecuaciones termo-mecánicas.	40
Tabla 2:	Variación de la viscosidad y la densidad del agua en los poros con la temperatura.	46
Tabla 3:	Tabla de control para la reconstitución de las muestras.	64
Tabla 4:	Contenido de humedad natural.	68
Tabla 5:	Resultados de los límites de consistencia.	69
Tabla 6:	Ensayo de gravedad específica de los sólidos (Gs).	72
Tabla 7:	Ensayo de consolidación edométrica.	73
Tabla 8:	Planilla de cálculo de las propiedades de los especímenes.	78
Tabla 9:	Planilla de cálculo de las propiedades de los ensayos E6, E7 y E8.	86
Tabla 10:	Planilla de cálculo de las propiedades físicas de los ensayos E9, E10 y E11.	91
Tabla 11:	Variación de la función M(T) en relación a la temperatura.	101
Tabla 12:	Resumen de los datos experimentales necesarios para ejecutar el modelo.	106
Tabla 13:	Calibración de $\epsilon_{vult.}$	106



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

E-050	: Norma técnica de suelos y cimentaciones del RNE del Perú.
RNE	: Reglamento Nacional de Edificaciones.
OC	: Suelo en estado sobre-consolidado.
NC	: Suelo en estado normalmente consolidado.
OCR	: Índice que indica el nivel de sobre-consolidación del suelo.
IP	: Índice de plasticidad de un suelo.
LL	: Limite liquido de un suelo.
LP	: Límite de plasticidad de un suelo.
Ca(To)	: Coeficiente de consolidación secundaria de un suelo.
Δe	: Variación del índice de vacíos de un suelo.
ϵ_{vult}	: Asíntota del modelo hiperbólico.
t	: Tiempo.
T	: Temperatura.



RESUMEN

El incremento de temperatura en arcillas genera una compresión del suelo (asentamiento) y la disminución de temperatura genera una expansión del suelo sobre un estado de esfuerzos. En el presente trabajo de investigación se desarrolló una formulación matemática (modelo numérico) para predecir tales deformaciones volumétricas por variaciones de temperatura en arcillas. Para ello, se realizaron ensayos de consolidación térmica a 40 y 55°C en laboratorio y se desarrolló en gabinete la formulación matemática. El modelo requiere del coeficiente de consolidación secundaria a temperatura ambiente ($C\alpha(T_0)$) y la calibración del parámetro “ ϵ_{vult} ” a través de ensayos o de una base de datos empírica. Por último, la validez del modelo propuesto fue corroborado por los ensayos experimentales realizados en laboratorio. Después de las comparaciones de los resultados numéricos y experimentales, se concluyó que la formulación matemática predice al 98% las deformaciones volumétricas térmicas en arcillas saturadas normalmente consolidadas a diferentes estados de esfuerzos.

Palabras clave: Deformaciones volumétricas, arcilla, variación térmica.



ABSTRACT

The increase in temperature in clays generates a compression of the soil (settlement) and the decrease in temperature generates an expansion of the soil over a stress state. In the present research work, a mathematical formulation (numerical model) was developed to predict such volumetric deformations due to temperature variations in clays. For them, thermal consolidation tests were carried out at 40 and 55°C in the laboratory and the mathematical formulation was developed in the office. The model requires the coefficient of secondary consolidation at room temperature ($C\alpha(T_0)$) and the calibration of the parameter “ ϵ_{vult} ” through tests or an empirical database. Finally, the validity of the proposed model was corroborated by experimental tests carried out in the laboratory. After comparisons of the numerical and experimental results, it was concluded that the mathematical formulation predicts 98% of the thermal volumetric strains in normally consolidated saturated clays at different stress states.

Keywords: Volumetric deformations, Clay, thermal variation.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Sabemos que en materiales como el acero y/o el concreto (principales materiales de la ingeniería civil), cuando son expuestas a cambios de temperatura sus propiedades mecánicas varían. Por tanto, es justificable intuir que lo mismo ocurre en materiales como la arcilla. Este tema es aún muy poco estudiado en la región.

La geotecnia es una especialidad de la ingeniería civil encargada de estudiar el comportamiento mecánico del suelo para la fundación de diferentes tipos de estructuras. Ello implica estudiar los efectos de carga, agua, temperatura, productos químicos y otros como la geología para predecir, mejorar y/o disminuir la resistencia y deformación del suelo.

Algunas estructuras propensas a los efectos de la variación térmica son las fundaciones para edificaciones, capas de un pavimento, fundación de puentes, presas de embalse, túneles, taludes, etc.

En la normativa peruana E-050 del RNE indica simplemente la profundidad mínima de cimentación de 0.80m para prevenir los efectos de hielo-deshielo en los cambios de volumen del suelo de fundación. Sin embargo, aún son ciegos a los avances en investigación y tecnología ya desenvuelta en países como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra y Brasil en relación a los efectos de la variación térmica en las arcillas.

En la actualidad se sabe que el incremento de temperatura en arcillas genera una compresión del suelo (asentamiento) y la disminución de temperatura genera una expansión del suelo sobre una carga efectiva constante, dependiendo del nivel de pre-consolidación. Por ello, se están desarrollando modelos matemáticos que incluyan el



factor temperatura, de tal forma, nos permita predecir el comportamiento de las arcillas expuestas a variaciones térmicas. Sin embargo, sería más óptimo separar los efectos de la carga mecánica y carga térmica para plantear nuevos modelos constitutivos en la ingeniería geotécnica.

1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Campanella & Mitchell (1968) fueron los primeros en desarrollar un modelo termo-elástico para estimar la magnitud del exceso de presión de poro inducida térmicamente y las deformaciones volumétricas que lo acompaña durante el calentamiento y enfriamiento sin drenaje. Concluyeron que un incremento de temperatura resulta en una disminución de volumen por la suma de los siguientes efectos: expansión térmica del agua de los poros y minerales, la reorientación de fuerzas interparticulares, y el drenaje del agua; pero no evaluaron las posibles deformaciones plásticas volumétricas de la microestructura del suelo.

Hueckel & Borsetto (1990) propusieron el primer modelo termo-plástico para suelos saturados integrando un mecanicismo de ablandamiento térmico en el modelo CAM CLAY modificado, que permitió considerar los efectos del incremento de temperatura en las deformaciones volumétricas y en la resistencia al corte del suelo. El mecanismo de ablandamiento térmico permite observar la variación de la tensión de pre-consolidación medio efectivo (p'_{co}) con incrementos de temperatura bajo tensión confinante constante.

Cui et. al. (2000) publicaron un modelo termo-elasto-plástico para suelos saturados y no saturados, los autores propusieron un gráfico bidimensional donde es posible observar una curva límite de plastificación térmica que relaciona el incremento de temperatura (ΔT°) con la tensión media efectiva (p'). Los autores permitieron entender



mejor el proceso de endurecimiento térmico de las arcillas en estado normalmente consolidado y sobreconsolidado.

Laloui et al. (2014) Desarrolló un modelo matemático a través de la nueva teoría de la mecánica de suelos para arcillas propuesta por la Universidad de Cambridge, donde establece que la deformación termoplástica comienza cuando el punto de tensión alcanza la superficie de plastificación térmica en el plano esfuerzo medio efectivo versus temperatura ($p' \times T$).

Tao et al. (2016) evaluaron las características térmicas de los suelos en una variedad de tipos de suelos y niveles de saturación. Donde realizaron investigaciones con respecto al efecto del contenido de humedad, densidad seca, grado de saturación, tamaño de partícula y composición de mineralogía sobre la conductividad térmica de los suelos. Demostraron que la conductividad térmica normalizada puede correlacionar la conductividad térmica real con los parámetros termofísicos de los suelos (es decir, el contenido de humedad, el grado de saturación, la porosidad y la conductividad térmica de las partículas sólidas). La precisión del método de predicción se puede mejorar empleando los parámetros empíricos para ajustar los datos experimentales.

Kurz et al. (2016) presentaron una investigación donde describen que las deformaciones térmicas pueden dividirse en dos componentes: elásticos (recuperables) y plásticos (no recuperables). El componente plástico incluye deformaciones viscosas definidas por un coeficiente de velocidad de fluencia que varía con el índice de plasticidad y la temperatura (T), pero no con el nivel de tensión o la relación de sobreconsolidación (OCR). Los autores definieron un nuevo modelo elástico-termoviscoplastico (ETVP). El artículo proporciona un análisis de sensibilidad de resultados simulados de ensayos de compresión triaxial sin drenaje (CIU) para arcillas normalmente consolidadas y ligeramente sobreconsolidadas.



1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Problema general

¿Es posible predecir mediante una fórmula matemática las deformaciones térmicas volumétricas que ocurren en las arcillas?

1.3.2 Problemas específicos (PE)

- PE1: ¿Cuáles son las componentes necesarias para desarrollar la formulación matemática?
- PE2: ¿Cuál es la ecuación final para predecir las deformaciones volumétricas térmicas?
- PE3: ¿Es razonablemente aceptable la predicción del modelo en relación a los datos experimentales?

1.4 IMPORTANCIA Y UTILIDAD DEL ESTUDIO

La presente investigación se realizó afín de entender y empezar la investigación sobre la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas de las arcillas. Una razón principal es, elaborar una formulación matemática que nos permita predecir las deformaciones volumétricas térmicas mediante el uso parámetros obtenidos a través de ensayos de laboratorio muy simple y económico.

En la actualidad el estudio sobre los efectos de la temperatura en arcillas se viene desarrollando para su comprensión y aplicación en fundaciones térmicas, fundaciones offshore, depósitos de materiales radioactivos, tuberías enterradas que conducen fluidos a altas temperaturas, mejoramiento de suelos, diseños geotécnicos expuestos a variaciones térmicas artificiales o naturales, etc.

A través de la lectura se pudo constatar que la temperatura a través de la mecánica de suelos tiene muchas otras aplicaciones como la creación de microclimas para viviendas a través de fundaciones térmicas, muy aplicable en una región tan frígida como Puno.



Pero investigaciones como esa requieren presupuesto y asesoría al cien por ciento, políticas que aún no se han implementado en el Perú lamentablemente.

La posibilidad de considerar los efectos de la variación térmica en los diseños de estructuras geotécnicas en la ciudad de Puno es la justificación más importante de la presente investigación, lo cual nos llevara al desarrollo de futuras investigaciones en el campo de la ingeniería geotécnica.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

Elaborar una formulación matemática para predecir las deformaciones volumétricas en arcillas por variaciones térmicas.

1.5.2 Objetivos específicos (OE)

- OE1: Analizar e identificar los componentes necesarios sobre el comportamiento térmico de las arcillas para desarrollar la formulación matemática.
- OE2: Desarrollar la formulación matemática para predecir las deformaciones volumétricas en arcillas por variaciones térmicas, considerando el primer objetivo específico (OE1).
- OE3: Realizar una validación de la formulación matemática en base a datos experimentales obtenidos en laboratorio.

1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 Hipótesis general

Se observó que la formulación matemática predice en el rango aceptable las deformaciones térmicas volumétricas en arcillas saturadas, bajo cualquier estado de esfuerzo efectivo constante.



1.6.2 Hipótesis específicas (HE)

- HE1: Como los componentes obligatorios del suelo en estudio a considerar son el índice de vacíos final de la consolidación mecánica (e), el coeficiente de consolidación secundaria a temperatura ambiente ($C\alpha$), el tiempo de inicio de la consolidación secundaria térmica (t_0), la viscosidad cinemática del agua en los poros a temperatura ambiente $\zeta(T_0)$ y por último la velocidad de incremento de temperatura (en $^{\circ}\text{C}/\text{min}$).
- HE2: Fue desenvuelta una formulación matemática en base a la primera hipótesis específica (HE1).
- HE3: La validación del modelo con los datos experimentales fue satisfactoria.

1.7 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

La presente investigación está organizada de la siguiente manera:

En el CAPÍTULO 2 se describe la literatura revisada, la investigación realizada en relación al efecto de la temperatura en arcillas, los modelos existentes y revisiones extraordinarias para la justificación de la formulación matemática.

En el CAPÍTULO 3 se describe la metodología realizada en la presente investigación, se presenta los datos experimentales a usar y se plantea la formulación matemática.

En el CAPÍTULO 4 se describe los resultados y la discusión de todo el procedimiento desarrollado en el capítulo 3, y, se presenta la comparación de datos numéricos y experimentales para validar la formulación matemática.

Posterior a los resultados se describe las conclusiones de la presente investigación donde a partir de los objetivos propuestos y los resultados obtenidos se consiguen concluir la viabilidad de la investigación.



Luego se describe las recomendaciones de la investigación, así mismo plantea futuras investigaciones.

En la bibliografía, se describe las referencias del trabajo de investigación desarrollado.

Finalmente, de describe los anexos de la investigación.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Generalidades

En este capítulo se describe las referencias teóricas relacionado al tema de investigación, los conceptos de las definiciones entorno a la influencia de la temperatura en arcillas, así como modelos constitutivos actualmente existentes.

2.1.2 Influencia de la temperatura en arcillas

En la actualidad en nuestra región, muy poco se comenta sobre la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas de la arcilla para su uso en la ingeniería civil, pero es entendible el bajo interés en profundizar investigaciones sobre el tema, ya que la misma norma E-050 apenas comenta del efecto hielo-deshielo en las cimentaciones de edificaciones. En el presente ítem se dará a conocer algunos avances sobre la investigación del tema a nivel mundial, con el propósito de conocer y justificar el tema de la presente tesis.

Sabemos que las propiedades mecánicas de un material varían con la temperatura, como, el agua cambia de estado a ciertos niveles de temperatura, por tanto, lo mismo ocurre en el suelo.

Algunos de los autores que iniciaron el estudio de la influencia de la temperatura en las propiedades del suelo fueron (Campanella & Mitchell, 1968). Ellos estudiaron la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico de una arcilla predominantemente de illita. Se dieron cuenta de que un aumento de temperatura da como resultado una disminución de volumen por la suma de los siguientes efectos:

- Expansión térmica del agua de los poros y minerales;

- La reorientación de fuerzas inter-particulares, y;
- Por drenaje de agua.

Los autores también observaron que después del primer ciclo de calentamiento-enfriamiento, la arcilla tiende a un estado sobre-consolidado, donde las deformaciones volumétricas térmicas plásticas ya no son significativas, como se muestra en la Figura 2.1.

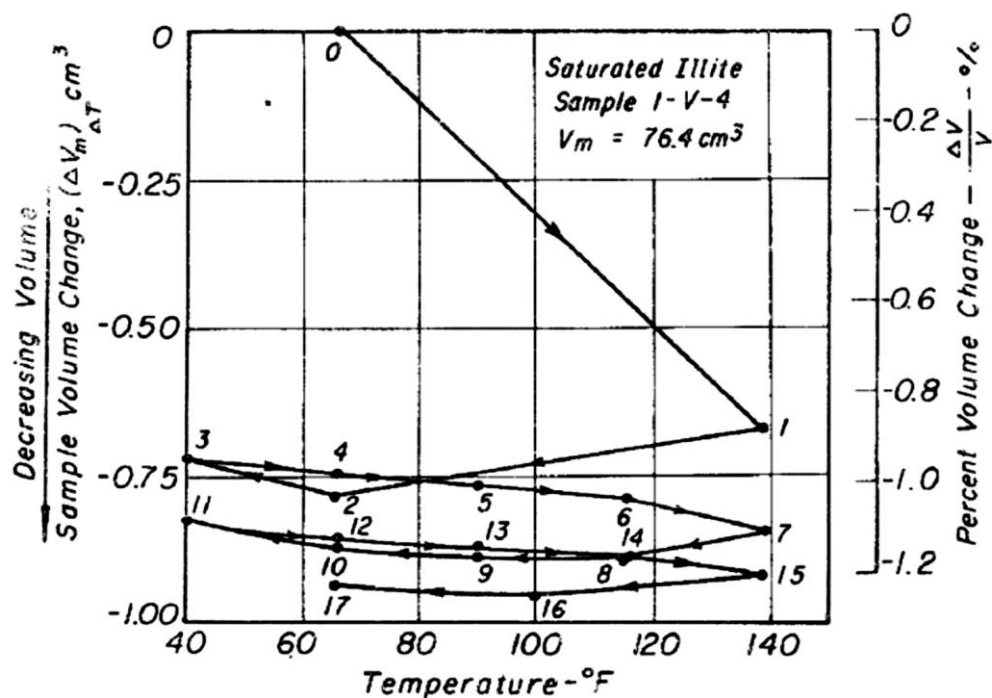


Figura 0.1: Comportamiento del volumen en la arcilla por la variación térmica.

Fuente: (Campanella & Mitchell, 1968).

(Campanella & Mitchell, 1968) también realizaron ensayos de consolidación isotrópica en estado saturado a temperatura controlada, donde observaron que en cuanto mayor fuese la temperatura de consolidación generaron una aceleración de deformaciones volumétricas, induciendo una disminución en la tensión de pre-consolidación ($\sigma'v$) como se observa en la Figura 2.2. En la misma figura los autores observaron que para soportar una misma carga el índice de vacíos tuvo que ser menor en cuanto mayor era la temperatura, lo cual indica que la arcilla tendió a densificarse a mayor temperatura. Otra

observación importante de los autores fue que los coeficientes de consolidación (C_c) en la curva virgen y el coeficiente de expansión (C_s) durante la etapa de descarga permanecieron constantes, por ende, independientes de la variación térmica.

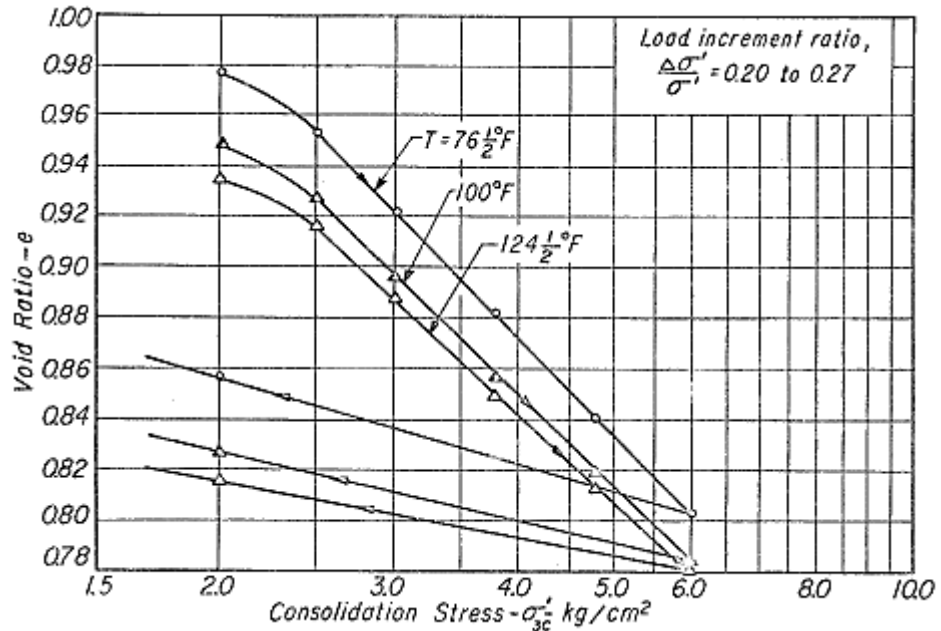


Figura 0.2: Efectos del incremento de la temperatura en una consolidación isotrópica de una arcilla saturada.

Fuente: (Campanella & Mitchell, 1968).

Además de describir los efectos de la temperatura en las arcillas Campanella & Mitchell (1968) propusieron ecuaciones para determinar el cambio de volumen y la presión poro al aumentar la temperatura, que se presentan a continuación:

En condiciones drenadas:

$$(\Delta V_w)_{\Delta T} = \alpha_w V_w \Delta T \tag{Eq. 0.1}$$

Donde:

- $(\Delta V_w)_{\Delta T}$ = Variación del agua en los poros por la variación de temperatura.
- α_w = Coeficiente de expansión térmica del agua en el suelo.
- V_w = Volumen de agua en los poros.
- ΔT = Variación de temperatura.



$$(\Delta V_s)_{\Delta T} = \alpha_s V_s \Delta T \quad \text{Eq. 0.2}$$

Donde:

$(\Delta V_s)_{\Delta T}$	=	Variación de volumen de los minerales del suelo.
α_s	=	Coefficiente de expansión térmica de los minerales del suelo.
V_s	=	Volumen de los minerales del suelo.
ΔT	=	Variación de temperatura.

Para un suelo arcilloso saturado con esfuerzo efectivo constante, debido al cambio de temperatura, el volumen de agua drenada es:

$$(\Delta V_{dr})_{\Delta T} = (\Delta V_w)_{\Delta T} + (\Delta V_s)_{\Delta T} - (\Delta V_m)_{\Delta T} \quad \text{Eq. 0.3}$$

Donde:

$(\Delta V_m)_{\Delta T}$	=	Variación del volumen total del espécimen por el incremento de temperatura.
---------------------------	---	---

Si los granos del suelo están en contacto mineral a mineral y la temperatura cambia, entonces tendrán la misma deformación para todos los granos del suelo y un coeficiente de expansión térmica isotrópica. Además, un cambio adicional en el volumen puede resultar de un cambio inducido por la temperatura en las fuerzas entre partículas que requieren cierta reorientación o movimiento relativo de los granos del suelo para permitir que la estructura del suelo lleve el mismo esfuerzo efectivo. Si el cambio en el volumen del suelo debido a este efecto es designado por $(\Delta V_{ST})_{\Delta T}$, entonces el cambio total en el volumen del suelo será:

$$(\Delta V_m)_{\Delta T} = \alpha_s V_m \Delta T + (\Delta V_{ST})_{\Delta T} \quad \text{Eq. 0.4}$$



Condiciones no drenadas:

La suma de los cambios en el volumen del suelo debido a la temperatura y la presión es igual a la suma de los cambios en el volumen de la masa del suelo debido a los cambios de temperatura y presión.

$$(\Delta V_w)_{\Delta T} + (\Delta V_s)_{\Delta T} + (\Delta V_w)_{\Delta P} + (\Delta V_s)_{\Delta P} = (\Delta V_m)_{\Delta T} + (\Delta V_m)_{\Delta P} \quad \text{Eq. 0.5}$$

Donde:

ΔV_w	=	Variación en el volumen de agua de los poros.
ΔV_s	=	Variación en el volumen de los minerales del suelo.
ΔV_m	=	Variación en el volumen de la masa del suelo.

$$(\Delta V_w)_{\Delta P} = m_w V_w \Delta u \quad \text{Eq. 0.6}$$

$$(\Delta V_s)_{\Delta P} = m_s V_s \Delta u + m''_s V_s \Delta \sigma'' \quad \text{Eq. 0.7}$$

Donde:

m_w	=	Compresibilidad da agua.
m_s	=	Compresibilidad de los minerales del suelo sobre presión hidrostática.
Δu	=	Incremento de presión de poro.
$m''_s V_s \Delta \sigma''$	=	Variación de volumen de los minerales del suelo debido a un incremento del esfuerzo efectivo (que es generado por cambios en las fuerzas de los contactos interparticulares).

Y;

$$(\Delta V_m)_{\Delta P} = m_v V_m \Delta \sigma'' \quad \text{Eq. 0.8}$$

m_v	=	Compresibilidad de la masa de la estructura del suelo.
-------	---	--

Para un esfuerzo efectivo constante durante el cambio de temperatura, se considera:

$$\Delta \sigma' = -\Delta u \quad \text{Eq. 0.9}$$

Considerando la ecuación 2.4 y substituyendo en las respectivas variables tenemos:

$$\Delta\mu = \frac{n\Delta T(\alpha_S - \alpha_W) + (\Delta V_{ST})\Delta T/V_m}{m_v + nm_w} \quad \text{Eq. 0.10}$$

$$\alpha_{ST} = \frac{(\Delta V_{ST})\Delta T/V_m}{\Delta T} \quad \text{Eq. 0.11}$$

Donde:

α_{ST} = Coeficiente físico-químico de variación de volumen estructural causada por la variación de temperatura.
 n = Porosidad.

$$\Delta\mu = \frac{n\Delta T(\alpha_S - \alpha_W) + \alpha_{ST}\Delta T}{m_v + nm_w} \quad \text{Eq. 0.12}$$

Como $m_v \gg m_w$ solo para suelos, entonces:

$$\Delta\mu = \frac{n\Delta T(\alpha_S - \alpha_W) + \alpha_{ST}\Delta T}{m_v} \quad \text{Eq. 0.13}$$

La ecuación 2.13 representa la variación de la presión de poro en función al incremento de temperatura.

Como los autores anteriores concluyeron que la arcilla se encuentra en un estado sobre-consolidado después de un ciclo de calentamiento-enfriamiento, (Baldi, Hueckel, & Pellegrini, 1988) estudiaron las deformaciones térmicas volumétricas en arcillas de



baja porosidad a diferentes niveles de sobre-consolidación. Durante las pruebas termomecánicas, realizaron pruebas con ciclos de calentamiento-enfriamiento en arcilla caolín y arcilla Boom Clay a tensión efectiva constante, donde observaron que las muestras altamente sobre-consolidadas (OC) tienden a tener un comportamiento termoelástico, mientras que las ligeramente sobre- consolidadas y normalmente consolidadas (NC) tienden a tener un comportamiento termoplástico, es decir una parte significativa de las deformaciones no son reversibles como se ve en la Figura 2.3 (a) y (b).

En la Figura 2.4 podemos ver la completa dependencia de las deformaciones volumétricas de la temperatura y la tensión efectiva. Las arcillas muy sobre-consolidadas tienden a hincharse a bajas temperaturas y contraerse a valores más altos. Las arcillas ligeramente sobre-consolidadas y normalmente consolidadas tienden a encogerse tanto a bajas como a altas temperaturas. Este mismo comportamiento fue observado por (Plum & Esrig, 1969).

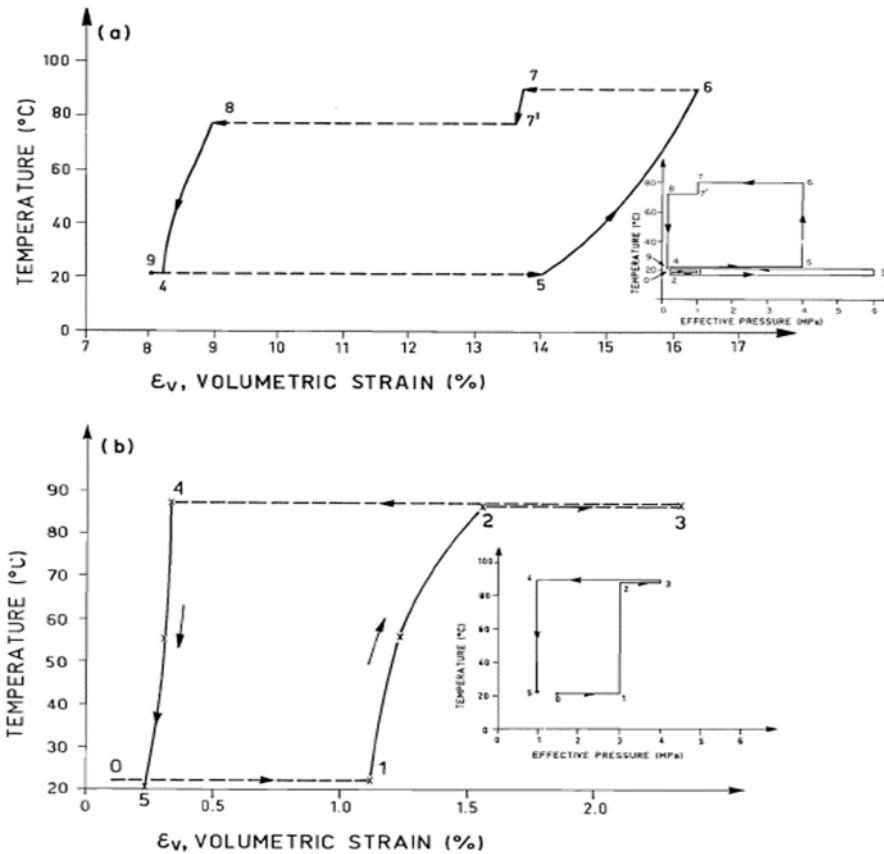


Figura 0.3: Deformaciones volumétricas térmicas resultantes sobre etapas de carga y descarga térmicas.

Fuente: (Baldi et al., 1988)

En relación con las pruebas que se muestran en la Figura 2.3 (a) y (b) (Baldi et al., 1988) no aclara cuál fue el propósito de someter las probetas a diversos procesos térmicos de carga, además de no considerar el efecto tiempo en el que se sometió cada etapa. Sin embargo, la observación de (Baldi et al., 1988) sobre los tipos de deformación volumétrica que presentan las probetas por el aumento de temperatura según el estado de tensión (OCR), fue fundamental para proceder con las formulaciones de modelos termomecánicos que existen actualmente.

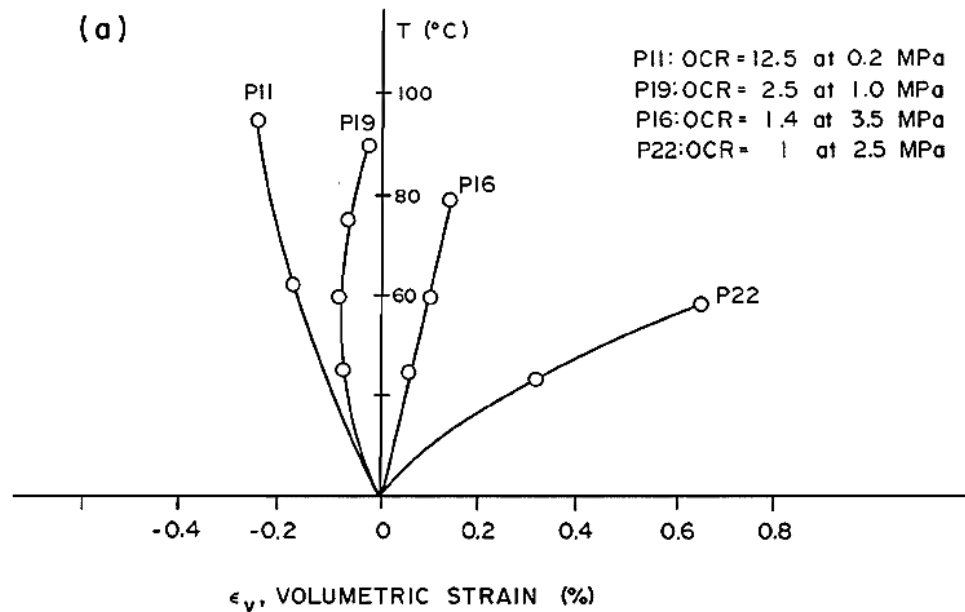


Figura 0.4: Curvas de deformación volumétrica térmica a diferentes nivel de sobre-consolidación (OCR).

Fuente: (Baldi et al., 1988)

Más recientemente (Laloui & Cekerevac, 2003) realizaron tres ensayos de consolidación isotrópica a diferentes niveles de temperatura en una arcilla Caolim saturado reconstituido (IP=24) cuyas trayectorias de incremento de la tensión media efectiva y la temperatura se muestran en la Figura 2.5. Se puede observar en la misma figura que el primer ensayo denominado test 1 fue consolidado a una temperatura ambiente de 20°C, sin embargo, los ensayos Test 2 y 3 sufrieron incrementos de temperatura (ΔT) de 40°C y 70°C a tensión media efectiva constante de 300 kPa, y, después de esa etapa incrementaron la tensión media efectiva a temperatura constante.

Los resultados de los ensayos de (Laloui & Cekerevac, 2003) se observa en la Figura 2.6. En donde se puede observar que las curvas de consolidación de los ensayos Test 2 y 3 en comparación a la curva del Test 1 presentaron una disminución significativa de volumen denominado “compactación térmica” por los mismos autores. A diferencia de los resultados observados por (Campanella & Mitchell, 1968) y (Baldi et al., 1988) se

puede observar en la Figura 2.5 que la diferencia entre las deformaciones entre los ensayos 2 y 3 (60°C-90°C) es mucho menor en comparación con los ensayos 1 y 2 (22°C-60°C), lo que sugiere que el aumento de las deformaciones térmicas en la arcilla no es lineal ni directamente proporcional al aumento de temperatura. Por las características del suelo del planeta, compuesto por minerales, agua y gas; cada componente reaccionará de manera diferente al aumento de temperatura. Por lo tanto, puede haber un límite en el que el aumento de temperatura ya no tenga un efecto significativo sobre las deformaciones volumétricas.

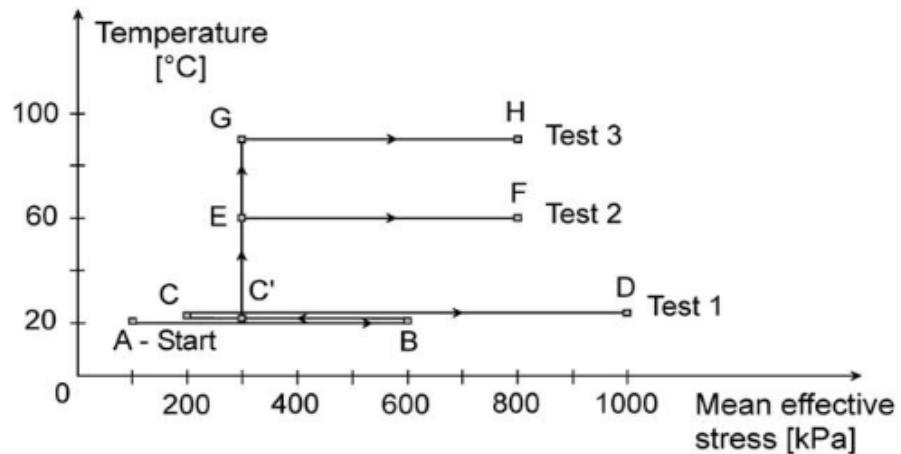


Figura 0.5: Trayectorias de incremento de la tensión media efectiva y la temperatura en los ensayos de consolidación isotrópica.

Fuente: (Laloui & Cekerevac, 2003).

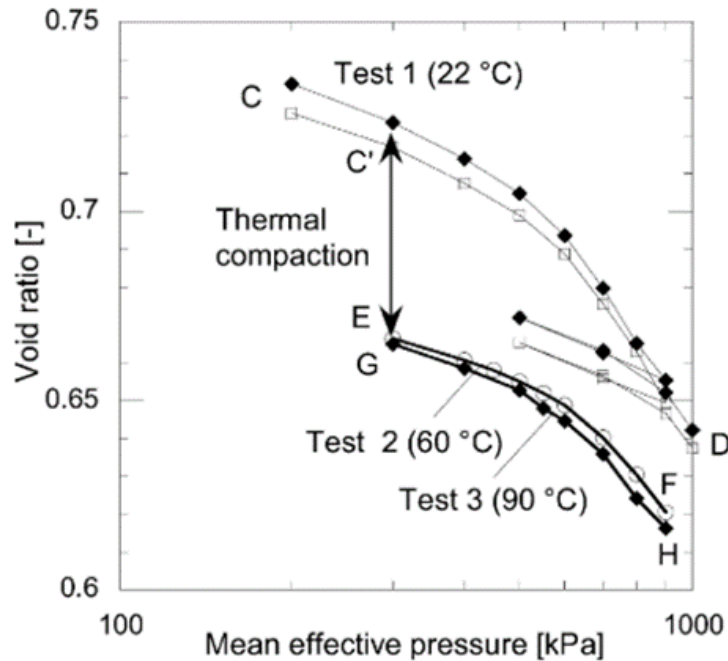


Figura 0.6: Curvas de consolidación isotrópica.

Fuente: (Laloui & Cekerevac, 2003)

Hasta el momento se ha discutido de cómo influye la variación térmica y/o carga térmica en el volumen de las arcillas, sin embargo ello conduce directamente a formularse la siguiente pregunta ¿Entonces cómo influye el incremento y/o disminución de la temperatura en la presión de poro? para ello se encontró el artículo de (Bai, Guo, & Han, 2014) en donde publico los resultados de ensayos de consolidación isotrópica en una arcilla con $LL=31\%$ y un $IP= 13.8\%$. Los ensayos primero fueron sometidos a una consolidación drenada a una temperatura de $25^{\circ}C$ por 1320min, luego cerraron las válvulas de drenaje y empezaron a incrementar la temperatura progresivamente ($\Delta T=+10^{\circ}C$) y esperando estabilizar la temperatura en cada etapa en condiciones no drenadas por otros 1320min. Los resultados de los ensayos se presentan en la Figura 2.7.

(Bai et al., 2014) observaron incrementos graduales de la temperatura en el exceso de presión de poro normalizada, en donde identificaron que en cuanto se incrementa la temperatura aumenta la presión de poro y viceversa. Sin embargo, la observación más

importante fue que en cuanto menor era la tensión confinante durante el incremento de temperatura mayor fue el exceso de presión de poro inclusive pudiendo llegar a anular la tensión efectiva dentro de los especímenes.

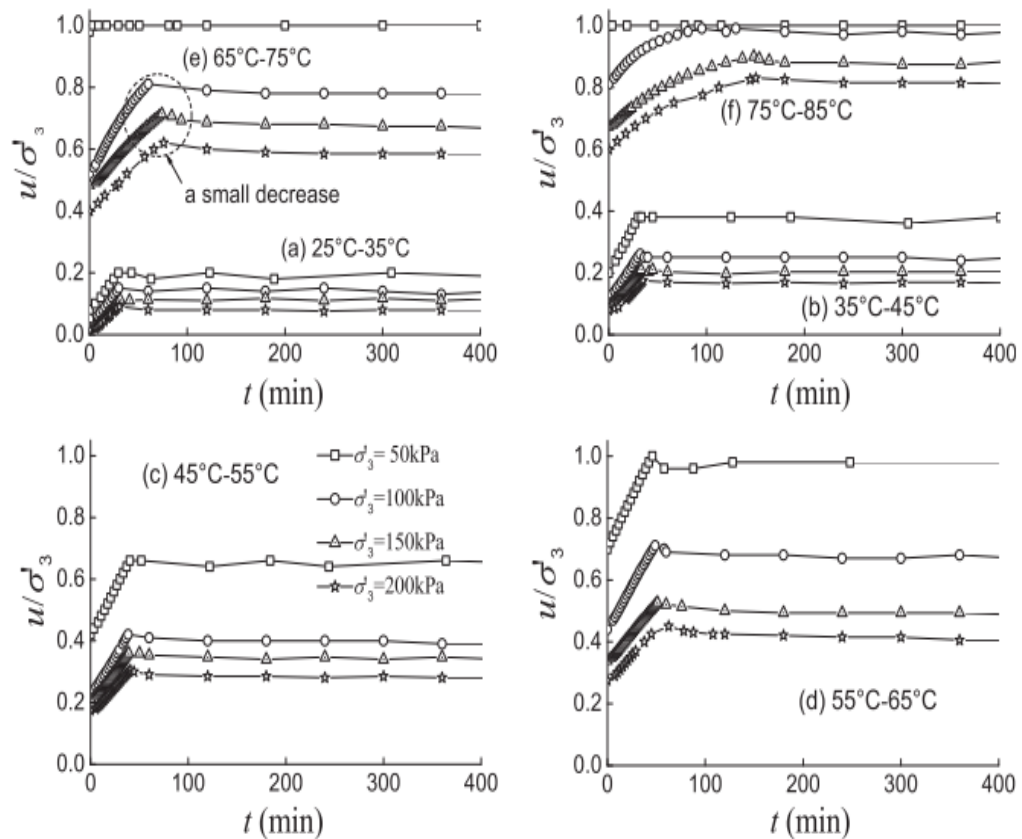


Figura 0.7: Curvas de presión de poro normalizada inducida por temperatura.

Fuente: (Bai et al., 2014)

2.1.3 Influencia de la temperatura en la tensión de pre-consolidación (σ'_v)

En el anterior ítem se revisó la bibliografía sobre la influencia de la variación térmica en el cambio de volumen de las arcillas, en donde los autores tuvieron que realizar ensayos de consolidación isotrópica (hidrostática) y ensayos edométricos a temperatura controlada adoptando diferentes trayectorias de incremento de carga mecánica y térmica. Tales ensayos también permitieron entender como varia la tensión de pre-consolidación en función a la temperatura, los cuales se presentan en el presente ítem.

Uno de los primeros autores a observar este comportamiento fueron (Sallfors & Tidfors, 1989) quienes estudiaron la variación de la tensión de pre-consolidación en cinco tipos de arcilla a través de ensayos de consolidación a deformación controlada (CRS), en donde observaron que el efecto de la temperatura en la tensión de pre-consolidación depende de la magnitud de incremento de temperatura, contenido de arcilla, microestructura y contenido de humedad por el cual tiende a ser una disminución lineal como se observa en la Figura 2.8.

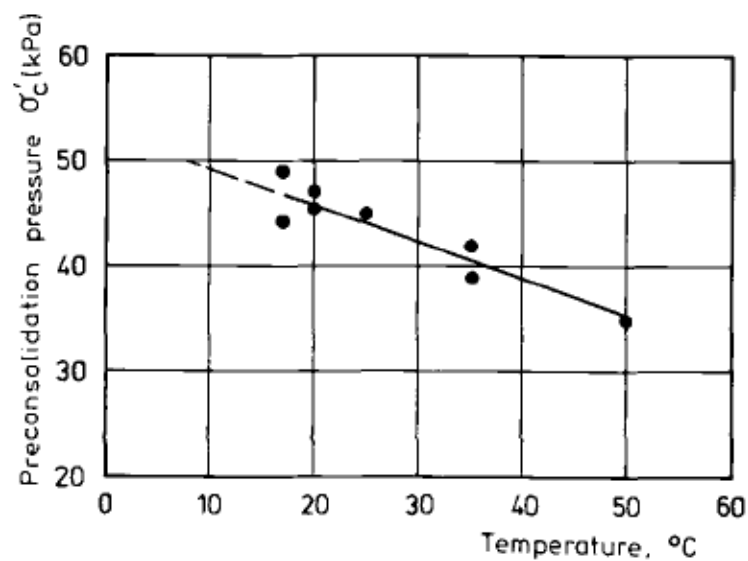


Figura 0.8: Relación entre la temperatura vs la tensión de pre-consolidación.

Fuente:(Sallfors & Tidfors, 1989)

Sin embargo, contrario a las conclusiones de (Sallfors & Tidfors, 1989) autores como Eriksson (1989) y (Cui, Sultan, & Delage, 2000) afirman que la tensión de pre-consolidación tiende a una disminución no lineal con relación al incremento de temperatura como se observa en la Figura 2.9.

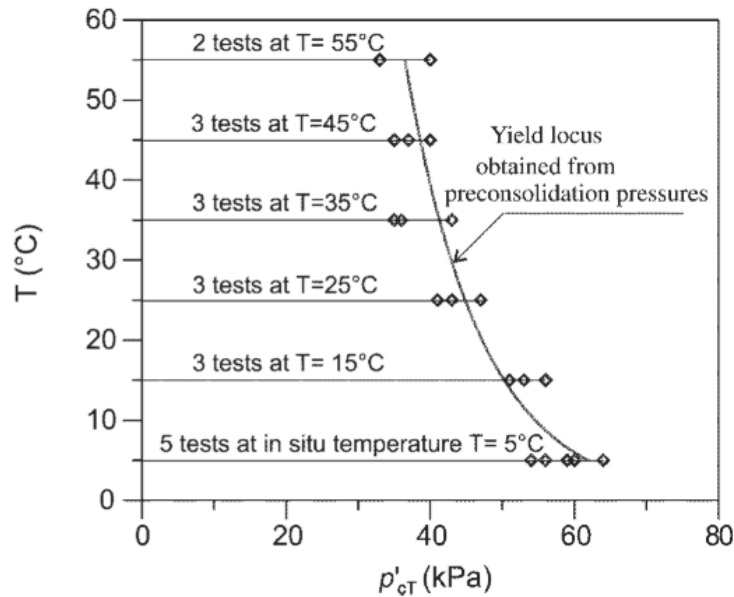


Figura 0.9: Relación entre la tensión de pre-consolidación con la temperatura.

Fuente: (Cui et al., 2000)

La disminución de la tensión de pre-consolidación con respecto al incremento de la temperatura estudiado por los autores hasta ahora mencionados está relacionado a los efectos de calentamiento en la etapa de consolidación. Sin embargo, (Hong, Pereira, Tang, & Cui, 2013) estudiaron el comportamiento de las arcillas cuando con sometidos a un ciclo de calentamiento – resfriamiento en los mismos tipos de ensayos de consolidación, en donde, concluyeron que cuando una arcilla es sometida simplemente a un proceso de calentamiento la tensión de pre-consolidación disminuye, pero, cuando es sometido a un ciclo de calentamiento-resfriamiento la tensión de pre-consolidación incrementa. Este último comportamiento fue denominado por (Hong et al., 2013) como un proceso de densificación térmica.

2.1.4 Modelos termo-mecánicos existentes

Poder entender el comportamiento de la tensión de pre-consolidación, permitió a los investigadores introducir la variable temperatura (T) en una dimensión de la actual teoría de la mecánica de suelos avanzada como se observa en la Figura 2.10.

La Figura 2.10 representa gráficamente el comportamiento termo – elasto – plástico de la arcilla en el cuadrante de la tensión media efectiva (p') versus la temperatura (T). El grafico indica que la tensión media efectiva disminuye en cuanto la temperatura incrementa, es decir, si un espécimen es cargado hasta $p' = p'_c(T_0)$ y luego descargado hasta $p'_c(T_1)$ para después incrementar la temperatura hasta T_1 , el espécimen empezara a presentar deformaciones termo-elásticas hasta tocar la línea entrecortada (isotropic yield limit) denominado en el idioma español como la “línea límite de plastificación térmica (LY)”, a partir de esa línea limite LY el espécimen experimentara deformaciones termo-plásticas.

Gracias al grafico de la figura 2.10 los autores (Laloui & François, 2009) presentaron el diagrama tridimensional que se observa en la Figura 2.11, en donde, en cuanto mayor la temperatura el dominio termo-elástico disminuye. En la figura 2.11 aparece una nueva superficie límite denominado en inglés como “deviatoric yield limit” que representa la misma superficie LY pero en el espacio (3D).

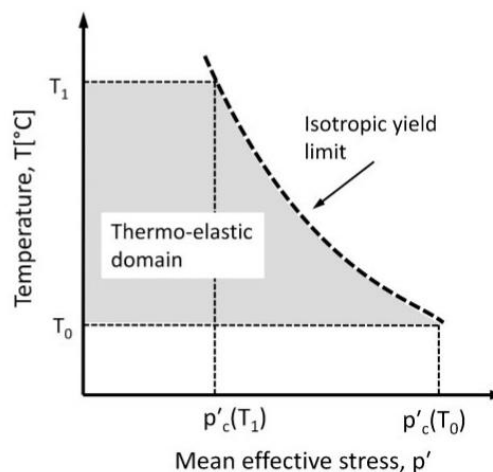


Figura 0.10: Diagrama de la superficie termo-elasto-plástica isotrópica.

Fuente: (Laloui & François, 2009)

En la Figura 2.11 se presenta el diagrama tridimensional que relaciona las variables de la teoría CAM CLAY más una variable adicional representada por la temperatura, los cuales se describen a continuación:

- q = tensión desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$)
- p' = tensión media efectiva $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$
- T = temperatura

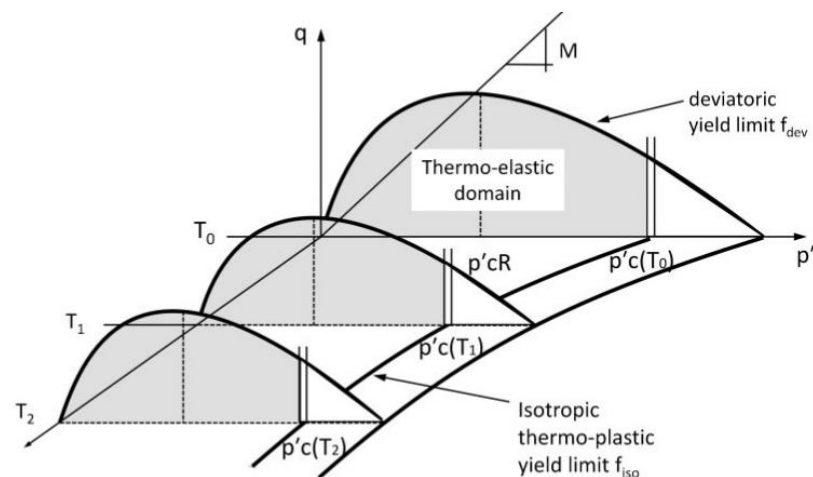


Figura 0.11: Diagrama tridimensional $p' \times q \times T$.

Fuente: (Laloui & François, 2009)

Los investigadores como Cui et al. (2000) y Abuel Naga et al. (2007) observaron que el diagrama presentado en la figura 2.10 describe el comportamiento térmico de arcillas sobre-consolidadas y en arcillas normalmente consolidadas, por ello, los autores ya mencionados introdujeron una recta “LY” en la coordenada (p', T_0) que representa la trayectoria térmica para arcillas normalmente consolidadas como se observa en la Figura 2.12.

La recta LY en la figura 2.12 quiere decir, que cuando se empieza a incrementar la temperatura en una arcilla normalmente consolidada a tensión media efectiva constante, inmediatamente empieza a existir deformaciones plásticas volumétricas

térmicas, en cambio, en arcillas sobre-consolidadas las deformaciones plásticas empiezan cuando tocan la línea “TY” a un determinado nivel de incremento térmico.

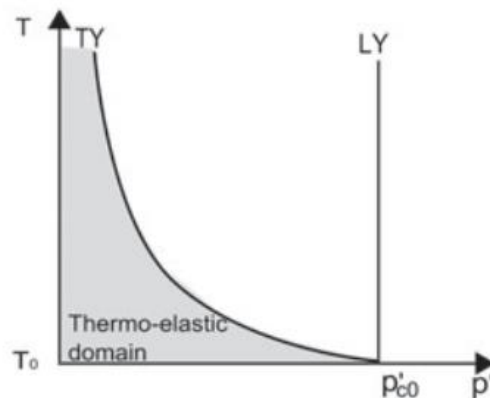


Figura 0.12: Diagrama termo elasto – plástica para arcillas saturadas.

Fuente: (Hong et al., 2013)

(Hong et al., 2013) realizaron una revisión y comparación de resultados de los modelos de Cui et al. (2000), Abuel Naga et al. (2007) y Laloui & François (2009), denominándolos como modelos C, A y L respectivamente.

Los tres modelos C, A y L tienen como utilidad predecir el comportamiento termo-mecánico de las arcillas, lo que significa determinar la variación volumétrica ($d\varepsilon_v$) y la variación de la tensión media efectiva (dp') en función a la variación térmica (ΔT). (Hong et al., 2013) realizó un resumen de todas las ecuaciones termo-mecánicas propuestas por los tres modelos que se presentan en la Tabla 1, para luego describir las variables que fueron consideradas en cada modelo.

Comportamiento termo – elástico

Los tres modelos presentan una ecuación para determinar la deformación volumétrica elástica total ($d\varepsilon_v^e$), compuesta por dos partes: por carga mecánica y por carga térmica. Para el modelo C y L es la siguiente ecuación:

$$d\varepsilon_v^e = \alpha dT + \frac{dp'}{K}$$

Y para el Modelo A:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\alpha_A}{T} dT + \frac{dp'}{K}$$

Donde:

- α y α_A : Son los coeficientes de expansión volumétrica térmica de los modelos C, L y A respectivamente.
- K : módulo de compresibilidad o más conocido como módulo de bulk. (independe de la temperatura).
- dT : Variación de la temperatura.
- dp' : Variación de la tensión media efectiva.

Para el modelo L, los valores de α incrementa con la temperatura y el OCR:

$$\alpha = [\alpha_o + \zeta(T - T_o)] \frac{1}{d} \frac{p'_{co}}{p'}$$

Donde:

- α_o : coeficiente de expansión térmica a T_o .
- ζ : es la proporción de la variación de α con respecto a la temperatura.
- p'_{co} : es la tensión de pre-consolidación a una temperatura T_o .
- d : es un parámetro del modelo relacionado a la proporción de los esfuerzos (p' , q) en la superficie de plastificación.



En relación al módulo de bulk “K”, para los modelos C y A es la equivalente del modelo CAM CLAY:

$$K = \frac{v_o * p'}{k}$$

Donde:

- v_o : volumen específico inicial.
- k : es el coeficiente elástico en el plano ($\ln(p')$, v).

Sin embargo, para el modelo L, considera el módulo hipoeástico definido por:

$$K = K_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{n_c}$$

Donde:

- K_{ref} : es el módulo de bulk referente a p'_{ref} .
- n_c : es un parámetro del suelo.

Tabla 1: Resumen de ecuaciones termo-mecánicas.

	Model C	Model A	Model L
Elastic part	$d\varepsilon_v^e = \alpha dT + \frac{dp'}{K}$ <p>with</p> $\alpha = \text{material constant}$ $K = \frac{v_0 p'}{\kappa}$	$d\varepsilon_v^e = \frac{\alpha}{T} dT + \frac{dp'}{K}$ <p>with</p> $\frac{d\alpha_A}{\alpha_A} = b \frac{dp'}{p'}$ $K = \frac{v_0 p'}{\kappa}$	$d\varepsilon_v^e = \alpha dT + \frac{dp'}{K}$ <p>with</p> $\alpha = [\alpha_0 + \zeta (T - T_0)] \frac{1}{d} \frac{p'_{c0}}{p'}$ $K = K_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{n^e}$
Yield limits	<p>TY:</p> $p' = -\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{T - T_0}{T_c - T_0} \right)$ <p>LY:</p> $\frac{p'}{p'_{c0}} = \exp(-r_0 (T - T_0))$	<p>TY:</p> $\frac{p'_{c0}}{p'} = r^{TY} \sqrt{\ln \left(\frac{T}{T_0} \right)} + 1$ <p>LY:</p> $\frac{p'}{p'_{c0}} = 1 - r^{LY} \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$	<p>Loading surface:</p> $\frac{p'}{r_{iso} p'_{c0}} = 1 - r_T \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$ <p>Bounding surface:</p> $\frac{p'}{p'_{c0}} = 1 - r_T \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$
Plastic strain	<p>TY:</p> $d\varepsilon_{v1}^{T,p} = \alpha_p [\exp(\alpha_p (T - T_0)) - a] dT, d\varepsilon_{v1}^{\sigma,p} = \frac{\alpha_1}{v_0} \frac{dp'}{p'}$ <p>with</p> $\alpha_p = -\frac{\alpha}{1-a}$ <p>LY:</p> $d\varepsilon_{v2}^{T,p} = \alpha_p [\exp(\alpha_p (T - T_0)) - a] dT, d\varepsilon_{v2}^{\sigma,p} = \frac{\lambda - \kappa}{v_0} \frac{dp'}{p'}$ <p>with</p> $\alpha_p = -\frac{\alpha}{\exp\left(\frac{1}{c_2} \ln\left(\frac{1}{c_1} \frac{p'}{p'_{c0}}\right)\right) - a}$	<p>TY:</p> $d\varepsilon_{v1}^p = \frac{\omega_T}{v_0} \frac{dp'}{p'}$ <p>with</p> $\omega_T = (\lambda - \kappa) \frac{-\ln(1 - r^{LY} \log_{10}(T/T_0))}{\ln(r^{TY} \ln(T/T_0) + 1)}$ <p>LY:</p> $d\varepsilon_{v2}^p = \frac{\lambda - \kappa - \omega_T}{v_0} \frac{dp'}{p'}$	<p>—</p> <p>—</p>
Hardening laws	<p>TY:</p> $d\beta = \frac{-\exp(\beta p')}{p'(T_c - T_0) \alpha_p [\exp(\alpha_p (T - T_0)) - a]} d\varepsilon_{v1}^{T,p} - \frac{\beta}{\alpha_1} d\varepsilon_{v1}^{\sigma,p}$ <p>LY:</p> $d p'_{c0} = \left\{ \alpha_p \frac{r_0}{[\exp(\alpha_p (T - T_0)) - a]} d\varepsilon_{v2}^{T,p} + \left(\frac{v_0}{\lambda - \kappa} \right) (d\varepsilon_{v2}^{\sigma,p} + d\varepsilon_{v1}^{\sigma,p}) \right. \\ \left. + \left(\frac{K v_0}{\lambda - \kappa} \right) d\varepsilon_{v1}^{T,p} \right\} p'_{c0}$	<p>TY:</p> <p>—</p> <p>LY:</p> $d p'_{c0} = \frac{v_0}{\lambda - \kappa - \omega_T} p'_{c0} d\varepsilon_{v2}^p$	<p>TY:</p> $d r_{iso} = \frac{(1 - r_{iso})^2}{c} d\varepsilon_v^p$ <p>LY:</p> $d p'_{c0} = h p'_{c0} d\varepsilon_v^p$

FUENTE: Extraído de (Hong et al., 2013).

Comportamiento termo – plástico

Para poder modelar el comportamiento termo-plástico los autores propusieron diagramas para representar el dominio termo-elástico de las arcillas, de tal manera poder definir curvas limite representadas por las letras LY y TY como se observa en la figura 2.13.

Las letras LY y TY representan lo siguiente:

- LY = “Loading Yield Limit”, esta curva describe el comportamiento termo-elasto-plástico para arcillas normalmente consolidadas.
- TY = “Thermal Yield Limit”, esta curva describe el comportamiento termo-elasto-plástico para arcillas sobre-consolidadas.

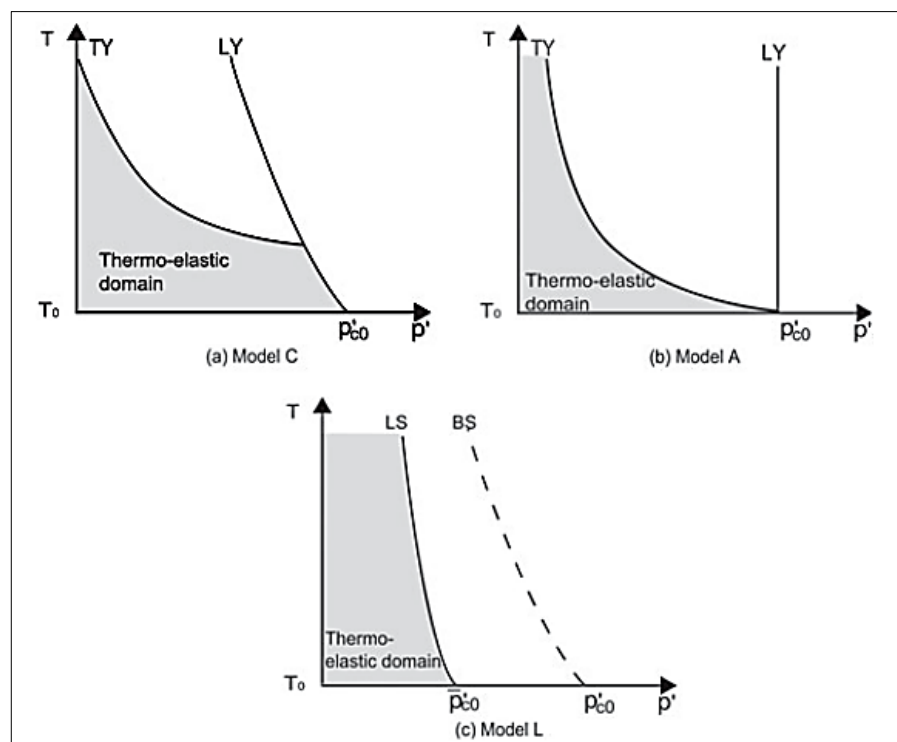


Figura 0.13: Dominio termo – elástico de los modelos en el plano ($p' \times T$).

Fuente: (Hong et al., 2013)



Para poder graficar las curvas TY y LY los autores de los tres modelos presentaron las ecuaciones respectivas que se muestran en la tabla 1. Tales ecuaciones están conformadas por variables que se obtienen a partir de ensayos en laboratorio y otros no. Los cuales se describen a continuación:

Para los modelos C y A:

- p'_{co} = es la tensión de pre-consolidación a una temperatura T_0 .
- T_c = es la temperatura cuando la curva TY interseca el eje de temperatura.
- β y TY son parámetros del suelo que se obtienen en laboratorio de los modelos C y A respectivamente.
- r_0 = es el coeficiente que gobierna la curvatura de LY en el modelo C.
- LY = es un parámetro del suelo natural en el modelo A que se obtiene en laboratorio.

Para el modelo L:

- r_T = es un coeficiente de gobierna la curvatura del modelo L.

Por lo descrito hasta el momento se puede entender que los modelos para que fuesen aplicados necesitan datos de laboratorio y muchas otras variables complejas de entender. Además, los tres modelos proponen una modificación total de los modelos actuales como el CAM CLAY, ya que incluyen los efectos de la temperatura en el comportamiento de las arcillas como “carga térmica”.

Sabemos en la actualidad que las propiedades del suelo varían por efectos de incremento de carga ($\Delta\sigma$), y, dependiendo del tipo de suelo empiezan a aparecer otros esfuerzos dentro de la masa en compresión, como por ejemplo la tensión cizallante o la presión intersticial. Los modelos presentados hasta ahora agruparon este comportamiento del suelo como originado por “carga mecánica”, entonces, todos los efectos por temperatura lo denominaron como originados por “carga térmica”.



Por tanto, quiere decir que la mecánica de suelos en estado saturado tendría que estudiar el comportamiento del suelo (arcillas) a partir de dos tipos de carga: carga mecánica + carga térmica. Pero como pudo observarse en los modelos presentados, juntar los dos tipos de carga hace del modelo mucho más complicado de desenvolver, explicar y entender.

La presente tesis empieza con la filosofía de poder separar los efectos de estas cargas, y, plantear una ecuación simplificada para determinar la variación volumétrica originada solo por carga térmica.

2.1.5 Influencia de la temperatura en la microestructura de las arcillas

Antes de los años 2000 fue complicado para los investigadores poder observar el comportamiento microestructural de las arcillas frente a la influencia de la temperatura, en la actualidad es posible realizar ensayos microscópicos gracias al avance de la tecnología.

Los autores (Delage, Sultan, & Cui, 2000) realizaron una investigación sobre la influencia del incremento de temperatura en la porosidad de una arcilla Boom Clay para luego relacionar con la permeabilidad total e intrínseca del mismo. En la Figura 2.14 se observa la variación de la permeabilidad y la porosidad durante los efectos de calentamiento y resfriamiento, en donde, los autores afirmaron que la permeabilidad total incrementa en cuanto aumenta la temperatura y disminuye en cuanto empieza el resfriamiento, consecuentemente concluyeron que la permeabilidad intrínseca de una muestra cargada a una determinada temperatura depende apenas de su porosidad, independientemente de la trayectoria termomecánica anteriormente seguida, es decir, variaciones de volumen creadas por tensión y/o temperatura tiene el mismo efecto sobre el sistema intrínseco.

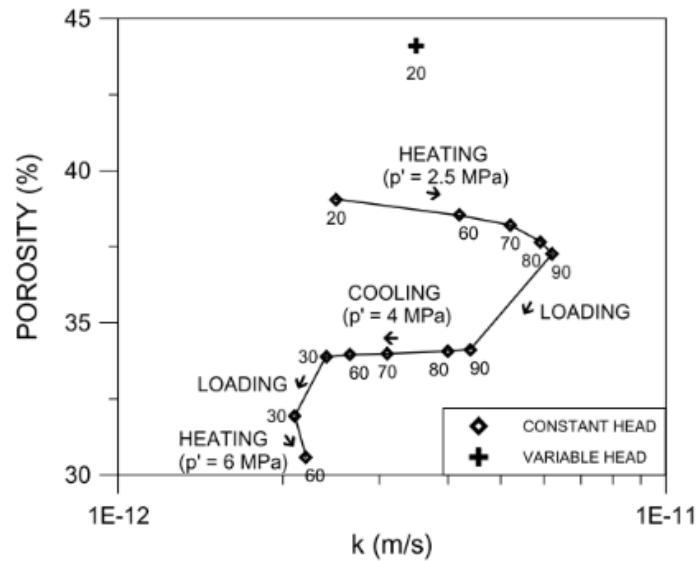


Figura 0.14: Ensayos de permeabilidad en arcilla Boom Clay a diferentes niveles de temperatura.

Fuente: (Delage et al., 2000)

De tal forma (Delage et al., 2000) cita la ecuación de (Hillel, 1980) para determinar la variación de la viscosidad dinámica del agua en relación a la temperatura:

$$\mu(T) = -0.00046575 \ln(T) + 0.00239138 \text{ (Pa.s)}$$

Donde:

- $\mu(T)$ = Viscosidad dinámica del agua
- T = Temperatura

Recientemente los autores (Chen et al., 2017) publicaron una investigación más detallada a nivel microscópico sobre la influencia de la temperatura en la microestructura de una arcilla Boom Clay. (Chen et al., 2017) realizaron ensayos de permeabilidad, Microscopia Electrónica de Barredura (SEM) y ensayos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

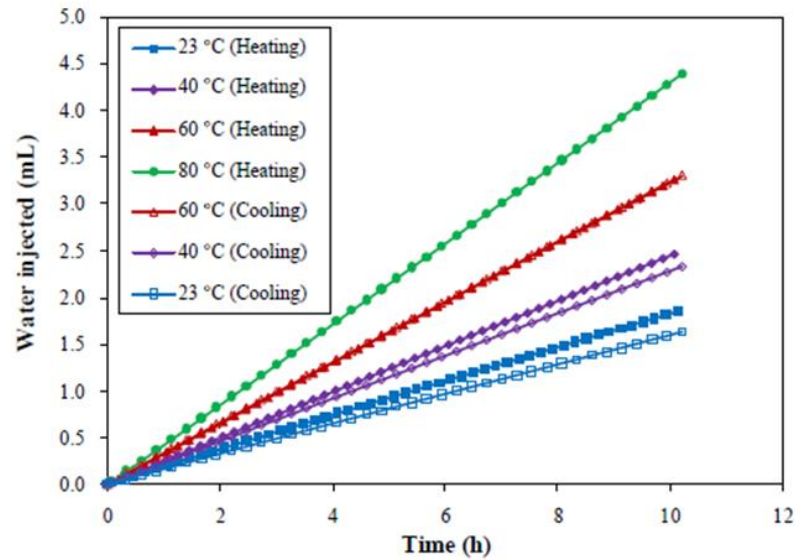


Figura 0.15: Relaciones de flujo de tiempo vs agua inyectada en cada nivel de temperatura en dirección paralela al plano de estratificación.

Fuente: (Chen et al., 2017)

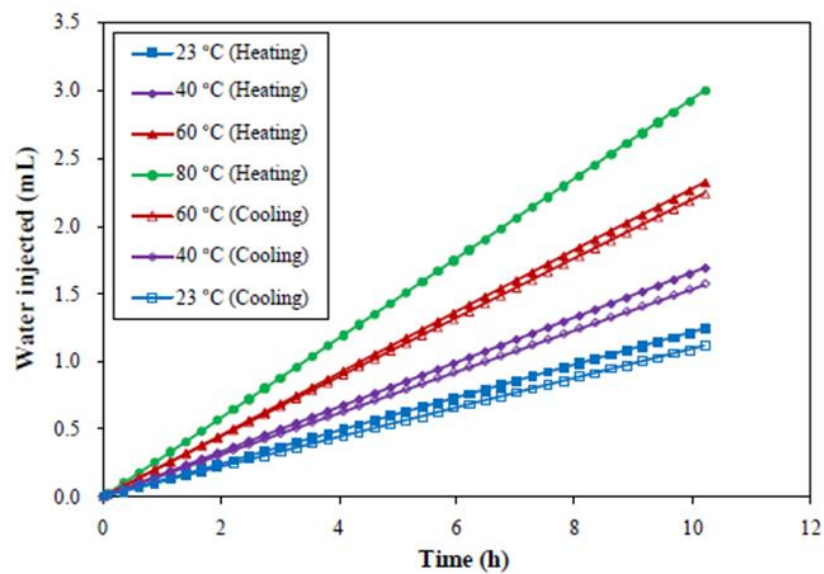


Figura 0.16: Relaciones de flujo de tiempo vs agua inyectada en cada nivel de temperatura en dirección perpendicular al plano de estratificación.

Fuente: (Chen et al., 2017)

En la Figuras 2.15 y 2.16 se observa una relación lineal satisfactoria entre el flujo de tiempo y volumen de agua inyectada paralela y perpendicular al plano de estratificación de la muestra, en donde, los autores (Chen et al., 2017) concluyeron que el volumen de agua inyectada dentro de una misma duración incrementa en cuanto mayor

es la temperatura, indicando una mayor permeabilidad en relación a una temperatura más alta, y, considerando que la presión de inyección es la misma, entonces lo que varía es el caudal de flujo interno para diferentes temperaturas en forma lineal.

En las figuras 2.17 y 2.18 se observa la conductibilidad hidráulica en relación a la temperatura paralela y perpendicular a la estratificación, los autores (Chen et al., 2017) observaron que la conductividad hidráulica a 80°C es 2.4 veces más que la de temperatura ambiente y afirmaron que existe una correlación positiva y básicamente reversible durante un ciclo de calentamiento-resfriamiento. Debido a la relación lineal, concluyeron que la conductividad hidráulica es independiente de la anisotropía de la muestra.

Este comportamiento los autores (Chen et al., 2017) explican que la permeabilidad de la arcilla aumenta debido a la disminución de la viscosidad y la densidad del agua en los poros en cuanto se incrementa la temperatura como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2: Variación de la viscosidad y la densidad del agua en los poros con la temperatura.

Temperature (°C)	Viscosity (10^{-3} Pa s)	Density (g/cm^3)
23	0.9579	0.9985
40	0.656	0.9927
60	0.4688	0.9845
80	0.3565	0.9742

FUENTE: Extraído de (Chen et al., 2017).

En relación a la permeabilidad intrínseca (Chen et al., 2017) evaluaron en dirección vertical y horizontal, y, en la figura 2.19 se puede observar que disminuyen aproximadamente un 10% (para todas las pruebas) durante la fase de calentamiento, y luego aumentan ligeramente durante la fase de enfriamiento. El comportamiento de la permeabilidad intrínseca es totalmente diferente a los datos obtenidos de las pruebas de permeabilidad total, este fenómeno está ligado al cambio en el volumen térmico del suelo.

Además, este fenómeno se puede atribuir al comportamiento de cambio de volumen térmico de Boom Clay. La contracción térmica plástica de las muestras durante la fase de calentamiento da como resultado una disminución de la permeabilidad intrínseca.

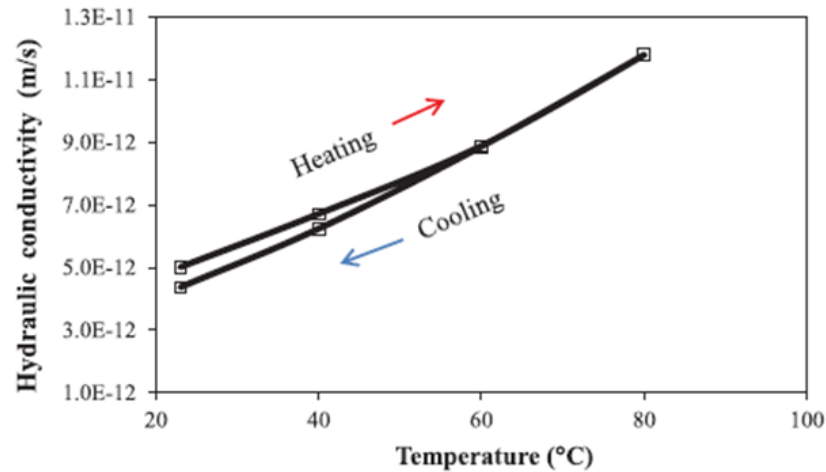


Figura 0.17 Relación de la conductividad hidráulica vs la temperatura en dirección paralela a la estratificación. Fuente: (Chen et al., 2017)

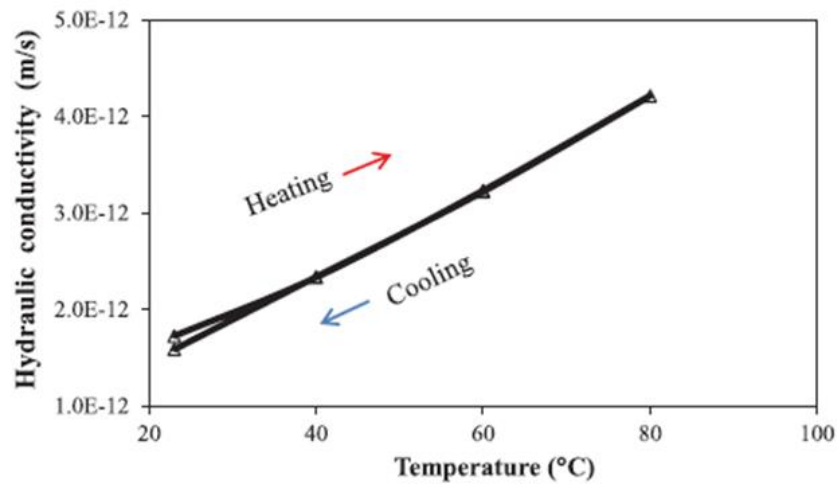


Figura 0.18 Relación de la conductividad hidráulica vs la temperatura en dirección perpendicular a la estratificación. Fuente: (Chen et al., 2017)

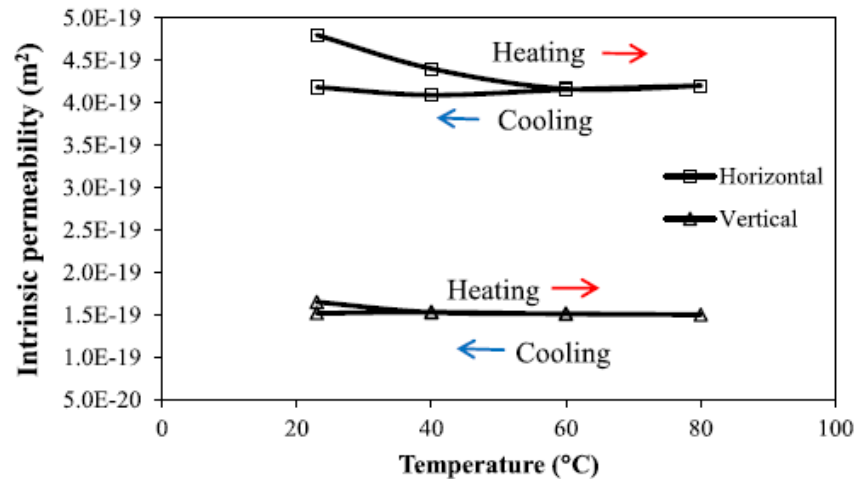


Figura 0.19 Variación de la permeabilidad intrínseca respecto a la temperatura.

Fuente: (Chen et al., 2017)

Para poder entender el comportamiento a nivel microscópico se presenta el ensayo de Microscopia Electrónica de Barredura (SEM) y el ensayo de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) realizado por los autores (Chen et al., 2017).

En los ensayos de Microscopia Electrónica de Barredura (SEM) observaron planos de estratificación de la microestructura de la arcilla Boom Clay. En la Figura 2.20 se observa una microestructura flácida curvada con leves líneas blanquecinas alrededor de las partículas, y, en la Figura 2.21 se observan discontinuidades que generan una zona de poros alargada entre el plano del estrato adyacente junto a un alineamiento bien desenvuelto de las partículas de la arcilla, este orden explica las propiedades transversales e isotrópicas de la arcilla indicando que esas discontinuidades destacan una alta permeabilidad horizontal a lo largo del plano de estratificación.

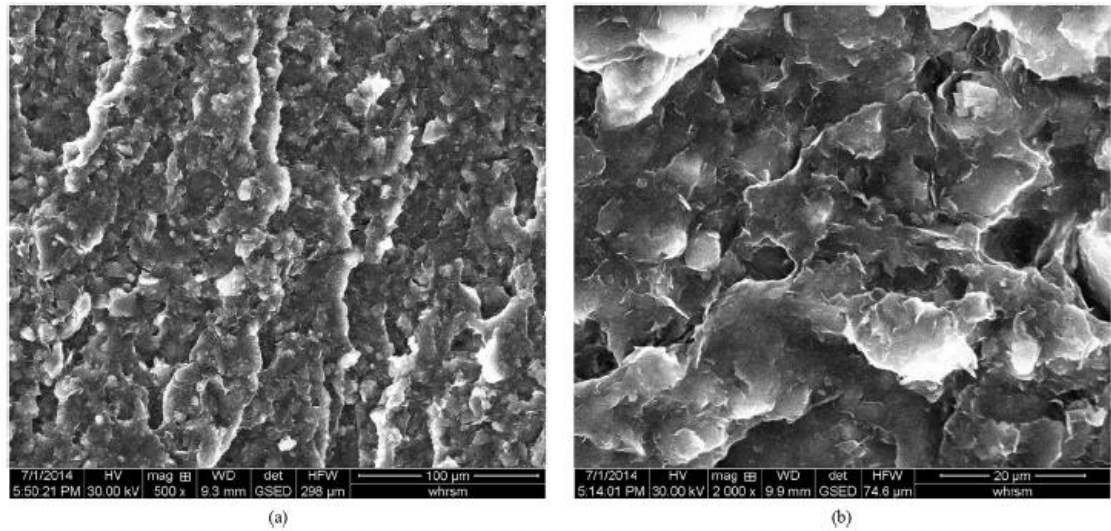


Figura 0.20 Microestructura de la arcilla Boom Clay perpendicular al plano de estratificación. a) x500 b) x2000

Fuente: (Chen et al., 2017)

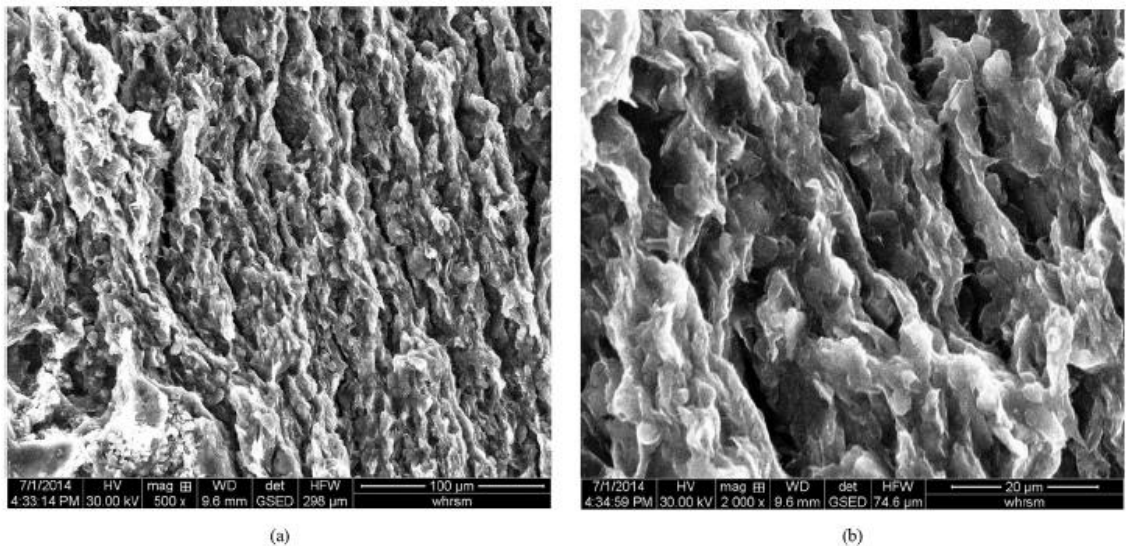


Figura 0.21 Microestructura de la arcilla Boom Clay paralelo al plano de estratificación. a) x500 b) x2000

Fuente: (Chen et al., 2017)

En el ensayo de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) (Chen et al., 2017) observaron que las curvas de distribución T2 que se observa en la Figura 2.22 se mueven para la derecha en paralelo con el aumento de temperatura, indicando un aumento en el tiempo de relajamiento T2 . El tiempo de relajamiento creciente T2 significa que el tamaño de los poros ocupados con agua en la arcilla aumenta con el incremento de

temperatura mostrando que el calentamiento produce vacíos mayores entre las partículas de la arcilla.

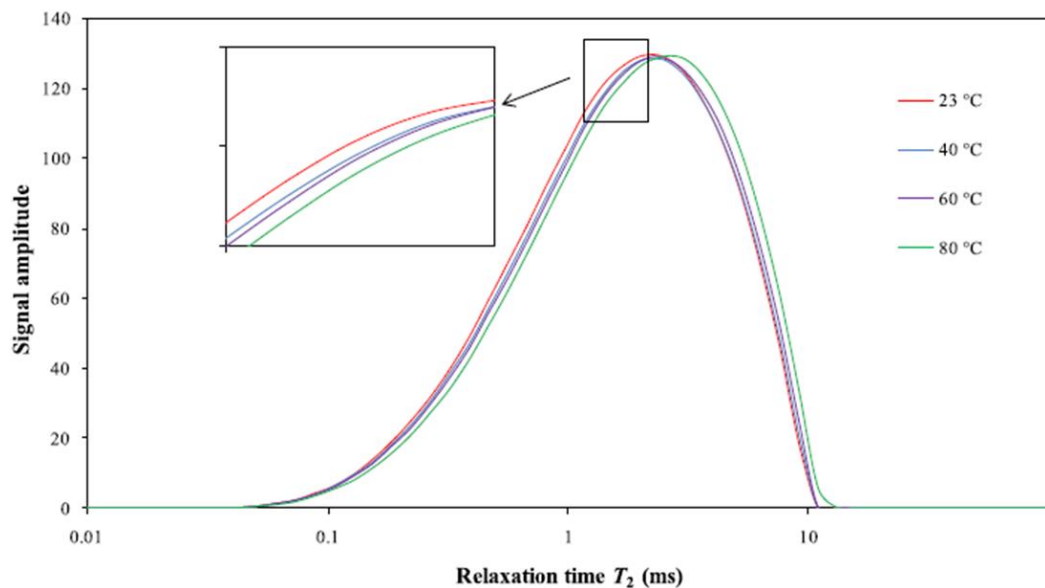


Figura 0.22 Resonancia Magnética Nuclear en la arcilla Boom Clay.

Fuente: (Chen et al., 2017)

Resumiendo los autores (Chen et al., 2017) concluyeron que la arcilla Boom Clay sufre contracción térmica debido al aumento del índice de vacíos, debilitamiento microestructural y pérdida de rigidez por calentamiento, como consecuencia de una disminución de la permeabilidad intrínseca y, además, otro aumento de la permeabilidad absoluta al disminuir la viscosidad del fluido durante el calentamiento.

Hasta el momento se puede afirmar que el efecto de la temperatura en las arcillas está directamente ligado a la viscosidad del fluido en los vacíos de la arcilla. Ya que según las investigaciones, la parte intrínseca (relacionada a la parte sólida de una muestra) es casi independiente de los efectos térmicos.

En resumen, los autores presentados concluyeron que el incremento de temperatura genera una disminución de la viscosidad del agua en los poros, debilitamiento microestructural e incremento de la permeabilidad, que conduce a un



aumento la velocidad de deformación de la muestra. Sin embargo, todo lo descrito hasta el momento explica teóricamente el comportamiento presentado en los resultados experimentales de (Machaca, 2020), ya que, no se encontró formulaciones matemáticas que incluyan la viscosidad para poder describir tal comportamiento observado.

Con la finalidad de poder encontrar formulaciones matemáticas en la mecánica de suelos saturado que incluyan la viscosidad, revisando la literatura, se encontró al Doctor Ingeniero Ian Shumann Marques Martins profesor del Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) de la Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), quien desde su tesis doctoral hasta la actualidad viene investigando una nueva e impresionante teoría que cubre y explica vacíos de la mecánica de suelos de Terzagui, el cual le permitió realizar grandes avances en la comprensión de la consolidación secundaria.

A continuación se presenta y describe un nuevo enfoque de la mecánica de suelos propuesta por (Martins, 1992).

(Martins, 1992) empieza detallando los tipos de contacto existentes en una arcilla, inclusive sugeridos por Terzagui en 1941. Los contactos entre partículas en arcillas son de dos tipos: “contactos tipo film bond” y “contactos tipo solid bond” como se observa en la figura 2.23.

(Martins, 1992) cito a (Terzagui, 1941) quien describió que las partículas de una arcilla están envueltas por una capa de agua adsorbida, misma que está fuertemente adherida a la superficie de los granos. A medida que se aparta de la superficie de los granos, la viscosidad del agua adsorbida va disminuyendo, hasta que a partir de una cierta distancia “d” las propiedades del mismo se convierten en de una agua común. Esta agua es el agua libre que se indica en la figura 2.23 que es el cual se expulsa en un ensayo de consolidación.

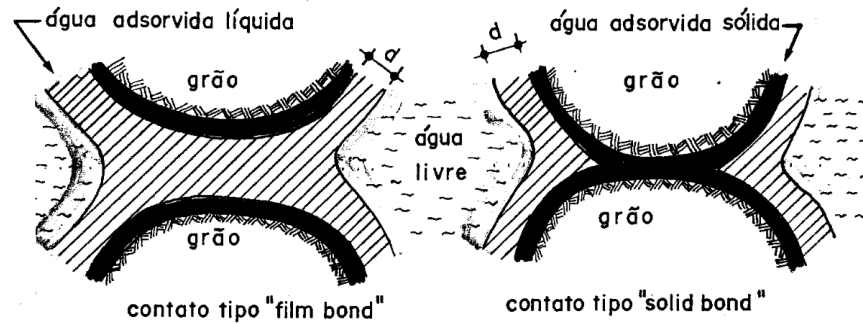


Figura 0.23 Tipos de contacto en suelos.

Fuente: (Martins, 1992)

De acuerdo con esta definición los contactos entre partículas se pueden dar a través de un agua adsorbida sólida (contacto sólido-sólido o solid bond) y a través de una capa de agua adsorbida líquida (film bond). Según (Martins, 1992) ambos contactos transmiten esfuerzos efectivos, en consecuencia es necesario subdividir la tensión efectiva en dos partes: una parte soportada por los contactos tipo agua sólida y otra parte por los contactos tipo filme viscoso.

(Martins, 1992) explica que cuando una masa de suelo es cargada hasta un cierto límite, los contactos tipo “solid bond” se quiebran y las partículas pasan a tener contactos tipo “film bond”. Estando la arcilla en estado lubricado y con exceso de presión neutra, continúa un periodo de consolidación con incremento de esfuerzos efectivos. Después de que la mayor parte del exceso de agua sea drenada, la arcilla aún se encuentra en estado lubricado. De esta forma el movimiento relativo entre las partículas continúa, hasta que finalmente, sean reestablecidos los contactos tipo “solid bond”, la variación de volumen del suelo en esta etapa es conocida como consolidación secundaria que, al contrario de la consolidación primaria, es independiente de la longitud de la trayectoria de drenaje.

(Terzagui, 1941) había definido que una vez se termina la consolidación primaria todos los esfuerzos que actúan son esfuerzos efectivos. En donde a partir de ahí no existe



variación en la tensión efectiva aun cuando la arcilla, se encuentre en estado lubricado y continúe sufriendo compresión. Esta etapa fue denominado como el periodo de solidificación, en donde, apenas ocurre reacomodo de los contactos de los granos.

La definición del anterior párrafo fue cuestionada por (Martins, 1992) atribuyendo que contradice totalmente el principio de los esfuerzos efectivos publicadas por el propio Terzagui cinco años antes (Terzagui, 1936). Porque no existe ninguna duda de que la variación de volumen está directamente ligada a la variación de los esfuerzos efectivos.

(Martins, 1992) a través de diferentes fuentes bibliográficas y estudios experimentales concluye que durante la consolidación secundaria (en un ensayo edometrico) existe disipación de las tensiones cizallantes y que después del fin de la consolidación primaria la tensión horizontal incrementa en el tiempo. Esto indica que, durante la consolidación secundaria, la tensión octaédrica estaría creciendo con el tiempo lo que justificaría la disminución de volumen después del llamado consolidación primaria.

Después de varios estudios experimentales (Martins, 1992) y (Andrade, 2009) concluyeron que en las arcillas existe una parte de la resistencia a compresión cuyo valor depende exclusivamente de la velocidad de deformación que ocurre durante la consolidación primaria y secundaria, y, esta velocidad de deformación está ligada al contenido de agua adsorbida en el suelo.

Esas consideraciones llevaron a (Martins, 1992) a admitir que una arcilla puede resistir los esfuerzos cizalhantes aplicadas por medio de dos parcelas independientes:

- Una de fricción, que depende de la tensión normal efectiva σ' ;
- Y otra de viscosidad, que depende del índice de vazios y de la velocidad de distorsión ($\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$).

La parcela de la viscosidad seria consecuencia de la distorsión del agua adsorbida en los contactos viscosos, el cual (Martins, 1992) escribió:

$$\tau = \underbrace{\sigma' \tan \phi_{mob}}_{\tau_{ATRITO}} + \underbrace{\eta(e) \frac{d\epsilon_s}{dt}}_{\tau_{VISCOSIDADE}}$$

En donde:

- τ = es la tensión cizallante aplicada.
- σ' = es la tensión normal efectiva.
- ϕ_{mob} = ángulo de fricción movilizado.
- $\eta(e)$ = coeficiente de viscosidad del suelo para el índice de vacíos e .

Considerando la ecuación presentada la consolidación secundaria paso a ser interpretado como una relajación de esfuerzos drenada en donde existe movilización paulatina de la parcela de la viscosidad. De tal forma, al final de la consolidación secundaria los esfuerzos cizallantes residuales serian aquellas soportadas apenas por fricción.



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La presente tesis consiste en desarrollar un trabajo numérico con el objetivo de desarrollar una formulación matemática para predecir deformaciones volumétricas por carga térmica en arcillas. Para ello, con la finalidad de comprobar su validez se usará datos experimentales obtenidos en laboratorio.

Los ensayos experimentales fueron realizados en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Estatal del Norte Fluminense (UENF) de Brasil. Por motivos en que equipos triaxiales especiales como el triaxial térmico aun no fue adquirido por ninguna universidad del Perú.

Estos ensayos fueron realizados por el autor de la presente tesis durante su estadía en la UENF como estudiante de postgrado.

A continuación, se presenta los materiales y métodos utilizados en la presente tesis, para realizar los ensayos en laboratorio.

3.2 MATERIALES

3.2.1 Suelo

El programa experimental, consistió en la caracterización de la muestra y ensayos triaxiales, se llevó a cabo con una arcilla marina típica de la costa sur de Brasil. Estos se acondicionaron en muestreadores tipo Shelby de paredes delgadas. La arcilla se extrajo de los muestreadores y se deforma completamente para luego homogeneizarla. El objetivo de este procedimiento fue obtener una sola muestra, eliminando la posible heterogeneidad de sedimentos marinos que pudieran existir en los Shelbys. Parte del

material homogeneizado se separó para las pruebas de caracterización, y otra parte para la reconstitución de los cuerpos de prueba para realizar los ensayos triaxiales térmicos.



Figura 0.1 Muestra recolectada por muestreadores tipo Shelby.



Figura 0.2 Extracción de las muestras de los tubos Shelby.



Figura 0.3 Muestra homogeneizada y guardada en un recipiente de tecnopor.

3.2.2 Equipo para la reconstitución de muestras

Para la reconstitución de las muestras se instaló un consolidómetro en el laboratorio de la centrífuga geotécnica de la Universidad Estatal del Norte Fluminense (figura 3.4). Este consolidómetro consta de molde partido, contenedor con sistema de reacción para aplicación de carga, actuador hidráulico, interfaz aire-aceite, panel con válvulas reguladoras de presión, computadora, convertidor / acondicionador AD, una celda de carga y un transductor.

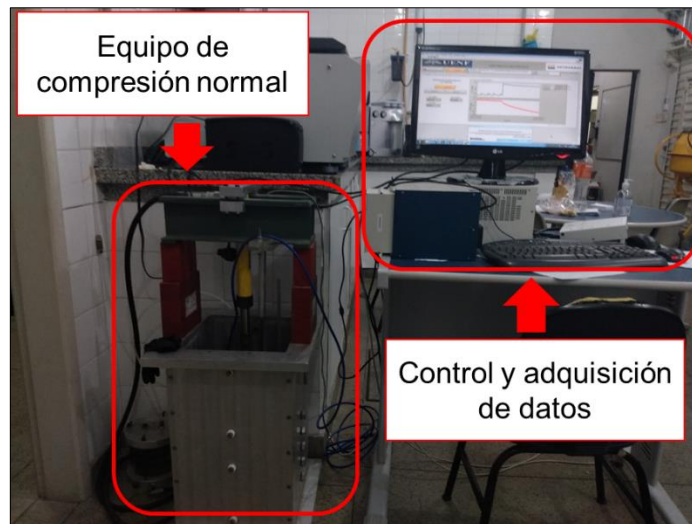


Figura 0.4 Equipo para la reconstitución de muestras.

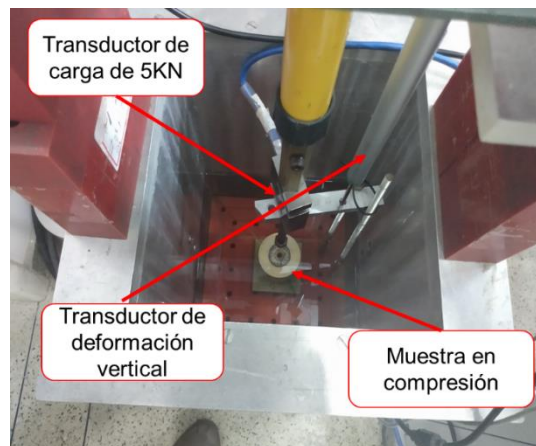


Figura 0.5 Vista al interior del equipo de reconstitución.

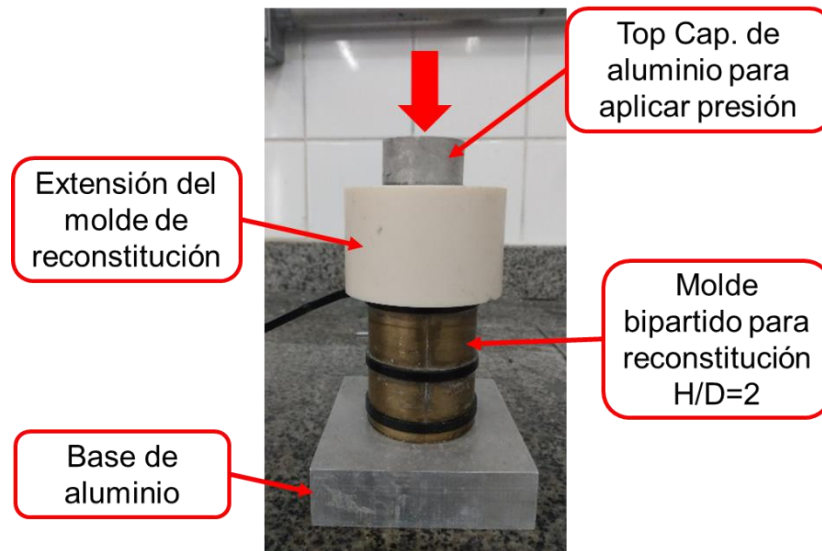


Figura 0.6 Molde bipartido para la reconstitución de muestras.

3.2.3 Triaxial convencional

Equipo para realizar investigación en mecánica de suelos, que tiene la capacidad de someter un espécimen a diferentes estados de tensión efectiva en un espacio axisimétrico. La Figura 3.7 muestra los equipos fabricados por la empresa “GDS Instruments”.

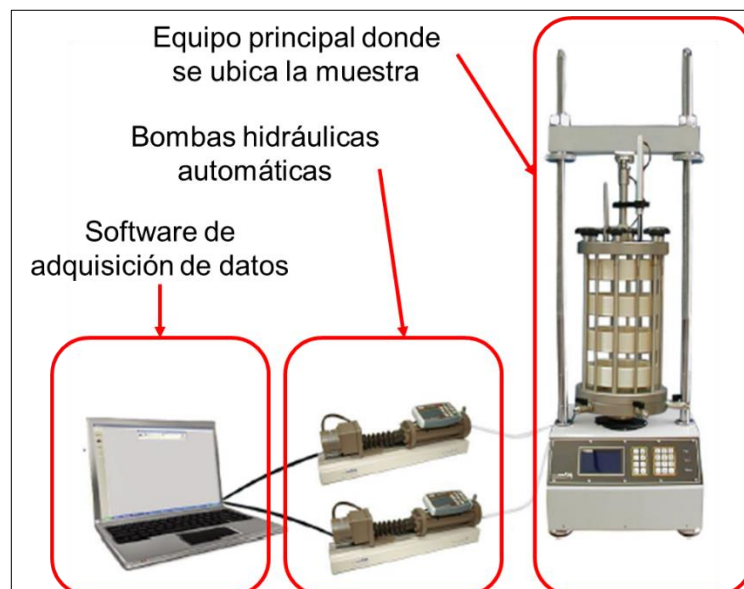


Figura 0.7 Equipo triaxial convencional

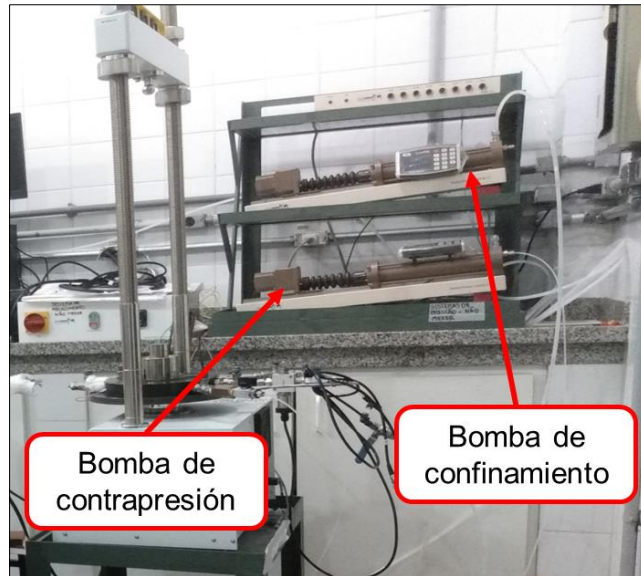


Figura 0.8 Bombas de control de presión en el equipo triaxial.

3.2.4 Triaxial térmico

Es un equipo adquirido recientemente por el Laboratorio de Centrífuga Geotécnica de la UENF. El triaxial térmico permite desarrollar investigaciones relacionadas con el comportamiento termomecánico de las arcillas, es un equipo que permite el control de la temperatura de los ensayos que se pueden realizar en el triaxial convencional.

Además de las partes de un triaxial convencional, el nuevo equipo fue reemplazado por una celda resistente al calor y un sistema de control de temperatura autónomo e independiente con tres termopares. La figura 3.9 muestra la celda triaxial térmica, los termopares y los cables que conducen el calentamiento por energía eléctrica. Cada uno se describirá en los elementos siguientes.

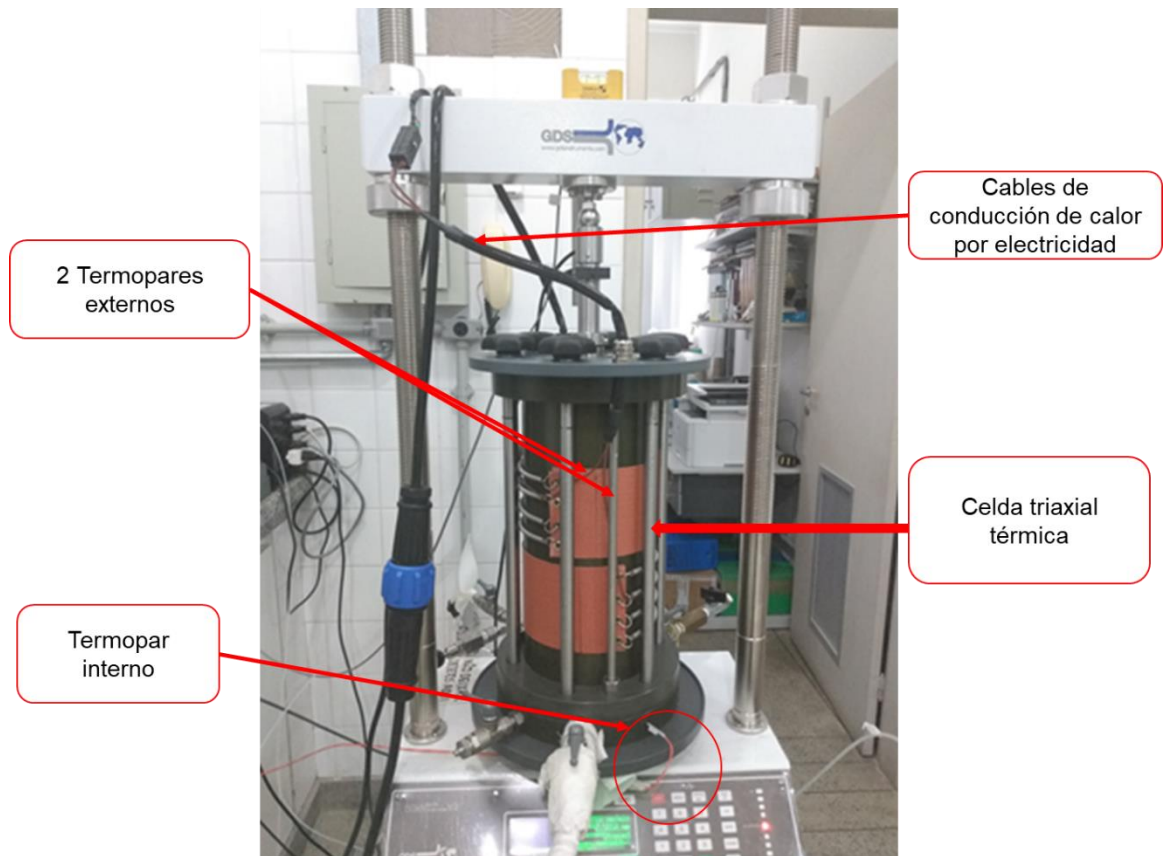


Figura 0.9 Partes principales de un triaxial térmico.



Figura 0.10 Cobertor de aislamiento térmico del triaxial térmico.



Figura 0.11 Celda térmica triaxial.



Figura 0.12 Equipo de control de temperatura.



Figura 0.13 Equipo triaxial térmico con todas sus partes.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Procedimiento para la reconstitución de muestras

Como se menciona en el ítem 3.2, a partir de una masa de arcilla homogeneizada con un contenido de humedad promedio de 91%, se reconstituyeron todas las muestras (CP). La muestra se describe como una arcilla marina deformada inalterada.

Para reconstituir una muestra se necesita una masa de suelo de 230 g. El procedimiento para colocar la masa en el molde bipartido (Figura 3.6) se describe a continuación:

- Primero: coloque papel de filtro en la base del molde, luego se introduce manualmente la masa total de 230.0g en el molde partido (Figura 3.9) mediante una ligera presión con las manos del técnico hasta que quede nivelada con la extensión del molde. Cualquier exceso de masa se retira y elimina.
- Segundo: colocar otro papel de filtro por encima del molde con extensión, y luego la tapa superior de aluminio, con el fin de distribuir la carga normal en el consolidómetro.
- Tercero: la masa contenida en el molde se coloca en el interior del consolidómetro. Para la reconstitución, el consolidómetro permite la aplicación de esfuerzos normales preestablecidos. Estos se distribuyeron en cinco etapas, que son: 7, 15, 30, 50 y 100 kPa como se muestra en la Tabla 6. Cada etapa tuvo una duración estándar de 24 horas.

En la Tabla 6, es posible registrar cada etapa de la preparación de las muestras. Las presiones ya están programadas y aparecen en la primera columna de la tabla. Así, al final de la última etapa, se pueden calcular el índice de vacíos de la muestra, la altura final de la muestra, el diámetro y finalmente el contenido de humedad final.

Tabla 3: Tabla de control para la reconstitución de las muestras.

Presión (kPa)	Hora y fecha inicial	Hora y fecha final	Presión inicial (kPa) (Pi)	Presión final (kPa) (Pf)	Deformación inicial (Di)	Deformación final (Df)
7						
15						
30						
50						
100						

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

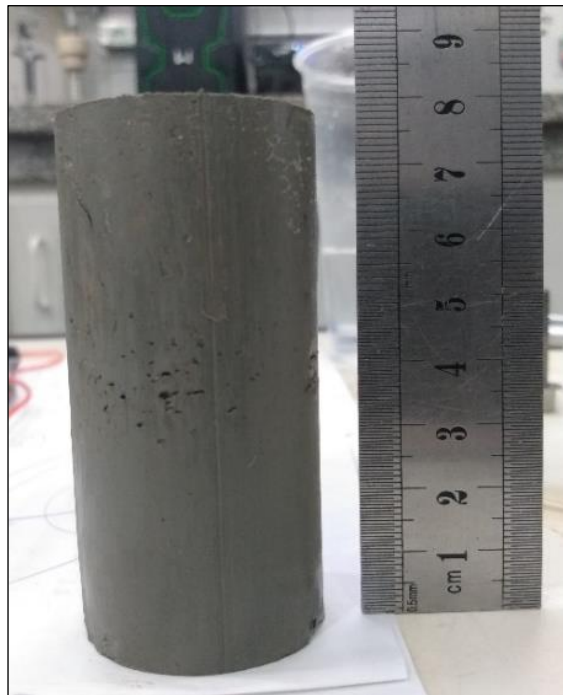


Figura 0.14 Muestra N°1.

Después de completar la etapa de 100KPa, la muestra se extrae cuidadosamente del molde bipartido y se retira cualquier exceso de altura, dejando todas las muestras con las dimensiones aproximadas de 3.8 cm de diámetro y 7.6 cm de altura, como se muestra en la Figura 3.14.

3.3.2 Procedimiento estándar para ensayos de consolidación térmica a temperaturas superiores al ambiente (temperatura controlada)

Los ensayos de consolidación térmica se realizarán en un equipo denominado triaxial térmico del cual se describe en el ítem 3.2.4. Por tanto, todos los ensayos de consolidación térmica están en condiciones isotrópicas ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$).

Para determinar el procedimiento estándar de los ensayos se realizaron pruebas con diferentes metodologías, para luego optar por el procedimiento con mejores resultados.

El procedimiento que se presenta en la figura 3.15 permitirá observar y recopilar datos por separado de las deformaciones volumétricas totales por efectos de la consolidación mecánica (temperatura ambiente) y la consolidación térmica (mayor a temperatura ambiente).

Los datos experimentales recopilados de los ensayos de consolidación térmica permitirán cumplir con el tercer objetivo específico de la presente tesis, el cual es validar la formulación matemática propuesta.

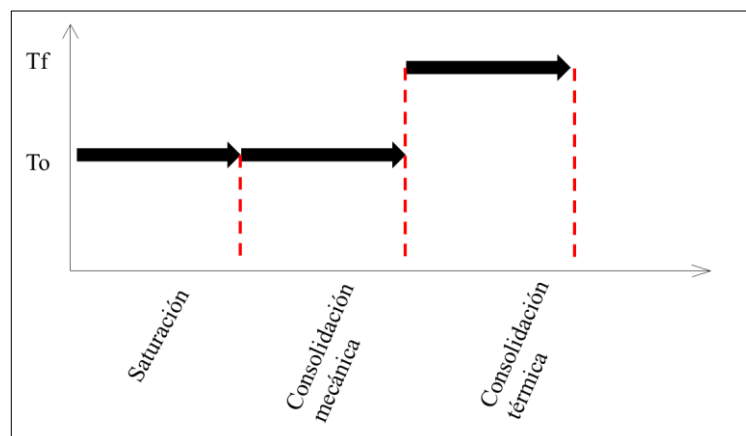


Figura 0.15 Procedimiento estándar para ensayos de consolidación térmica a temperaturas superiores al ambiente (temperatura controlada).

A continuación, se describe cada etapa de la metodología que se presenta en la figura 3.15:

- **Saturación:** Proceso de saturación del equipo triaxial para garantizar que no exista burbujas de aire en las vías de inyección de agua a presión controlada. Luego de instalar la muestra en el equipo se procede a la saturación de la muestra hasta obtener un $B \geq 0.98$. El tiempo de saturación de una muestra tiene una duración mínima de 6 horas.



Figura 0.16 Saturación del equipo triaxial.

- **Consolidación mecánica:** Consiste en la consolidación isotrópica de la muestra a temperatura ambiente en el triaxial térmico. Después de la saturación, para someter la muestra a un determinado esfuerzo efectivo (100kPa, 200kPa y 400kPa) se incrementa la presión confinante y la contrapresión se mantiene constante en el sistema triaxial. Los ensayos se detienen cuando la curva de consolidación que muestra el software en tiempo real, indique que la muestra se encuentra en la etapa de la consolidación secundaria. Un ensayo de consolidación mecánica tiene una duración mínima de 24 horas.
- **Consolidación térmica:** Consiste en la consolidación de la muestra a una temperatura constante mayor al ambiente. Esta etapa empieza cuando la muestra se encuentra en la etapa de la consolidación secundaria, desde ese

momento se incrementa la temperatura en la celda triaxial a una velocidad constante de $0.5^{\circ}\text{C} / \text{min}$ hasta llegar a la temperatura objetivo de 40°C o 55°C , para luego mantenerlas constante por un tiempo mínimo de 24 horas. Durante esta etapa es importante prevenir cualquier tipo de intercambio térmico con el medio.



Figura 0.17 Instalación de la celda triaxial térmica.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentará los resultados y discusiones de la presente tesis, empezando por la clasificación geotécnica del suelo en estudio, los ensayos triaxiales convencionales y térmicos en laboratorio hasta la formulación matemática del objetivo principal.

4.1 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LABORATORIO

4.1.1 Clasificación del suelo

Contenido de humedad natural del suelo en estudio

El contenido de humedad natural de una muestra inalterada se determinó según la normativa ASTM D 2216 el cual se presenta en la tabla 4. La humedad natural del suelo en estudio es del 91.2%.

Tabla 4: Contenido de humedad natural.

Contenido de humedad			
capsula n°	10	238	82
suelo+tara+agua (g)	49.54	51	56
suelo+tara (g)	32.9	33.53	35.23
tara (g)	14.84	14.18	14.23
agua (g)	16.64	17.47	16.86
suelo seco (g)	18.06	19.35	18.56
Humedad (%)	92.14	90.28	90.87
Humedad média (%)	91.2		

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Límites de consistencia

Los límites de Atterberg, límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Estos límites se dividen en tres tipos:



- Límite líquido: cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la copa de Casagrande.
- Límite plástico: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.
- Límite de retracción o contracción: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

Los límites mencionados fueron determinados mediante la normativa ASTM D4318, el cual permitirá clasificar el tipo suelo en que se estudia. En la tabla 5 se presenta los resultados de los límites de consistencia determinados en laboratorio.

Tabla 5: Resultados de los límites de consistencia.

Límites de Consistencia			
Interesado	Hidden J. Machaca Huancollo	Fecha:	13/02/2020
Local:	Bacia de Campos	Ensayo:	1
Pozo:	1605		
Muestra:	Arcilla marina inalterada		

Límite Líquido						
Capsula No.	139	92	169	158	36	
Peso tara+suelo+agua (g)	11.52	11.92	12.38	11.45	12.67	
Peso tara+suelo (g)	8.76	8.76	9.06	8.67	9.21	
Peso da agua (g)	2.76	3.16	3.32	2.78	3.46	
Peso tara (g)	6.09	5.74	5.94	6.08	5.99	
Peso de suelo seco (g)	2.67	3.02	3.12	2.59	3.22	
Humedad (%)	103.370787	104.635762	106.410256	107.335907	107.453416	
Número de golpes	45	30	24	21	17	

Límite plástico						
Capsula No.	183	13	12	8	187	
Peso tara+suelo+agua (g)	7.45	8	5.76	8.03	7.08	
Peso tara+suelo (g)	7.17	7.71	5.43	7.7	6.79	
Peso da agua (g)	0.28	0.29	0.33	0.33	0.29	
Peso tara (g)	6.47	7.02	4.63	6.89	6.06	
Peso de suelo seco (g)	0.7	0.69	0.8	0.81	0.73	
Humedad (%)	40	42.0289855	41.25	40.7407407	39.7260274	
Humedad media (%)	40.75					

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

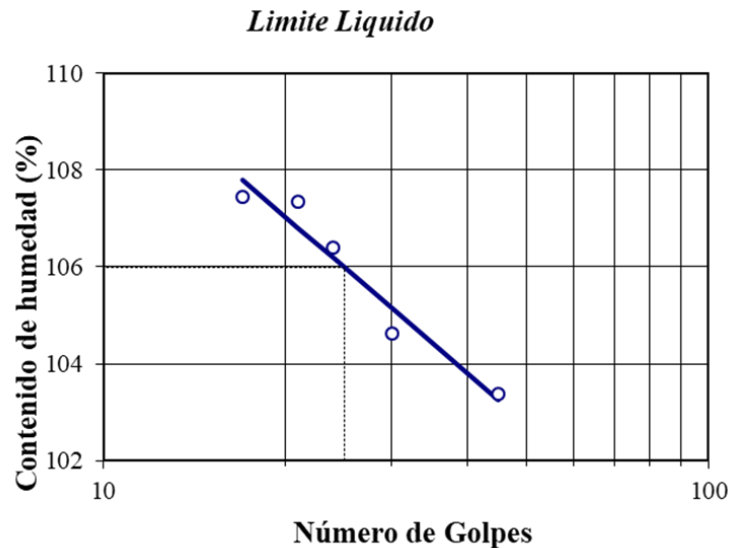


Figura 0.1: Curva del ensayo estándar límite líquido.

En resumen, los límites de consistencia resultaron:

Límite Liquido	106.00 %
Límite plástico	40.75 %
IP	65.25 %

Los límites de consistencia obtenidos sugieren que la arcilla es altamente plástica con un IP del 65.2%. Según el SUCS la muestra en estudio es clasificado como CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad).

Análisis granulométrico

El ensayo se realizó de acuerdo a la normativa ASTM D422, donde presenta los procedimientos para el análisis granulométrico por tamizado y sedimentación. En la figura 4.2 se presenta la curva granulométrica determinada en el ensayo.

De acuerdo a la curva granulométrica se observa que el material es muy fino, con solo un 2.4% de arena fina, un 27.5% de limo y un 70.1% de arcilla. La fracción fina con alta plasticidad y alta actividad coloidal de 0.93.

Características Granulométricas
Fraciones granulométricas y Clasificación Unificada

Grava (%)			Arena (%)			Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación (SUCS)
Grueso	Medio	Fino	Grueso	Media	Fina			
-	-	-	-	-	2.4	27.5	70.1	-

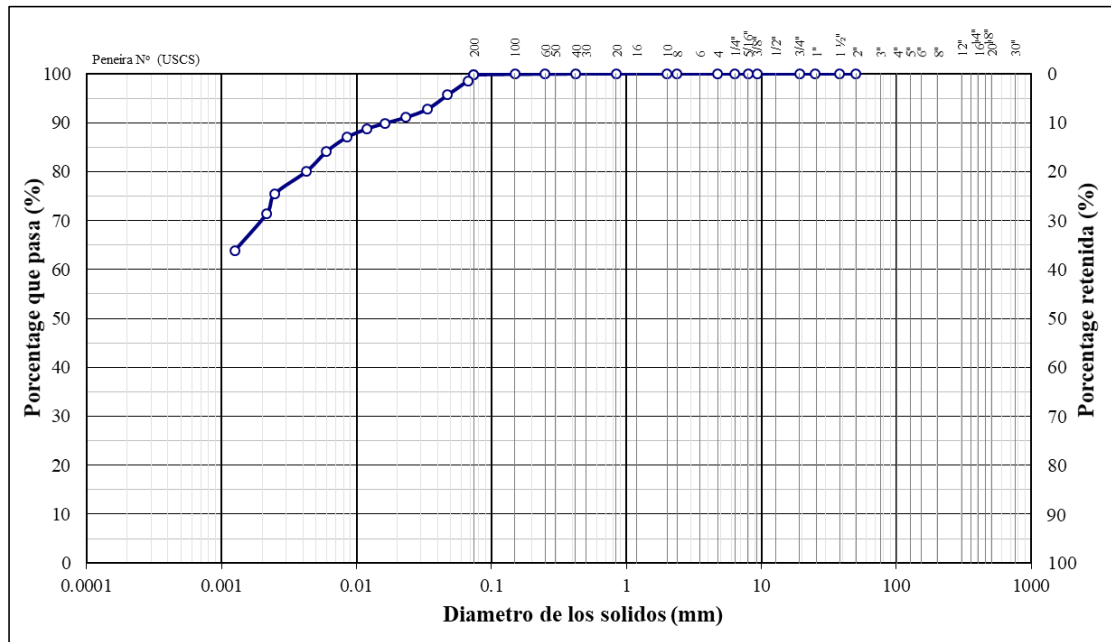


Figura 0.2: ensayo de análisis granulométrico.

Gravedad específica de los sólidos (Gs)

La gravedad específica de los sólidos del suelo es un parámetro muy importante para el estudio de una muestra, por ser una variable adimensional. Para determinar este parámetro se realiza un ensayo en laboratorio según las recomendaciones de la Norma ASTM D854.

La Gravedad Específica de los Sólidos del suelo es la relación entre el peso en el aire de los sólidos de un espécimen de suelo a una temperatura dada, y el peso en el aire de un volumen igual (al de los sólidos) de agua destilada a la misma temperatura.

Según la Tabla 6 el Gs del suelo en estudio en la presente tesis es 2.69.



Tabla 6: Ensayo de gravedad específica de los sólidos (Gs).

Gravedad Específica de los Sólidos (Gs)			
Interesado	Hiden J. Machaca Huancollo	Fecha:	13/02/2020
Local:	Bacia de Campos	Ensayo:	1
Pozo:	1605		
Muestra:	Arcilla marina inalterada		

Picnometro no.	4	3	12
Volumen nominal del frasco (ml)	100	100	100
T = temperatura (oC)	30	29	28
Wfa = peso frasco+agua	158.3	158.33	158.36
Ws = peso del suelo	8.32	8.32	8.32
Wfas = peso frasco+agua+suelo	163.54	163.56	163.58
Ws-Wfas+Wfa	3.08	3.09	3.1
Gwt (segun abaco)	0.996	0.996	0.996
Densidad de los solidos: $G_s = (W_s \text{ Gwt}) / (W_s - W_{fas} + W_{fa})$	2.690	2.682	2.674
Gravedad especifica de los solidos: $G_{ds} = G_s / G_{wt} (20oC)$	2.694	2.686	2.679
Promedio: Gs	2.68		
Promedio: Gds	2.69		

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Consolidación edométrica

La consolidación edométrica refiere a un ensayo en laboratorio que se realiza según las recomendaciones de la norma ASTM D-2435. Este ensayo permite determinar las propiedades de consolidación de un suelo. Para ello se aplican cargas diferentes a una muestra del terreno y se cuantifica la respuesta de la deformación. Los resultados se usan como pronóstico del suelo a consecuencia de un cambio del esfuerzo efectivo.

Según la Tabla 7 el coeficiente de compresión (Cc) resulto 1.01 y el coeficiente de expansión (Cs) fue de 0.12, los cuales indican que el suelo en estudio es de alta compresibilidad. El ensayo también permite observar la variación del coeficiente de consolidación vertical (Cv) y la permeabilidad total (K).

Tabla 7: Ensayo de consolidación edométrica.

Resultados de Ensayo de Consolidación Edométrica

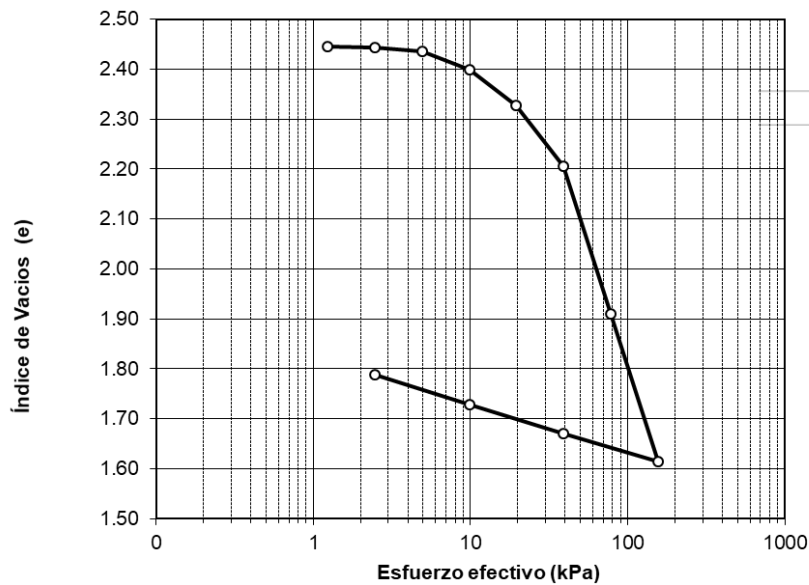
Interesado: Hiden J. Machaca Huancollo	Fecha: 12/05/2020
Obra: Investigacion	Ensayo: 1
Sondaje: RL1605A	Muestra: M1

Datos de la muestra

Diametro: 4.99 cm	Área inicial: 19.56 cm ²	Peso total de la muestra: 55.540 g
Altura inicial: 1.91 cm	Humedad inicial: 91.2 %	Peso de la muestra seca: 29.046 g
Volumen de la muestra: 37.35 cm ³	Índice vacios inicial: 2.45	Peso específico: 14.57 kN/m ³
Volumen de sólidos: 10.84 cm ³	Grado de saturacion inicial: 99.9 %	Peso específico seco: 7.62 kN/m ³
Volumen de vacios: 26.51 cm ³	Porosidad inicial: 71.0 %	Peso específico saturado: 14.58 kN/m ³
Volumen de agua: 26.49 cm ³	Humedad final: 76.7 %	

Planilla de Resultados del Ensayo

Est. (nº)	Esfuerzo normal (kPa)	Altura inicial: Ho (mm)	Altura final: Hf (mm)	Variación da altura: DH (mm)	Altura média: Hm (mm)	t90 (s)	cv (cm ² /s)	e	e/eo	av (1/kPa)	mv (1/kPa)	k (cm/s)
-	0.000	-	-	-	-			2.446	1.000	-	-	
1	1.226	19.1	19.09	0.01	19.095			2.445	0.999	0.001	0.000	
2	2.452	19.09	19.08	0.01	19.085			2.443	0.999	0.001	0.000	
3	4.904	19.08	19.04	0.04	19.06			2.436	0.996	0.003	0.001	
4	9.808	19.04	18.832	0.208	18.936			2.398	0.980	0.008	0.002	
5	19.617	18.832	18.44	0.392	18.636	2160	0.000341	2.327	0.951	0.007	0.002	7.23E-07
6	39.234	18.44	17.762	0.678	18.101	3744.6	0.000185	2.205	0.901	0.006	0.002	3.48E-07
7	78.468	17.762	16.122	1.64	16.942	6242.4	9.75E-05	1.909	0.780	0.008	0.003	2.29E-07
8	156.935	16.122	14.49	1.632	15.306	5078.4	9.78E-05	1.615	0.660	0.004	0.001	1.26E-07
9	39.234	14.49	14.8	-0.31	14.645			1.671	0.683	0.000	0.000	
10	9.808	14.8	15.12	-0.32	14.96			1.728	0.706	0.002	0.001	
11	2.452	15.12	15.45	-0.33	15.285			1.788	0.731	0.008	0.003	



FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



4.1.2 Parámetros de resistencia del suelo

En el presente ítem se presentará los ensayos triaxiales realizados a temperatura ambiente para determinar los parámetros de resistencia de la arcilla. En los siguientes párrafos se presenta los procedentitos empleados respectivamente.

El uso de un equipo de triaxial permite observar y determinar las propiedades de una muestra dentro del campo de esfuerzos efectivos. Por tanto, se realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados (CIU) a temperatura ambiente, que permitieron determinar la variación de la resistencia no drenada y la presión de poro en relación a la deformación axial. Los resultados también permitirán observar la trayectoria de esfuerzos totales y efectivos.

Como primer paso consiste en determinar las propiedades físicas iniciales de la muestra reconstituida antes de instalar en el equipo triaxial. Las propiedades son la humedad inicial, índice de vacíos inicial, peso específico inicial y la porosidad inicial. Para ello, es necesario registrar los siguientes datos:

- Pesar tres muestras en taras pequeñas para determinar el contenido de humedad inicial.
- Medir el diámetro y la altura de la muestra.
- Pesar la muestra.

Estos procedimientos pueden observarse en la figura 4.3.

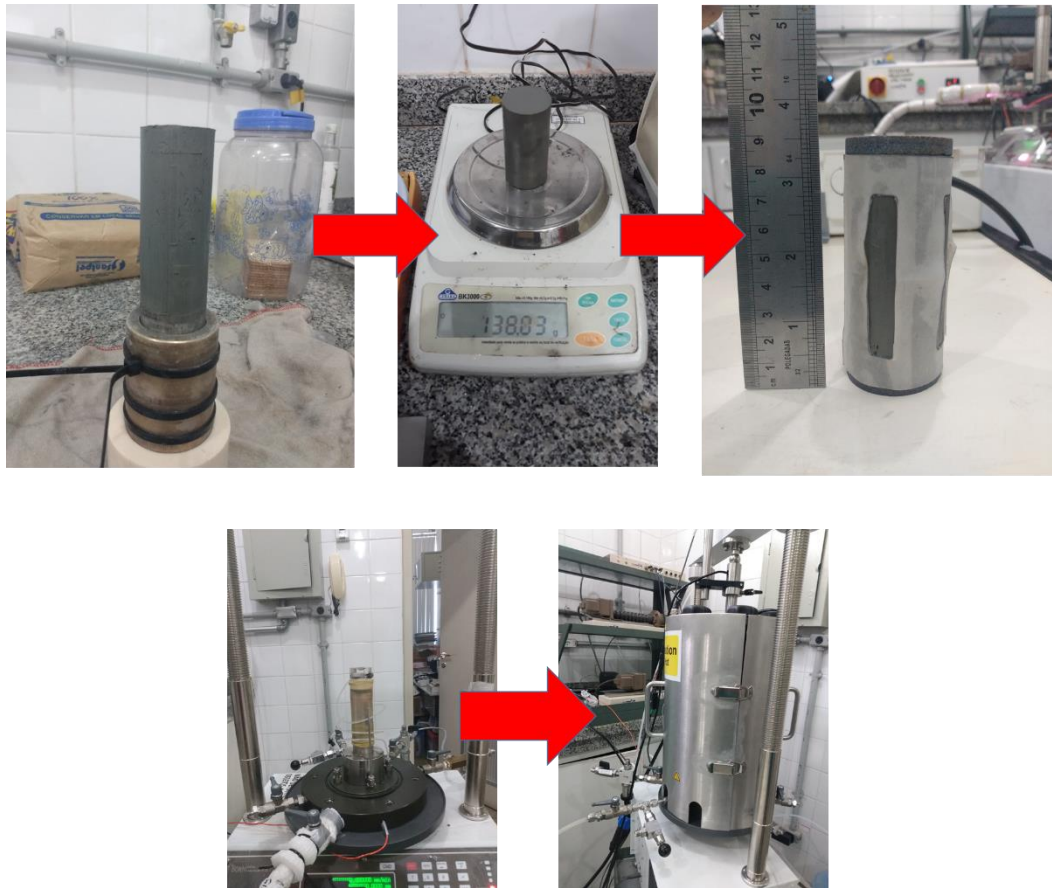


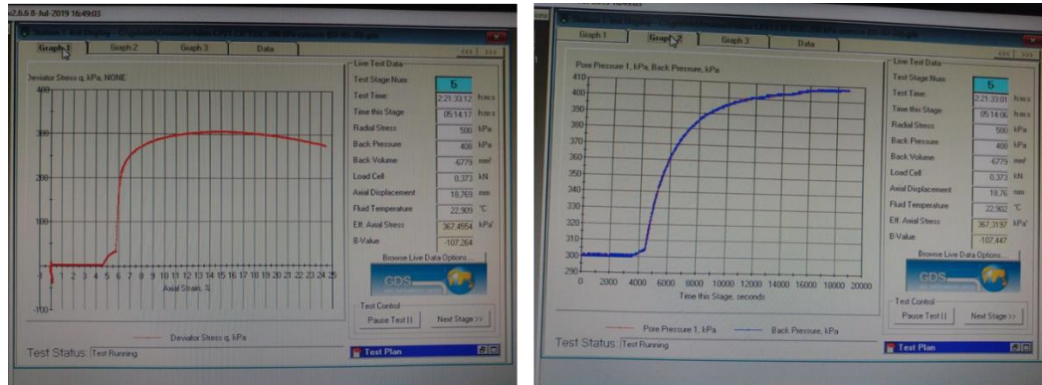
Figura 0.3 Proceso de instalación de las muestras en el equipo triaxial.

Cuando se termine de instalar la muestra en el equipo triaxial, por ser ya un equipo automatizado se recurre a programar en el software de control del ensayo del modo siguiente:

- Primero: proceso de saturación hasta alcanzar un valor de B mayor o igual a 0.98.
- Segundo: proceso de consolidación mecánica hasta observar la etapa de la consolidación secundaria.
- Tercero: inicio del proceso de cizallamiento no drenado a una velocidad de 0.06mm/min.

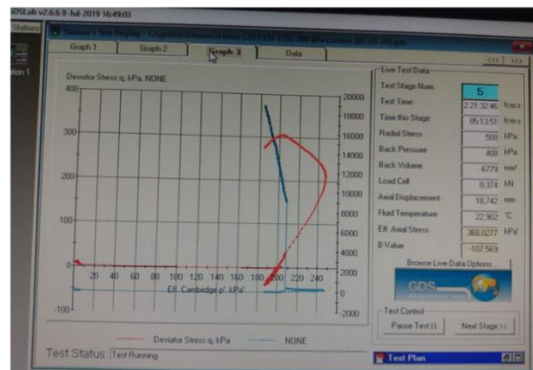
Después de programar las etapas a seguir en el software de control se inicia el ensayo. Para continuar durante el ensayo se puede observar las gráficas en tiempo real

que nos permiten cerciorarse del correcto funcionamiento del equipo, como se observa en la figura 4.4. Las variables a observar pueden ser el esfuerzo desviador, presión de poro, esfuerzo medio efectivo y la variación de volumen. La primera característica de un ensayo triaxial no drenado es que el volumen se mantiene constante.



Def. Axial ($\epsilon\%$) Vs Esf. Desviador (q)

Def. Axial ($\epsilon\%$) Vs Pres. de poro (u)



Esf. Medio Efectivo (p') Vs Esf. Desviador (q)

Figura 0.4 Recolección de datos en tiempo real del ensayo en el Software.

Con el objetivo de trazar la Línea de Estado Crítico (LEC) del suelo en estudio, se realizó tres ensayos triaxiales tipo CIU con esfuerzos confinantes de 100, 200 y 400kPa respectivamente. Por tanto, prosiguiendo con la presentación de los resultados, en la Tabla 8 se muestra la planilla típica de cálculo de las propiedades de cada uno de los especímenes; en donde los datos en color negro son adquiridos en laboratorio, y, los datos en color azul se adquieren a través de cálculos matemáticos típicamente conocidos en la



mecánica de suelos, por último los datos en color rojo son las respectivas propiedades de la muestra en estudio que se obtuvieron a través de los anteriores datos.

Las propiedades respectivas calculadas en color rojo, cuentan con su descripción en la misma planilla respectivamente. Los cuales se mencionan a continuación:

- Humedad inicial de la muestra.
- Índice de vacíos inicial de la muestra.
- Porosidad inicial de la muestra.
- Peso específico saturado inicial de la muestra.
- Volumen total de deformación de la muestra después de la consolidación mecánica.
- Índice de vacíos final mecánico de la muestra (después de la consolidación mecánica).

Tabla 8: Planilla de cálculo de las propiedades de los especímenes.

Cuerpo de prueba	CPI		CP2		CP3	
Muestra	Arcilla marina		Arcilla marina		Arcilla marina	
Ensayo	CIU		CIU		CIU	
Fecha	17/10/20		04/10/20		10/10/20	
σ_3 (kPa)	100		200		400	
OCR	1.00		1.00		1.00	
Temperatura (°c)	25°C		25°C		25°C	
B	0.97		0.97		0.97	
capsula n ^o	94	88			137	87
suelo+tara+água (g)	8.580	21.300	14.190	17.640	14.190	17.640
suelo+tara (g)	7.420	15.530	10.800	12.800	10.812	12.811
tara (g)	5.950	5.710	6.130	6.120	6.130	6.120
água (g)	1.160	5.770	3.390	4.840	3.378	4.829
suelo seco (g)	1.470	9.820	4.670	6.680	4.682	6.691
Humedad (%)	73.789	71.589	72.591	72.455	72.149	72.172
w_i = Humedad media inicial (%)	72.69		72.52		72.16	
D = diametro (cm)	3.78		3.80		3.84	
H _o = altura inicial (cm)	7.67		7.66		7.68	
W _{STaA} = peso de suelo+tara+água (g)	134.89		135.69		138.03	
W _{Ta} = peso tara (g)	0.00		0.00		0.00	
G _S (g/cm ³)	2.690		2.690		2.690	
γ_w = peso específico da água (g/cm ³)	1.00		1.00		1.00	
A = Area (cm²)	11.22		11.34		11.58	
V_{Ti} = Volumen total inicial (cm³)	86.07		86.87		88.94	
W_T = peso total del suelo (g)	134.89		135.69		138.03	
γ = peso específico (g/cm ³)	1.57		1.56		1.55	
γ_d = peso específico seco (g/cm ³)	0.91		0.91		0.90	
W_s = peso del suelo seco (g)	78.11		78.65		80.18	
W_w = peso água (g)	56.78		57.04		57.85	
V_S = volumen de los sólidos (cm³)	29.04		29.24		29.80	
V_{Vi} = volumen de vacios inicial (cm³)	57.04		57.64		59.14	
V_w = volumen del água (cm³)	56.78		57.04		57.85	
V_A = volumen de aire (cm³)	0.26		0.60		1.28	
S = grado de saturación(%)	99.55		98.97		97.83	
e_o = índice de vacios	1.96		1.97		1.98	
n = porosidade (%)	66.26		66.34		66.49	
γ_{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1.57		1.57		1.57	
γ_{sub} = peso específico sumer. (g/cm ³)	0.57		0.57		0.57	
capsula n ^o	188	137	188	39	83	50
suelo+tara+água (g)	18.050	19.650	17.130	23.990	19.420	17.210
suelo+tara (g)	13.311	14.394	13.037	17.697	15.203	13.499
tara (g)	5.880	6.100	5.880	6.470	6.220	5.730
água (g)	4.739	5.256	4.093	6.293	4.217	3.711
suelo seco (g)	7.431	8.294	7.157	11.227	8.983	7.769
Humedad (%)	63.773	63.371	57.189	56.052	46.944	47.767
w_f = Humedad média final (%)	63.57		56.62		47.36	
ΔV = Variacion de volumen despues consolidación (cm ³)	12.27		18.21		23.87	
V_{Tf} = Volumen total final (cm³)	73.80		68.66		65.08	
V_{Vf} = volumen de vacios final (cm³)	44.77		39.43		35.27	
e_f = índice de vacios final mecanico	1.5416		1.3484		1.1834	
e_f = índice de vacios final + termico	1.5416		1.3484		1.1834	
γ_d = peso específico seco final (g/cm ³)	1.058		1.145		1.232	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Las Figuras 4.5 y 4.6 presentan las curvas de esfuerzo desviador (σ_d) y presión de poro (Δu) x deformación axial (ϵ_1) de los ensayos E1, E2, E3. En la Figura 4.8 se observa que los ensayos E1, E2, E3 alcanzaron una resistencia al corte no drenado de 85.4kPa, 162.5kPa y 317.17kPa respectivamente. Se puede decir que cuanto mayor sea el esfuerzo confinante, mayor será la resistencia y el incremento de presión de poro, como se muestra en la Figura 4.6.

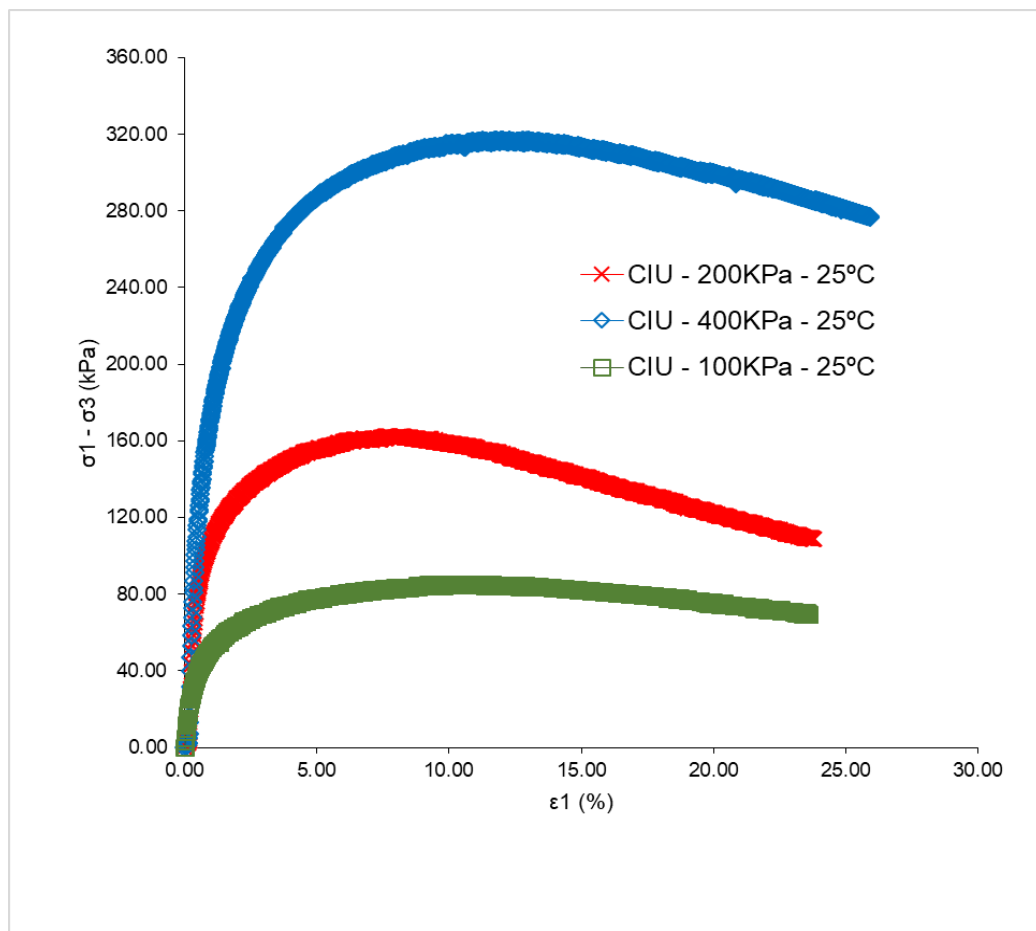


Figura 0.5 Curvas de deformación axial vs esfuerzo desviador.

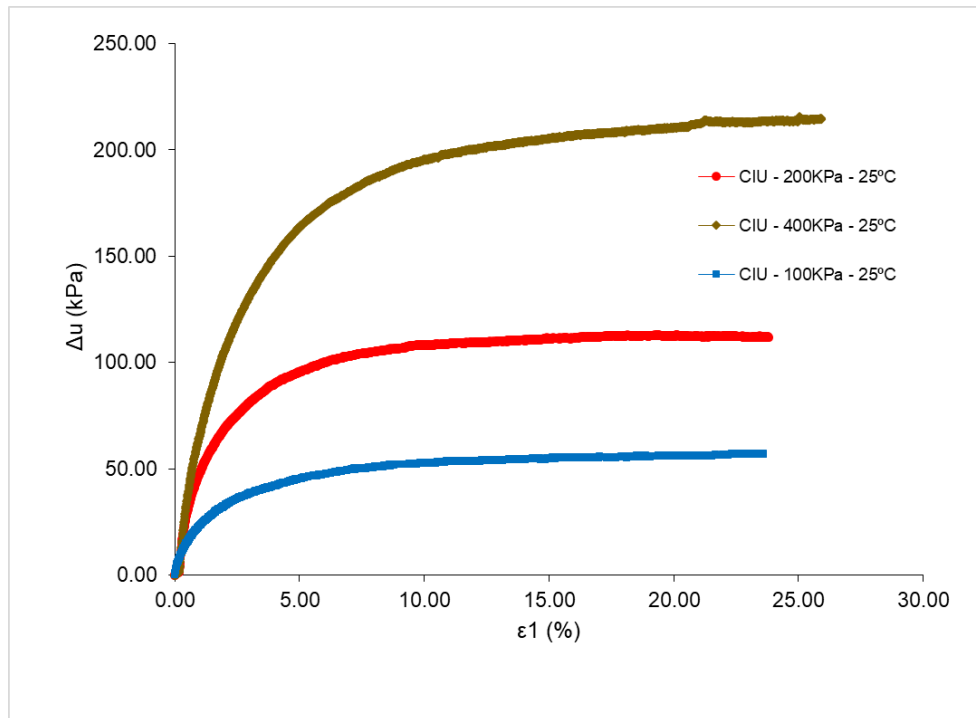


Figura 0.6 Curvas de deformación axial vs incremento de la presión de poro.

Con los resultados presentados en las figuras 4.5 y 4.6, es posible determinar la trayectoria de los esfuerzos efectivos y totales de los ensayos. La trayectoria de los esfuerzos efectivos de un espécimen se observa en un gráfico bidimensional donde el eje de abscisas está representado por la variable del esfuerzo medio efectivo (p') y el eje de las ordenadas por la variable del esfuerzo desviador (q). Las equivalencias de las variables p' y q se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad \text{Eq. 0.1}$$

$$p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3 \quad \text{Eq. 0.2}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 0.3}$$

Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos horizontales σ_2 y σ_3 en ensayos desarrollados en el triaxial convencional son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$) por la geometría circular de la celda (condición axisimétrica), por lo tanto, los parámetros p' y q tendrían las siguientes equivalencias:

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \quad \text{Eq. 0.4}$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 \quad \text{Eq. 0.5}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 0.6}$$

La figura 4.7 muestra la trayectoria de los esfuerzos efectivos de los ensayos triaxiales respectivamente. Se puede observar la disminución del esfuerzo medio efectivo (p') durante la falla hasta alcanzar la Línea de Estado Crítico (LEC - envolvente). Los resultados permitieron determinar una envolvente de $M= 1.04$ con un ángulo de rozamiento interno efectivo (ϕ') de 24.4° .

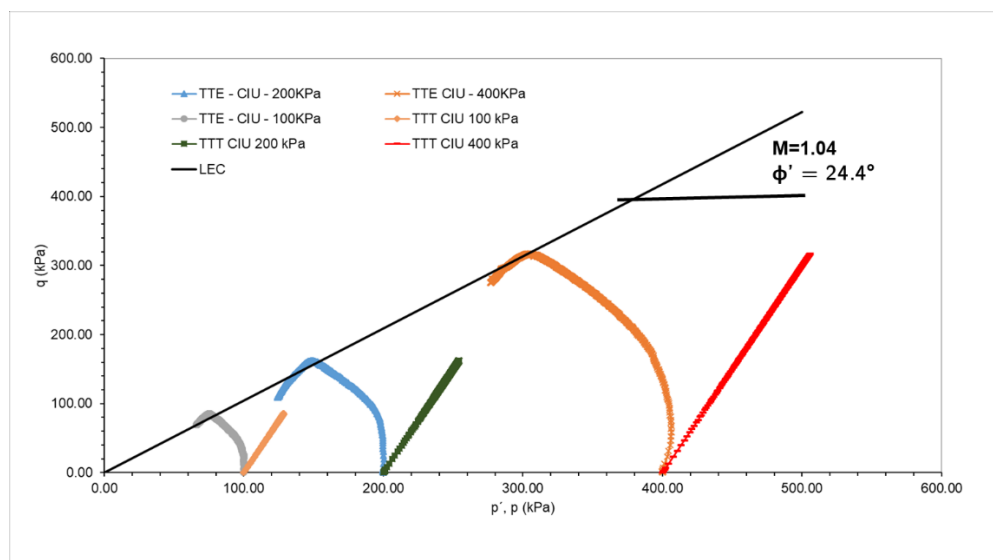


Figura 0.7 Trayectorias de esfuerzos efectivos y totales de las muestras.

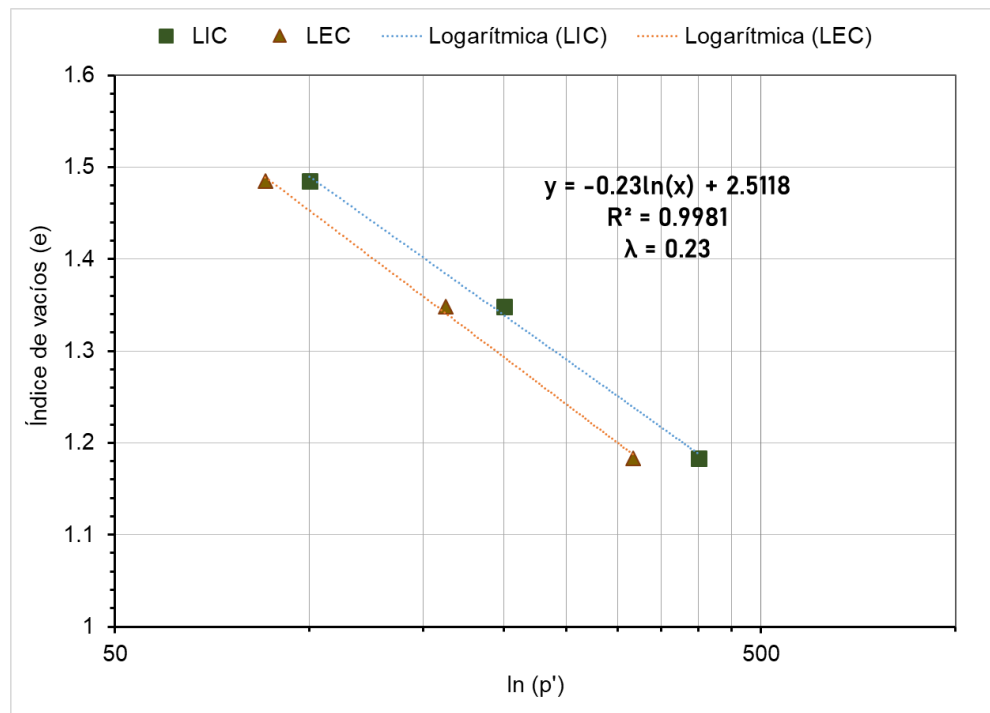


Figura 0.8 Índice de vacíos vs esfuerzo medio efectivo.

4.1.3 Ensayos de consolidación térmica

En el presente ítem se presenta los resultados de los ensayos de consolidación térmica para cumplir con el objetivo principal de la presente tesis.

La metodología empleada para realizar los ensayos de consolidación térmica ya se presentó en el ítem 3.3.2. Sin embargo, es necesario ampliar más en detalles sobre el procedimiento para su mejor entendimiento.

Como primer detalle se recalca que estos ensayos fueron realizados en un equipo triaxial térmico automatizado. Por tanto, todos los ensayos de consolidación se realizaron dentro de la teoría de una consolidación isotrópica.

En resumen, los ensayos consisten en instalar un espécimen en el triaxial térmico, para luego someter a un proceso consecutivo de saturación, consolidación mecánica y por último la consolidación térmica. Sin embargo, antes de instalar el espécimen en el equipo, es necesario determinar las propiedades físicas del mismo.

El procedimiento para determinar las propiedades físicas de los especímenes son los mismos ya descritos en el ítem 4.2.2. Estos procedimientos fueron empleados para todos los especímenes con el objetivo de ensayar en muestras con una semejanza máxima posible.

En la figura 4.9 se presenta el control a tiempo real del ensayo E6 (100kPa, 40°C), en donde se puede observar las curvas de consolidación mecánica y térmica respectivamente. Semejante comportamiento se observó para los demás ensayos, los cuales se presentarán en los próximos sub-ítems respectivamente.

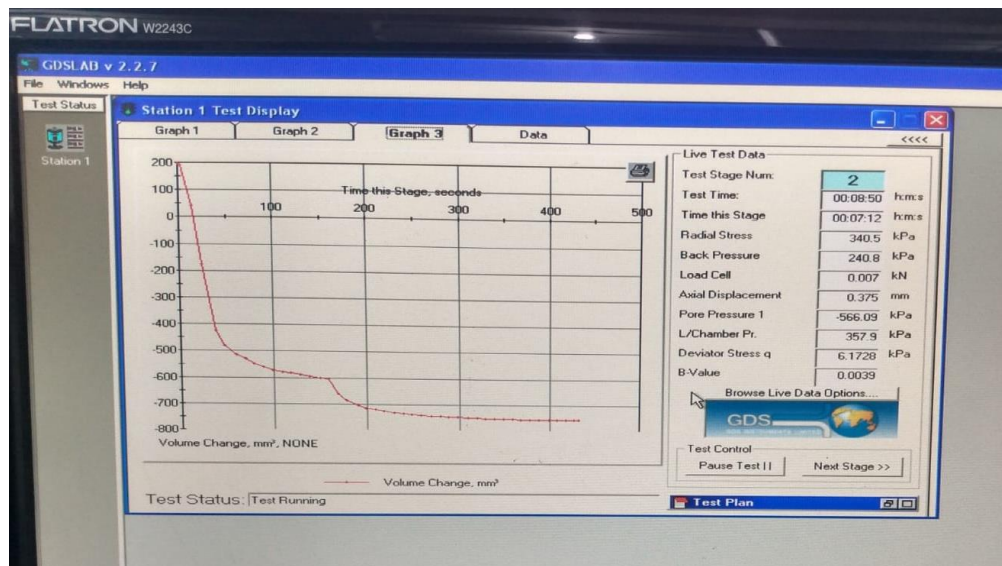


Figura 0.9 Curvas de consolidación mecánica y térmica del E6 en el software de control.

4.1.3.1 Ensayos de consolidación térmica a 40 ° C

Este ítem tiene como objetivo presentar y analizar los resultados de los ensayos de consolidación térmica a 40°C.

Como descrito en la metodología se realizaron tres ensayos de consolidación isotrópica térmica representados de la siguiente forma: E6, E7 y E8. Por consiguiente, son tres especímenes cuyas propiedades físicas de cada una se muestra en la Tabla 9. Para

determinar estas propiedades se siguieron los mismos procedimientos ya descritos en el ítem 4.2.2.

Sin embargo, a diferencia de los ensayos triaxiales mostrados en el ítem 4.2.2, estos especímenes no fueron cizallados. Porque el objetivo es obtener las curvas de consolidación térmica a 40°C de la forma como ya fue descrito en el ítem 3.3.2. En forma complementaria se aclara en cuanto los especímenes fueron extraídos del consolidometro, se determina los datos iniciales para después instalar en el triaxial térmico como se observa en la figura 4.10. Luego de instalar se coloca la celda triaxial térmica y sus componentes, para después programar en el software del equipo (GDSlaw v2.2.7) los procedimientos de saturación, consolidación mecánica y por último la consolidación térmica a 40°C.

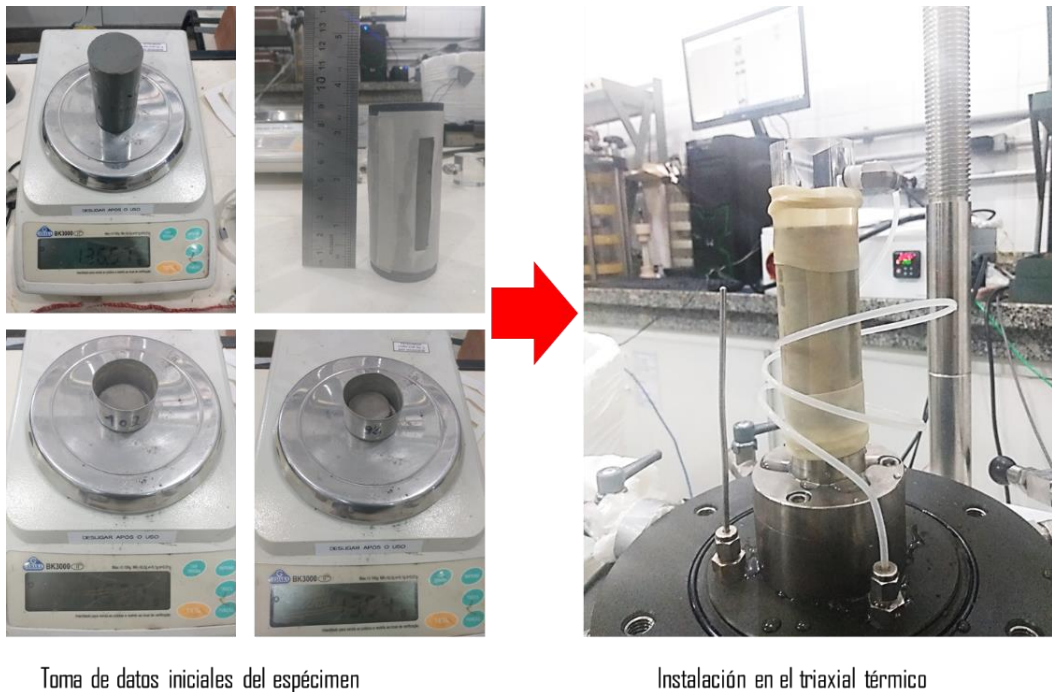


Figura 0.10 Procedimientos del ensayo de consolidación térmica.



Para adquirir la temperatura de 40°C se controló la velocidad de calentamiento a través de un aparato electrónico programada a conducir calor a 0.5°C/min. El tiempo empleado para llegar desde los 23°C (temperatura ambiente) hasta los 40°C por el aparato fue de 30min.

Los datos de variación de volumen, temperatura, presión de poro, tiempo, esfuerzos actuantes fueron controlados a través de sensores debidamente calibrados que se recopilaban por medio del software (GDSlaw v2.2.7).

Tabla 9: Planilla de cálculo de las propiedades de los ensayos E6, E7 y E8.

Cuerpo de prueba	CP6		CP7		CP8	
Muestra	Arcilla marina		Arcilla marina		Arcilla marina	
Ensayo	CIU		CIU		CIU	
Fecha	11/11/20		14/11/20		18/11/20	
σ_3 (kPa)	100		200		400	
OCR	1.00		1.00		1.00	
Temperatura (°C)	40°C		40°C		40°C	
B	0.99		0.99		0.99	
capsula n°	87	88	94	102	39	94
suelo+tara+agua (g)	20.030	17.800	19.760	21.240	22.470	18.500
suelo+tara (g)	14.090	13.100	13.820	15.280	16.130	13.140
tara (g)	6.090	5.700	5.980	6.010	6.650	6.220
agua (g)	5.940	4.700	5.940	5.960	6.340	5.360
suelo seco (g)	8.000	7.400	7.840	9.270	9.480	6.920
Humedad (%)	74.250	63.514	75.765	64.293	66.878	77.457
w_i = Humedad media inicial (%)	68.88		70.03		72.17	
D = diametro (cm)	3.79		3.84		3.80	
H _o = altura inicial (cm)	7.68		7.68		7.66	
W _{STaA} = peso de suelo+tara+agua (g)	136.07		136.57		134.90	
W _{Ta} = peso tara (g)	0.00		0.00		0.00	
G _S (g/cm ³)	2.690		2.690		2.690	
γ_w = peso específico da água (g/cm ³)	1.00		1.00		1.00	
A = Area (cm ²)	11.31		11.56		11.35	
V _{ti} = Volumen total inicial (cm ³)	86.83		88.74		86.91	
W _T = peso total del suelo (g)	136.07		136.57		134.90	
γ = peso específico (g/cm ³)	1.57		1.54		1.55	
γ_d = peso específico seco (g/cm ³)	0.93		0.91		0.90	
W _s = peso del suelo seco (g)	80.57		80.32		78.35	
W _w = peso del agua (g)	55.50		56.25		56.55	
V _S = volumen de los sólidos (cm ³)	29.95		29.86		29.13	
V _{vi} = volumen de vacios inicial (cm ³)	56.87		58.88		57.78	
V _w = volumen del agua (cm ³)	55.50		56.25		56.55	
V _A = volumen de aire (cm ³)	1.37		2.63		1.23	
S = grado de saturación(%)	97.58		95.54		97.86	
e _o = índice de vacios	1.90		1.97		1.98	
n = porosidad (%)	65.50		66.35		66.48	
γ_{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1.58		1.57		1.57	
γ_{sub} = peso específico sumer. (g/cm ³)	0.58		0.57		0.57	
capsula n°	39	50	78	87	39	94
suelo+tara+agua (g)	25.000	21.880	19.550	20.910	16.820	20.380
suelo+tara (g)	17.920	15.700	14.680	15.610	13.330	15.650
tara (g)	6.390	5.730	5.930	6.110	6.400	5.960
agua (g)	7.080	6.180	4.870	5.300	3.490	4.730
suelo seco (g)	11.530	9.970	8.750	9.500	6.930	6.990
Humedad (%)	61.405	61.986	55.657	55.789	50.361	48.813
w_f = Humedad média final (%)	61.70		55.72		49.59	
ΔV = Variación de volumen despues consolidación (cm ³)	12.85		18.95		25.11	
V _{tf} = Volumen total final (cm ³)	73.97		69.79		61.80	
V _{vf} = volumen de vacios final (cm ³)	44.02		39.93		32.67	
e _f = índice de vacios final mecanico	1.4824		1.3637		1.1464	
e _f = índice de vacios final + termico	1.4556		1.3170		1.0964	
γ_d = peso específico seco final (g/cm ³)	1.089		1.151		1.268	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



En la figura 4.11 se presentan las curvas de consolidación mecánica y térmica de los tres especímenes respectivamente. De las cuales se obtuvieron los datos más importantes para la presente tesis, los cuales son:

- El coeficiente de consolidación secundaria a temperatura ambiente ($C_{\alpha}(T_0)$);
- Las curvas de consolidación térmica.

En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se presentan las curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica, las cuales permitieron determinar los $C_{\alpha}(T_0)$ de cada espécimen. Además puede observarse en las mismas figuras que las curvas de consolidación térmica indican un incremento de deformaciones volumétricas aceleradas como predicho en la revisión bibliográfica, también se puede notar que estas deformaciones son mayores en cuanto mayor fue el esfuerzo efectivo actuante ($\sigma'3$).

Por tanto, se puede afirmar que el comportamiento térmico del suelo en estudio (arcilla de alta plasticidad) coincide con las conclusiones de anteriores estudios experimentales ya presentados en la revisión de literatura.

Por último, queda comprobar la validez de la ecuación propuesta en la presente tesis para predecir las deformaciones volumétricas por variaciones térmicas a través del método comparativo entre las curvas experimentales obtenidas con las graficadas por el modelo propuesto en el ítem 4.1.

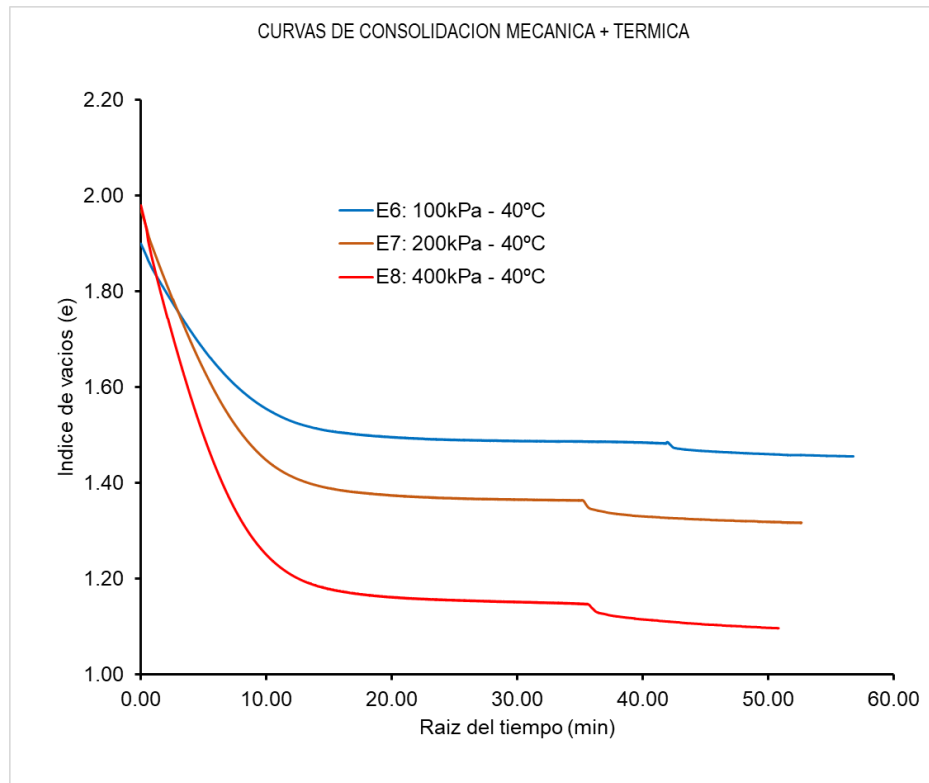


Figura 0.11 Curvas de consolidación mecánica más térmica a 40°C.

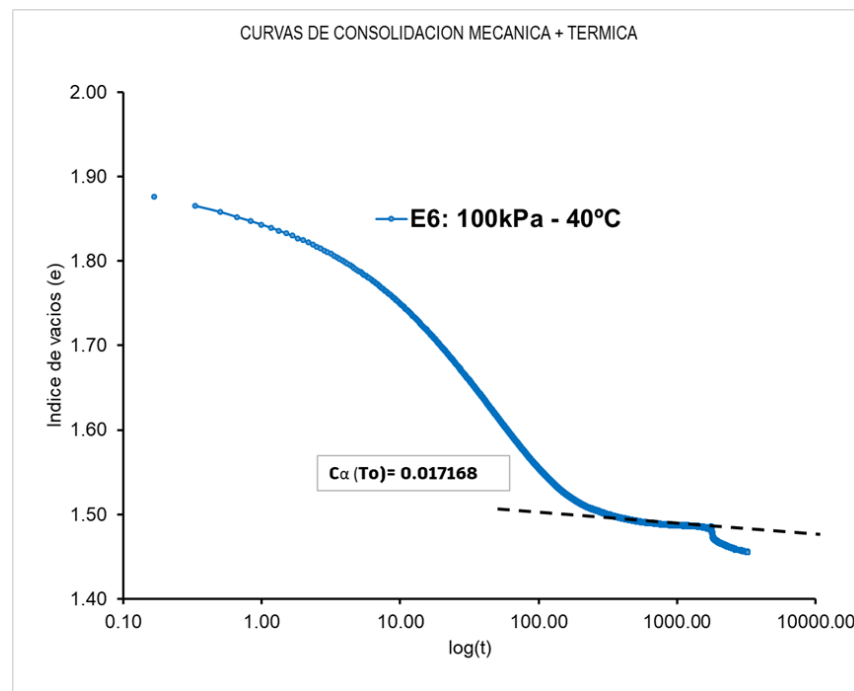


Figura 0.12 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E6.

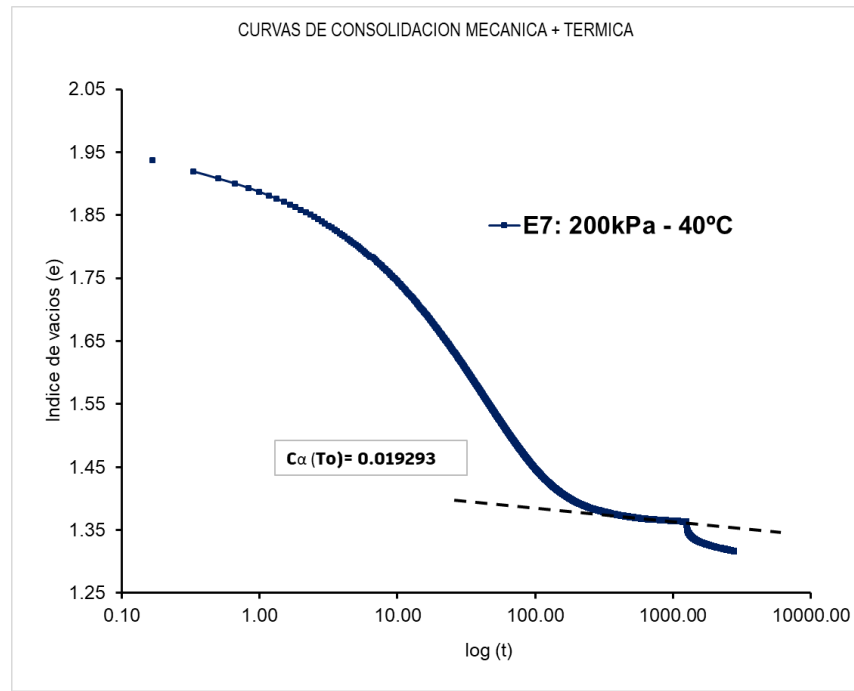


Figura 0.13 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E7.

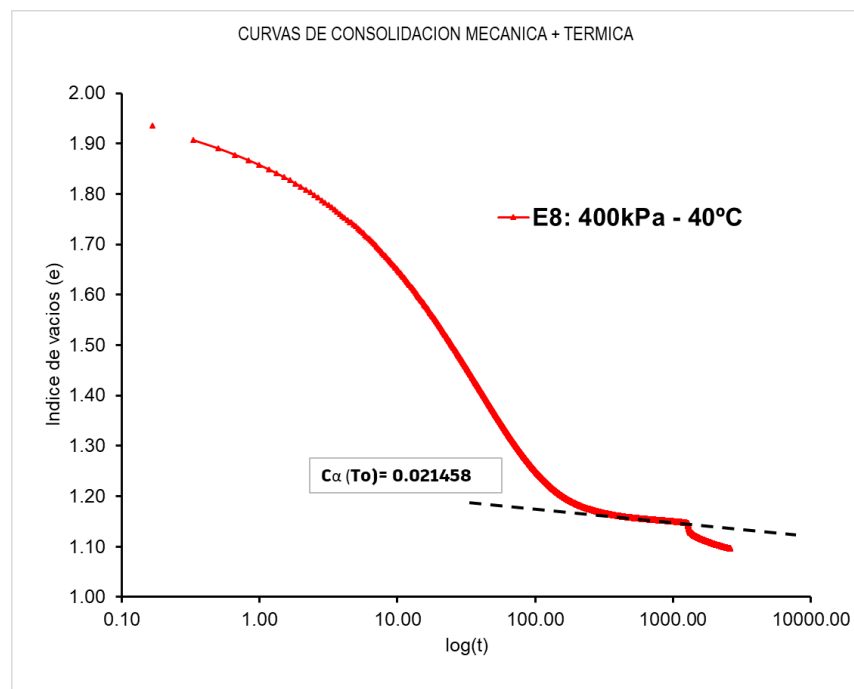


Figura 0.14 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E8.



4.1.3.2 Ensayos de consolidación térmica a 55 °C

Los ensayos que se presentan en este ítem son similares a los ensayos E6, E7 y E8, con la única diferencia en que se consolidaron térmicamente a 55°C. Estos ensayos permitirán complementar en la verificación más óptima al objetivo principal de la presente tesis.

Los ensayos pertenecientes a este ítem fueron denominados con los símbolos E9, E10 y E11, con sus respectivos especímenes (muestras de prueba) denominados CP9, CP10 y CP11 las cuales se presentan en la Tabla 10. El procedimiento empleado para el cálculo de sus propiedades físicas y la ejecución del ensayo en el equipo triaxial son los mismos como los presentados en los ítems 3.3.2 y 4.2.3.1.

Es necesario mencionar que la decisión de consolidar térmicamente los especímenes a 55°C se basó en la capacidad de soportar el incremento de la presión de vapor en la celda triaxial. Es decir, en cuanto mayor fuese la temperatura a consolidar mayor será la presión de vapor dentro de la celda triaxial, que en caso de no ser controlado puede llegar a una explosión térmica. Por tanto, los límites de temperatura en que se pueden ensayar dependen de las recomendaciones del fabricante del equipo, en este caso fue una Tmax de 65°C.

Tabla 10: Planilla de cálculo de las propiedades físicas de los ensayos E9, E10 y E11.

Cuerpo de prueba	CP9		CP10		CP11	
Muestra	Arcilla marina		Arcilla marina		Arcilla marina	
Ensayo	CIU		CIU		CIU	
Fecha	10/12/20		09/03/21		16/03/21	
σ_3 (kPa)	100		200		400	
OCR	1.00		1.00		1.00	
Temperatura (°c)	55°C		55°C		55°C	
B	0.99		0.99		0.99	
capsula n ^o	39	94	102	94	102	87
suelo+tara+agua (g)	20.410	22.140	20.450	18.980	21.690	21.240
suelo+tara (g)	14.740	15.350	14.280	14.060	15.630	14.790
tara (g)	6.390	5.940	6.090	6.150	6.060	6.110
agua (g)	5.670	6.790	6.170	4.920	6.060	6.450
suelo seco (g)	8.350	9.410	8.190	7.910	9.570	8.680
Humedad (%)	67.904	72.157	75.336	62.200	63.323	74.309
w_i = Humedad media inicial (%)	70.03		68.77		68.82	
D = diametro (cm)	3.80		3.80		3.80	
H _o = altura inicial (cm)	7.66		7.68		7.66	
W _{STaA} = peso de suelo+tara+agua (g)	136.34		137.23		136.34	
W _{Ta} = peso tara (g)	0.00		0.00		0.00	
G _S (g/cm ³)	2.690		2.690		2.690	
γ_w = peso específico da agua (g/cm ³)	1.00		1.00		1.00	
A = Area (cm²)	11.35		11.34		11.34	
V_{Ti} = Volumen total inicial (cm³)	86.91		87.10		86.90	
W_T = peso total del suelo (g)	136.34		137.23		136.34	
γ = peso específico (g/cm ³)	1.57		1.58		1.57	
γ_d = peso específico seco (g/cm ³)	0.92		0.93		0.93	
W_s = peso del suelo seco (g)	80.19		81.31		80.76	
W_w = peso del agua (g)	56.15		55.92		55.58	
V_S = volumen de los sólidos (cm³)	29.81		30.23		30.02	
V_{Vi} = volumen de vacios inicial (cm³)	57.10		56.87		56.87	
V_w = volumen del agua (cm³)	56.15		55.92		55.58	
V_A = volumen de aire (cm³)	0.94		0.96		1.30	
S = grado de saturación(%)	98.35		98.32		97.72	
e_o = índice de vacios	1.92		1.88		1.89	
n = porosidad (%)	65.70		65.30		65.45	
γ_{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1.58		1.59		1.58	
γ_{sub} = peso específico sumer. (g/cm ³)	0.58		0.59		0.58	
capsula n ^o	87	39	39	94	39	94
suelo+tara+agua (g)	18.970	20.190	18.160	16.260	18.720	19.890
suelo+tara (g)	14.300	15.140	14.080	12.660	15.240	15.910
tara (g)	6.110	6.390	6.400	5.950	6.110	5.650
agua (g)	4.670	5.050	4.080	3.600	3.480	3.980
suelo seco (g)	8.190	8.750	7.680	6.710	9.130	10.260
Humedad (%)	57.021	57.714	53.125	53.651	38.116	38.791
w_f = Humedad média final (%)	57.37		53.39		38.45	
ΔV = Variacion de volumen despues consolidación (cm ³)	13.84		19.20		25.32	
V_{Tf} = Volumen total final (cm³)	73.07		67.90		61.58	
V_{Vf} = volumen de vacios final (cm³)	43.26		37.67		31.55	
e_f = índice de vacios final mecanico	1.5055		1.2970		1.0947	
e_f = índice de vacios final + termico	1.4181		1.2036		1.0115	
γ_d = peso específico seco final (g/cm³)	1.097		1.198		1.312	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la figura 4.15 se presenta las curvas de consolidación mecánica y térmica obtenidas de los ensayos E9, E10 y E11 respectivamente. Además del mismo comportamiento observado en el anterior ítem (ensayos a 40°C), se observa que las deformaciones volumétricas térmicas fueron 34% mayores en comparación a las muestras consolidadas térmicamente a 40°C. Concluyendo que en cuanto mayor fuese la temperatura a consolidar mayores serán las deformaciones volumétricas térmicas.

Además de la influencia del incremento de la temperatura en las deformaciones volumétricas, se puede observar el mismo efecto del incremento del esfuerzo actuante en cada ensayo.

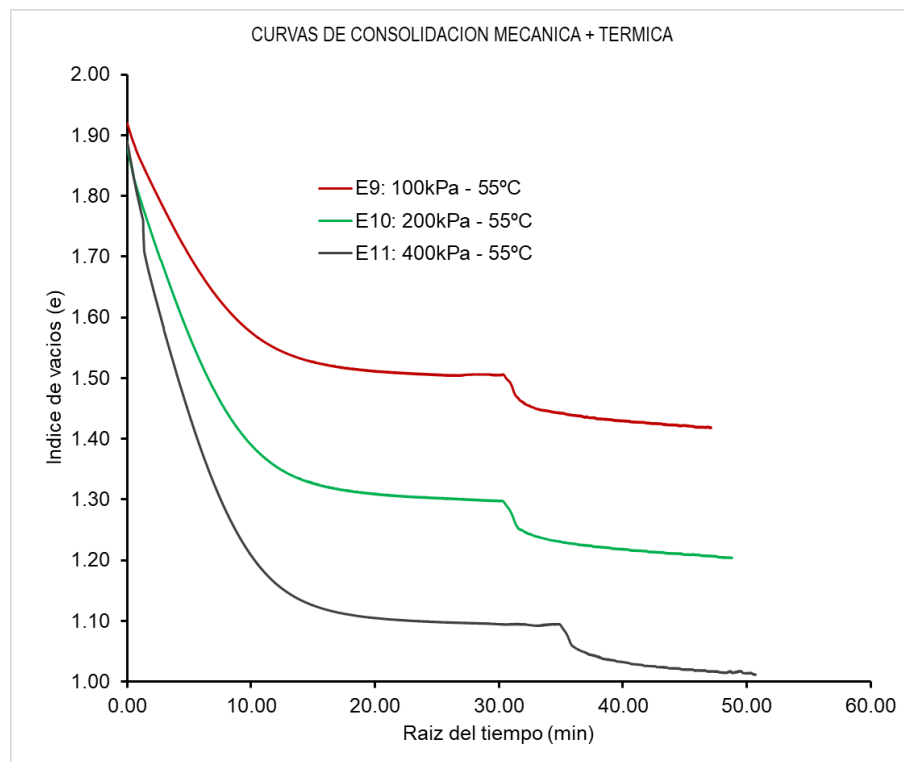


Figura 0.15 Curvas de consolidación mecánica más térmica a 55°C.

En las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se presentan las curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica, las cuales permitieron determinar los $C\alpha(T_0)$ de cada espécimen. Además, puede observarse en las mismas figuras que las curvas de

consolidación térmica indican una aceleración de deformaciones volumétricas como predicho en la revisión bibliográfica.

Por tanto, entre los ítems 4.2.3.1 y 4.2.3.2 se presentaron los seis ensayos de consolidación térmica planteados como uno de los objetivos específicos de la presente tesis. Como objetivo final queda realizar la evaluación de la capacidad de predicción del modelo propuesto con los resultados experimentales de los ensayos E6, E7, E8, E9, E10 y E11.

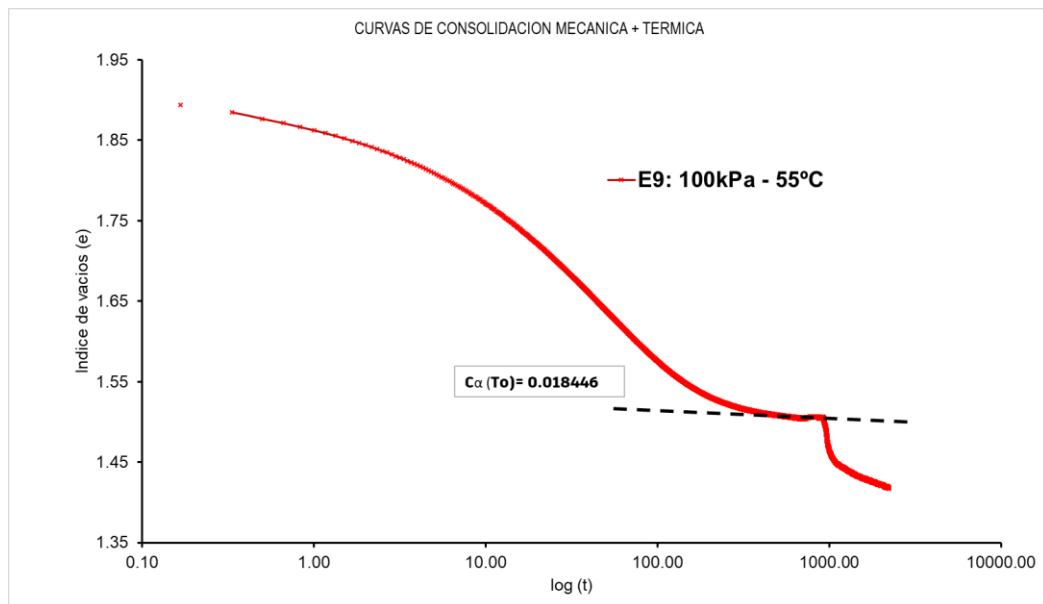


Figura 0.16 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E9.

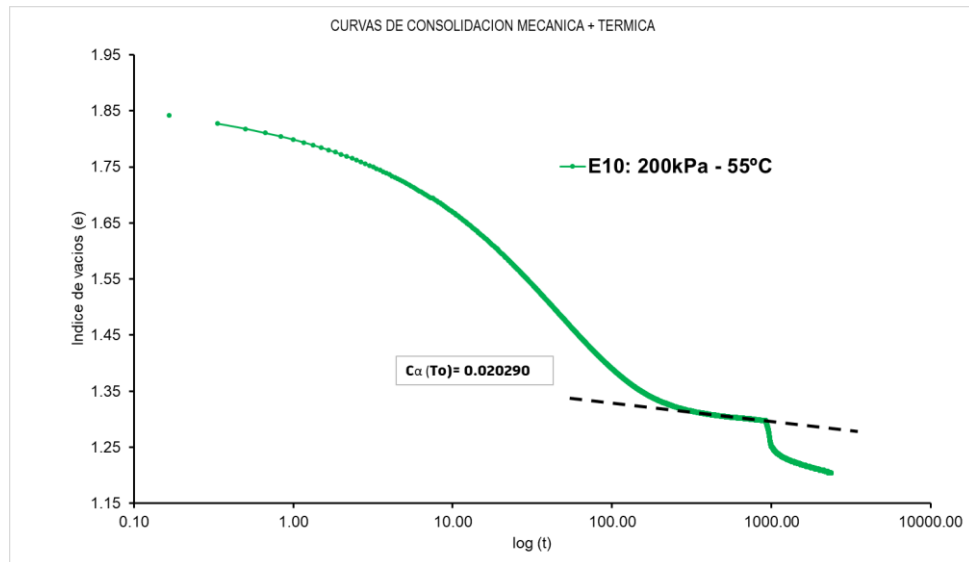


Figura 0.17 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E10.

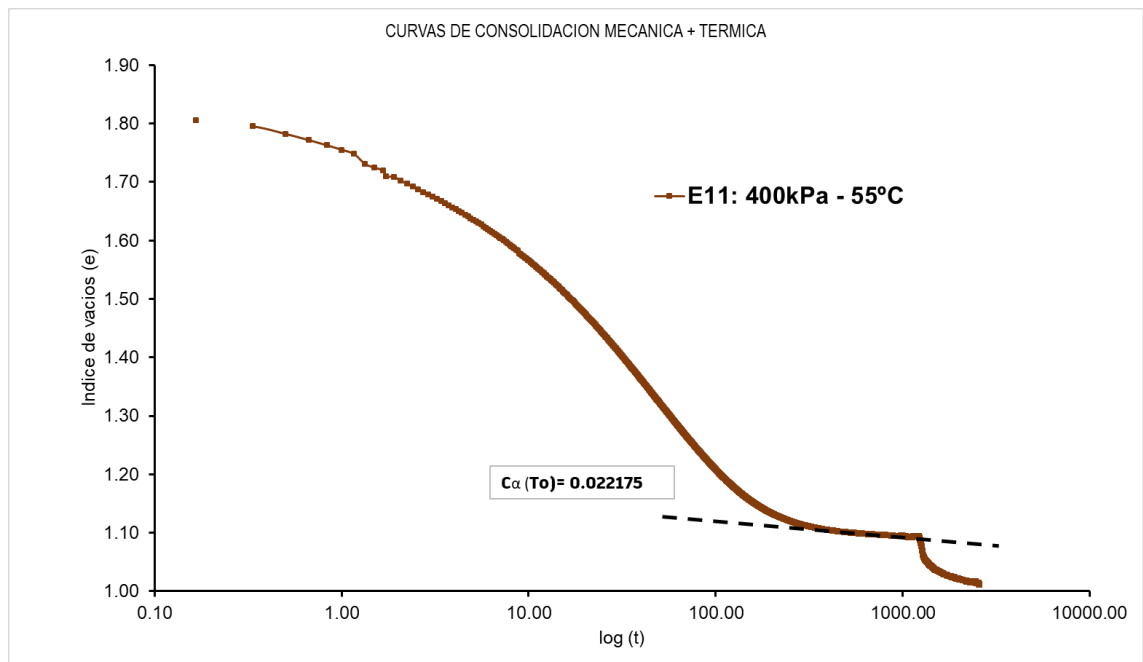


Figura 0.18 Curvas de consolidación mecánica y térmica en escala logarítmica del espécimen E11.



De los resultados experimentales se puede observar diferencias entre las curvas de consolidación térmica. Sin embargo, gracias a la metodología de reconstitución de los especímenes es posible llegar a algunas conclusiones.

Primero, las magnitudes de deformación volumétrica total durante la consolidación mecánica fueron similares entre cada espécimen consolidada a 100, 200 y 400kPa respectivamente. Lo que permite concluir que la consolidación secundaria térmica será apenas dependiente de los efectos del incremento de temperatura en la microestructura de los especímenes.

Segundo, las deformaciones volumétricas térmicas a 55°C fueron mayores que los de 40°C. Además, en el tiempo de inicio de la consolidación térmica (t_0) puede observarse que la aceleración de deformaciones a 55 °C es notablemente mayor que a 40°C. Lo que indicaría que el mayor efecto de la temperatura en la microestructura estaría al inicio del proceso de incremento de temperatura, es decir la mayor deformación volumétrica se concentrara al inicio del ensayo.

Tercero, en una escala adecuada como en las figuras 4.11 y 4.15 se puede observar que en cuanto el efecto de la aceleración de deformaciones por incremento de temperatura alcance su límite. Las deformaciones a ese nivel de temperatura tenderán a estabilizarse en el tiempo, lo que generaría un nuevo coeficiente de consolidación secundaria denominado $C\alpha(T)$.

A raíz de las observaciones anteriores se puede percibir que la consolidación secundaria tiende a cumplir un comportamiento dentro de las leyes de la viscosidad. Por tanto, los resultados de la presente tesis contribuyen a fortalecer la nueva teoría de la consolidación secundaria formulada por muchos autores en el mundo como descrito en la revisión bibliográfica.

4.2 DESARROLLO DE LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para desarrollar una formulación matemática, es necesario plantear una hipótesis teórica que permita marcar un punto de inicio para el desenvolvimiento de la filosofía matemática.

De tal forma, desde las observaciones y conclusiones de los autores presentados en la revisión bibliográfica se plantea la siguiente hipótesis: “Las deformaciones volumétricas térmicas totales en suelos normalmente consolidados y saturados, son respuesta de la aceleración de deformaciones en la compresión secundaria debido a la fluencia mejorada por la disminución de la resistencia viscosa causada por el incremento de temperatura”.

De las curvas de consolidación mecánica más térmica de los resultados en laboratorio se puede realizar un diagrama generalizado que se presenta en la figura 4.19. En donde, separando la consolidación primaria y secundaria, se puede identificar un coeficiente de consolidación secundaria ($C\alpha$) para una temperatura T_o en que se realizó la consolidación mecánica. El coeficiente está definido por la siguiente ecuación:

$$C\alpha(T_o) = \frac{e - e_o}{\log(t) - \log(t_o)} \dots\dots\dots (1)$$

El cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$C\alpha(T_o) = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t}{t_o}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

En donde e representa el índice de vacíos.

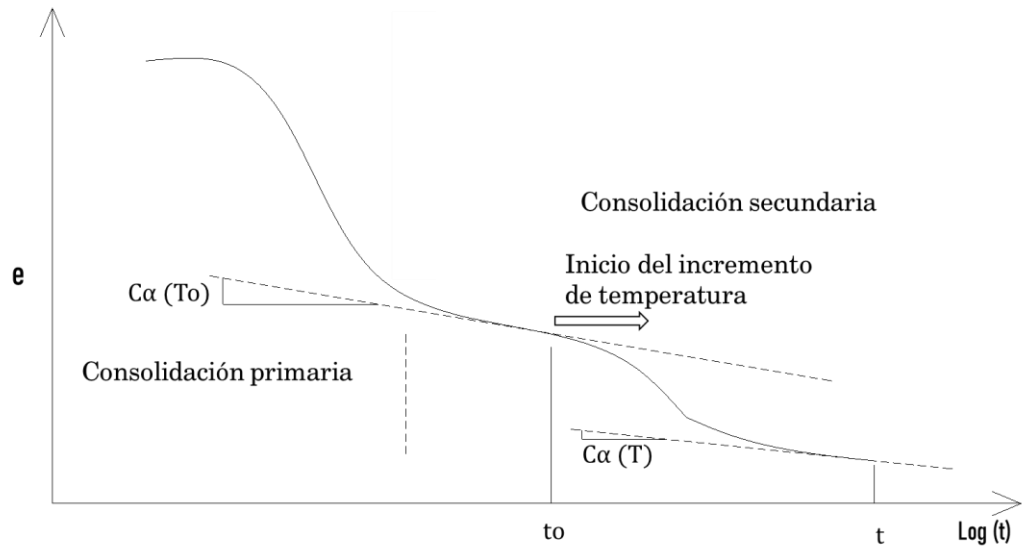


Figura 0.19 Diagrama de simulación para la consolidación térmica.

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en cuanto se incrementa la temperatura durante la consolidación secundaria aparece un colapso en las deformaciones volumétricas, formando en el tiempo una nueva curva de consolidación para una determinada temperatura $T > T_0$ como se observa en el diagrama de la figura 4.20. Por tanto, esta nueva curva adquiere un nuevo coeficiente de consolidación secundaria $C\alpha$ a una temperatura T , que se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$C\alpha(T) = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t}{t_0}\right)} \dots\dots\dots (3)$$

Según los resultados experimentales de (Towhata et al., 1993) sugieren que existe una curva de consolidación térmica para cada nivel de temperatura alcanzada, tal comportamiento se expresa con más detalle en el diagrama presentado en la figura 4.20. Por tanto, esto permite determinar un coeficiente de consolidación secundaria para cada nivel de temperatura que se expresaría con la misma ecuación (3) con una modificación de la siguiente manera:

$$C\alpha(T) = \frac{\Delta e (T)}{\log \left(\frac{t}{t_0} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

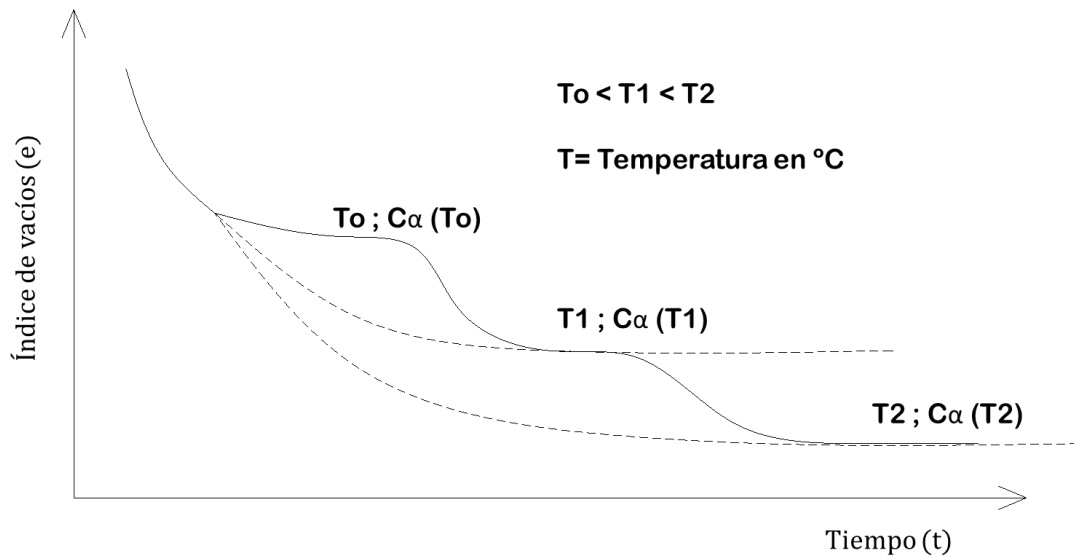


Figura 0.20 Diagrama de curvas de consolidación térmica para diferentes niveles de temperatura. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, por la similitud de la trayectoria de las curvas de consolidación secundaria a diferentes temperaturas, el valor de $C\alpha(T)$ sería equivalente al $C\alpha(T_0)$ multiplicado por otro coeficiente que se puede expresar de la siguiente manera:

$$C\alpha(T) = M * C\alpha(T_0) \dots\dots\dots (5)$$

En donde M sería un coeficiente dependiente de la temperatura.

Para determinar el valor equivalente de M se recurre a la revisión bibliográfica, específicamente a las conclusiones de Martins (1992), Delage et al. (2000), Andrade (2009) y Chen et al. (2017) quienes ayudaron a entender la influencia de la temperatura en la microestructura de las arcillas.

Recordando que durante la consolidación secundaria si existe variación de los esfuerzos efectivos para que exista variación de volumen. Tales esfuerzos efectivos están representados por los esfuerzos octaédricos los cuales crecen durante la consolidación secundaria. Sin embargo, la arcilla tiene dos formas de transmitir esfuerzos efectivos, mediante la parcela friccionante y la parcela viscosa diferenciada por los tipos de contactos entre las partículas sólidas. La consolidación secundaria ocurre porque todos los contactos viscosos están en proceso de transformación hacia los contactos friccionantes y termina cuando todos llegan a completar su conversión en mucho tiempo, para un determinado incremento de carga.

Los contactos viscosos se caracterizan porque tienen una capa de agua que separa el contacto entre las partículas sólidas, esta capa es un agua más viscosa que el agua común y se le conoce como agua adsorbida. Entonces, cuando se incrementa la temperatura, la viscosidad y la densidad del agua empiezan a disminuir. Tal disminución incrementa la permeabilidad total de la masa del suelo y disminuye ligeramente la permeabilidad intrínseca debilitando la microestructura, y, en consecuencia, acelera las deformaciones volumétricas secundarias.

Por tanto, M está relacionada con la variación de la viscosidad cinemática del fluido en la masa del suelo, en cuanto se incrementa o disminuye la temperatura. De tal manera la función $M(T)$ tendría la siguiente equivalencia:

$$M(T) = \frac{C\alpha(T)}{C\alpha(T_0)} \approx \frac{\zeta(T_0)}{\zeta(T)} \dots\dots\dots (6)$$

En donde:

- $\zeta(T_0)$ = Es la viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente (T_0).
- $\zeta(T)$ = Es la viscosidad cinemática del agua a temperatura T .

Por tanto, la ecuación (6) tendría la siguiente equivalencia:

$$M(T) = \frac{\zeta(T_0)}{\zeta(T)} \dots\dots\dots (7)$$

Como se concluyó la equivalencia de La función M(T) en la ecuación (6), quien depende de la variación de la viscosidad cinemática del agua durante el incremento o disminución de la temperatura. Para determinar la variación de la viscosidad recurrimos a la ecuación publicada en el artículo de (Delage et al., 2000), quienes presentan la variación de la viscosidad dinámica del agua en relación a la temperatura:

$$\mu(T) = -0.00046575 \ln(T) + 0.00239138 \text{ (Pa.s)}$$

Donde:

- $\mu(T)$ = Viscosidad dinámica del agua
- T = Temperatura

Sin embargo, para obtener la variación de la viscosidad cinemática del agua necesitamos la variación de la densidad del agua en relación a la temperatura. Para ello recurrimos a la ecuación de Gong (2015) publicada en el artículo de (Chen et al., 2017):

$$\rho_w = -5.5 \times 10^{-6} T^2 + 2.28 \times 10^{-5} T + 0.99997 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

En donde:

- ρ_w = Densidad del agua a una temperatura T.
- T = Temperatura.

En la Tabla 11 se presenta la variación de la viscosidad dinámica, densidad del agua, viscosidad cinemática y la variación de la función M(T) en relación a la temperatura.



Tabla 11: Variación de la función $M(T)$ en relación a la temperatura.

T (°C)	μ_w (Pa.s)	ρ (gr/cm ³)	ρ (kg/m ³)	$v = \mu/\rho$ (m ² /s)	$M = (\zeta(T_o))/(\zeta(T))$
23	0.00093102	0.9975849	997.5849	9.33278E-07	1
24	0.0009112	0.9973492	997.3492	9.13623E-07	1.021512441
25	0.00089219	0.9971025	997.1025	8.94781E-07	1.043023159
26	0.00087392	0.9968448	996.8448	8.76688E-07	1.064549631
27	0.00085634	0.9965761	996.5761	8.59286E-07	1.086108037
28	0.00083941	0.9962964	996.2964	8.42526E-07	1.107713453
29	0.00082306	0.9960057	996.0057	8.26363E-07	1.129380015
30	0.00080727	0.995704	995.704	8.10755E-07	1.151121059
31	0.000792	0.9953913	995.3913	7.95667E-07	1.172949233
32	0.00077721	0.9950676	995.0676	7.81066E-07	1.194876601
33	0.00076288	0.9947329	994.7329	7.66921E-07	1.216914732
34	0.00074898	0.9943872	994.3872	7.53205E-07	1.239074767
35	0.00073548	0.9940305	994.0305	7.39893E-07	1.261367495
36	0.00072236	0.9936628	993.6628	7.26963E-07	1.283803403
37	0.00070959	0.9932841	993.2841	7.14393E-07	1.306392734
38	0.00069717	0.9928944	992.8944	7.02164E-07	1.329145527
39	0.00068508	0.9924937	992.4937	6.90257E-07	1.352071661
40	0.00067328	0.992082	992.082	6.78658E-07	1.375180895
41	0.00066178	0.9916593	991.6593	6.6735E-07	1.398482897
42	0.00065056	0.9912256	991.2256	6.56319E-07	1.421987278
43	0.0006396	0.9907809	990.7809	6.45552E-07	1.445703621
44	0.00062889	0.9903252	990.3252	6.35038E-07	1.469641509
45	0.00061843	0.9898585	989.8585	6.24763E-07	1.493810547
46	0.00060819	0.9893808	989.3808	6.14718E-07	1.518220388
47	0.00059817	0.9888921	988.8921	6.04893E-07	1.542880755
48	0.00058837	0.9883924	988.3924	5.95278E-07	1.567801466
49	0.00057876	0.9878817	987.8817	5.85864E-07	1.592992448
50	0.00056936	0.98736	987.36	5.76644E-07	1.618463767
51	0.00056013	0.9868273	986.8273	5.67609E-07	1.644225637
52	0.00055109	0.9862836	986.2836	5.58752E-07	1.670288451
53	0.00054222	0.9857289	985.7289	5.50067E-07	1.696662792
54	0.00053351	0.9851632	985.1632	5.41545E-07	1.723359455
55	0.00052496	0.9845865	984.5865	5.33183E-07	1.750389471
56	0.00051657	0.9839988	983.9988	5.24973E-07	1.77776412
57	0.00050833	0.9834001	983.4001	5.1691E-07	1.805494955
58	0.00050023	0.9827904	982.7904	5.08988E-07	1.833593821
59	0.00049227	0.9821697	982.1697	5.01204E-07	1.862072878
60	0.00048444	0.981538	981.538	4.93551E-07	1.890944618

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Por tanto, reemplazando la ecuación (7) en la ecuación (5) se obtiene la siguiente ecuación (8) que representa el coeficiente de consolidación secundaria a una determinada temperatura (T).

$$C\alpha(T) = \frac{\zeta(T_0)}{\zeta(T)} \times C\alpha(T_0) \dots\dots\dots (8)$$

En donde:

$$\zeta(T) = \frac{-46.58 * 10^{-5} * \ln(T) + 23.92 * 10^{-4}}{-5.5 * 10^{-3} * T^2 + 2.28 * 10^{-2} * T + 999.97}$$

($t_0 < t$ y $T > T_0$).

Hasta el momento se ha considerado la influencia de la viscosidad en el comportamiento térmico de las arcillas, es decir la parcela viscosa. Sin embargo para desarrollar el modelo es necesario considerar la parcela friccionante, es decir aquella que es afectada por el estado de esfuerzos actuante.

Para ello se ha revisado muchos modelos termo-mecánicos, pero ninguno de ellos considera el factor tiempo. Los modelos revisados son capaces de predecir la deformación volumétrica total por temperatura, menos en función del tiempo.

Revisando los resultados experimentales se puede observar la semejanza con las curvas hiperbólicas. Entonces se recurrió a revisar el modelo hiperbólico de Duncan y Chan (1960).

El modelo hiperbólico de Duncan y Chan (1960) sugiere que la relación de esfuerzo vs deformación en suelos puede ser representada por una ley hiperbólica en análisis incrementales de elementos finitos. Este modelo asume que la relación de incremento de esfuerzo desviador y deformación está gobernada por la ley de Hooke generalizada.

Después de una serie de investigaciones complementarias Kondner et al. (1963) mostraron que la curva esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) vs deformación (ϵ_1) en suelos puede ser representada razonablemente por una hipérbola definida con la siguiente ecuación:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1}{\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

- $E_i = E_s$ es el modulo tangente inicial de la curva esfuerzo desviador vs deformación axial.
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ = Es la asíntota del esfuerzo desviador relacionado con la resistencia del suelo.

El modelo hiperbólico es un modelo elástico no lineal que tiene como base predecir la curva esfuerzo vs deformación desde la semejanza a una curva hiperbólica. Lo que quiere decir que la ecuación (9) es una función de una curva hiperbólica.

Por tanto, después de meses de investigación en gabinete se logró formular una ecuación que predice las deformaciones volumétricas térmicas a partir del modelo hiperbólico. De esta forma se complementó la parcela friccionante al comportamiento termo-mecánico de las arcillas.

Para obtener una ecuación que describa la trayectoria de las deformaciones térmicas de acuerdo a los resultados en laboratorio, sería sustituyendo las variables independientes y dependientes de la ecuación (9) de la siguiente forma:

- $(\sigma_1 - \sigma_3)$ sustituido por ϵ_v
- ϵ_1 sustituido por "t"
- E_i sustituido por $C_\alpha(T)$
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ sustituido por ϵ_{vult}

Donde:

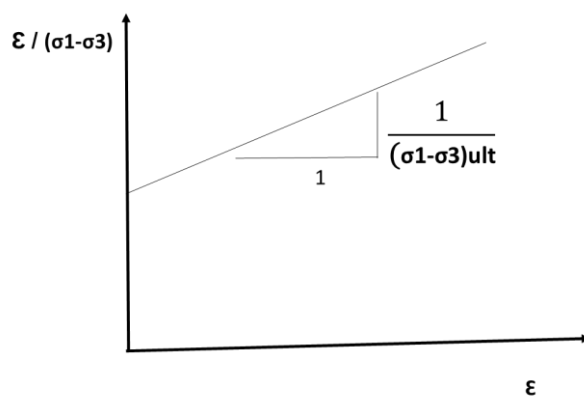
- $\varepsilon_v = \text{deformacion volumetrica equivalente a: } \frac{\Delta e}{1+e_0}$
- $t = \text{tiempo}$
- $C_\alpha(T) = \text{coeficiente de consolidacion secundaria a una temperatura } T.$
- $\varepsilon_{vult} = \text{asintota de la hiperbola.}$

Reemplazando las sustituciones la ecuación (9) quedaría de la siguiente forma:

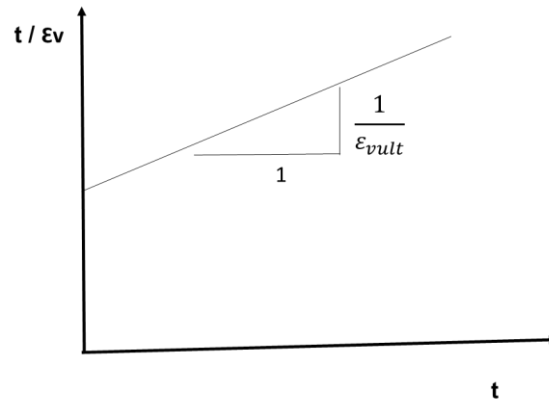
$$\varepsilon_v = \frac{t}{\frac{1}{C_\alpha(T)} + \frac{t}{\varepsilon_{vult}}} \dots\dots\dots (10)$$

En donde el tiempo es una variable independiente y $C_\alpha(T)$ se calcula con la ecuación (8). Sin embargo ε_{vult} se determina mediante la calibración del modelo a través de ensayos en laboratorio.

Para calibrar la asíntota Duncan y Chan (1960) plantearon realizar una transformada en donde la curva hiperbólica se convierte en una recta, de la siguiente forma:



Sustituido las variables la transformada quedaría de la siguiente forma:



Después de haber obtenido ε_{vult} en tres diferentes estados de esfuerzos ($\sigma'3$) se puede calibrar con la siguiente ecuación:

$$Rf = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{vult}}$$

Donde:

ε_r : Punto de inflexión máximo de la curva en función del esfuerzo efectivo constante.

Rf: Coeficiente de calibración.

4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

En el presente ítem se recurre a validar la formulación matemática desenvuelta mediante la comparación de resultados numéricos (de la formula) con datos experimentales (de laboratorio).

Para obtener los resultados numéricos en relación a los ensayos de laboratorio, son necesarios los siguientes datos:

- Coeficiente de consolidación secundaria a temperatura ambiente ($C\alpha(T_0)$).
- Registro de la evolución del tiempo durante la consolidación térmica (tiempo de inicio de la consolidación térmica) (t_0).
- Temperatura objetivo en la que se realizara la consolidación térmica (T).
- La asíntota ε_{vult} que se obtiene de la calibración del modelo.



Tabla 12: Resumen de los datos experimentales necesarios para ejecutar el modelo.

OCR	σ'_v (kPa)	T(°C)	$C\alpha$ (To)	t_o (min)	t_o (hr)	E_{vult}	$C\alpha$ (T)
1	100	40	0.01716812	1753.33	29.22	1.3323	0.006912
1	100	55	0.01844692	916.10	15.27	3.7821	0.02538
1	200	40	0.01929399	1232.88	20.55	2.164	0.011972
1	200	55	0.02029003	912.00	15.20	4.3994	0.02789
1	400	40	0.02145867	1268.30	21.14	2.2482	0.014744
1	400	55	0.02217549	1209.23	20.15	4.2901	0.026862

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 13: Calibración de ϵ_{vult} .

p' (kPa)	ϵ_r	E_{vult}	R_f
100	0.0171	0.0375	0.456
200	0.0238	0.0381	0.62467192
400	0.0182	0.0327	0.55657492
			0.54574895

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

A continuación, se presenta los gráficos comparativos entre el modelo y los datos experimentales:

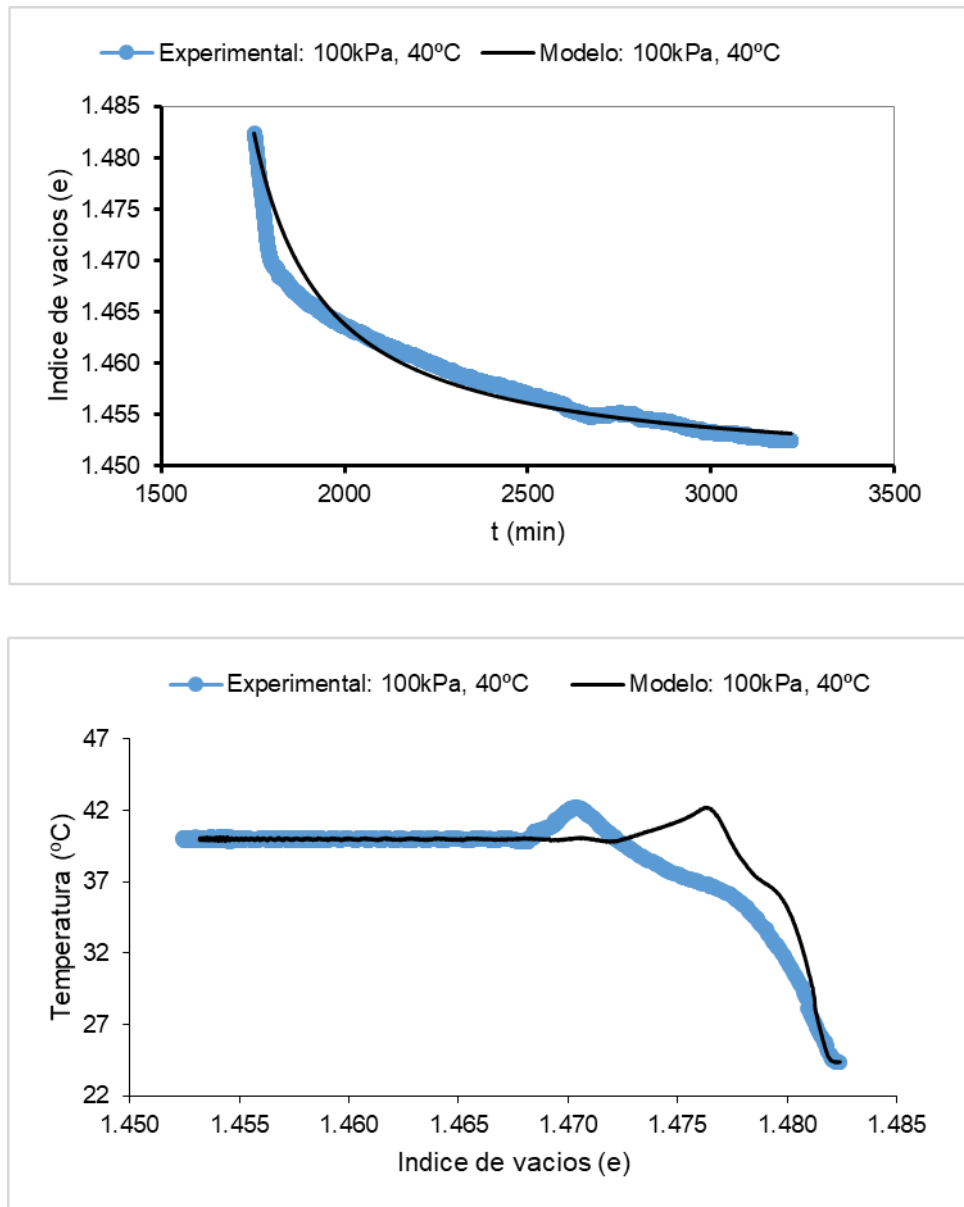


Figura 0.21 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 100kPa a 40°C.

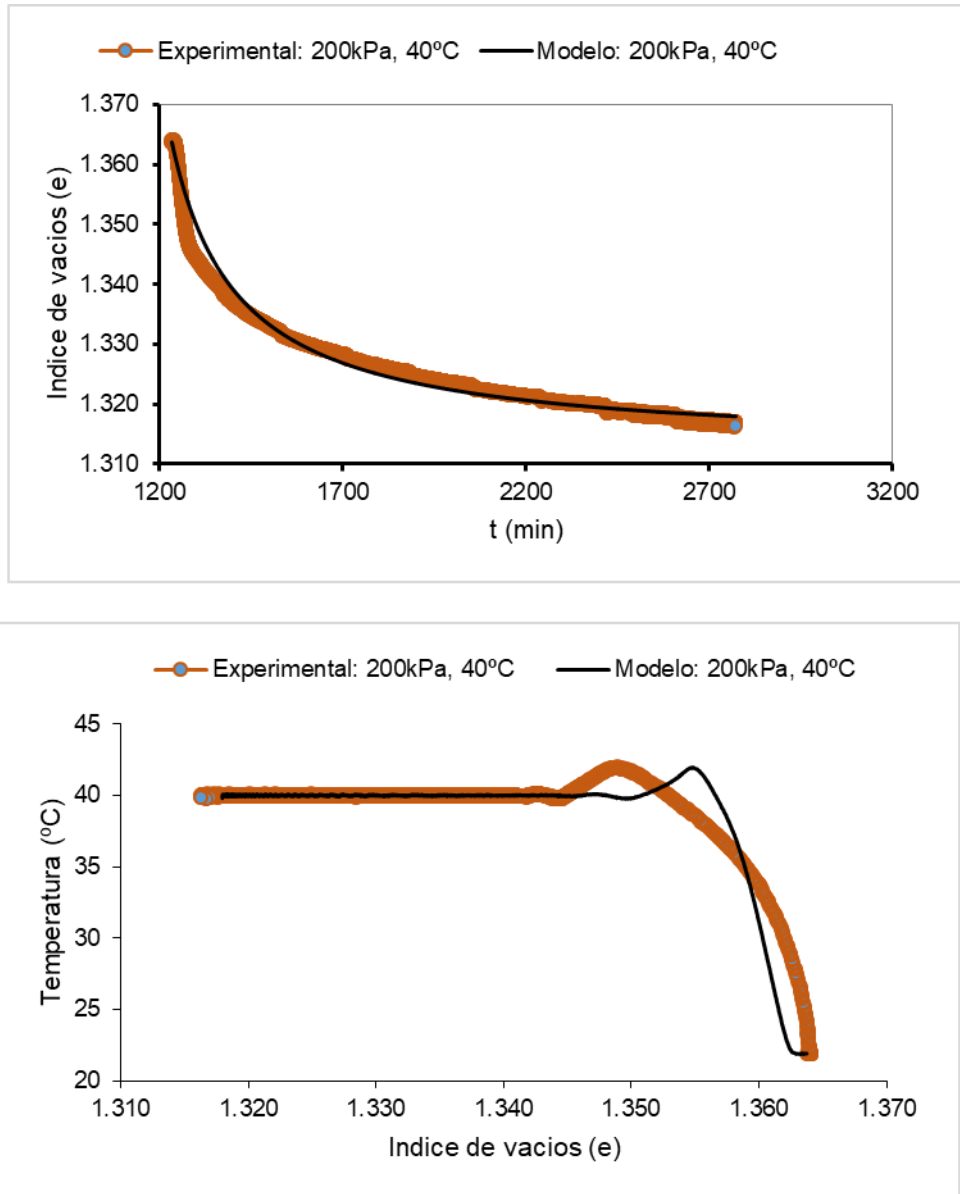


Figura 0.22 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 200kPa a 40°C.

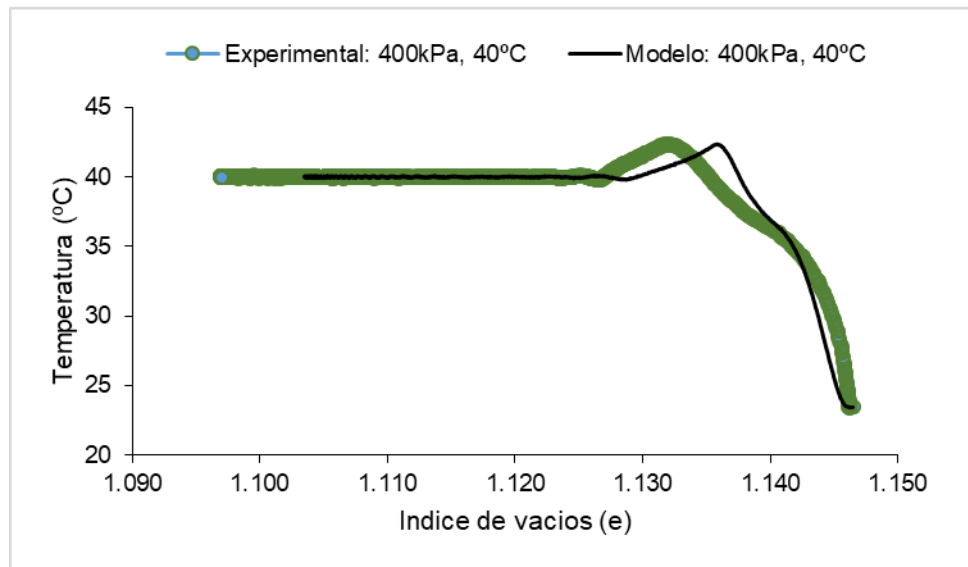
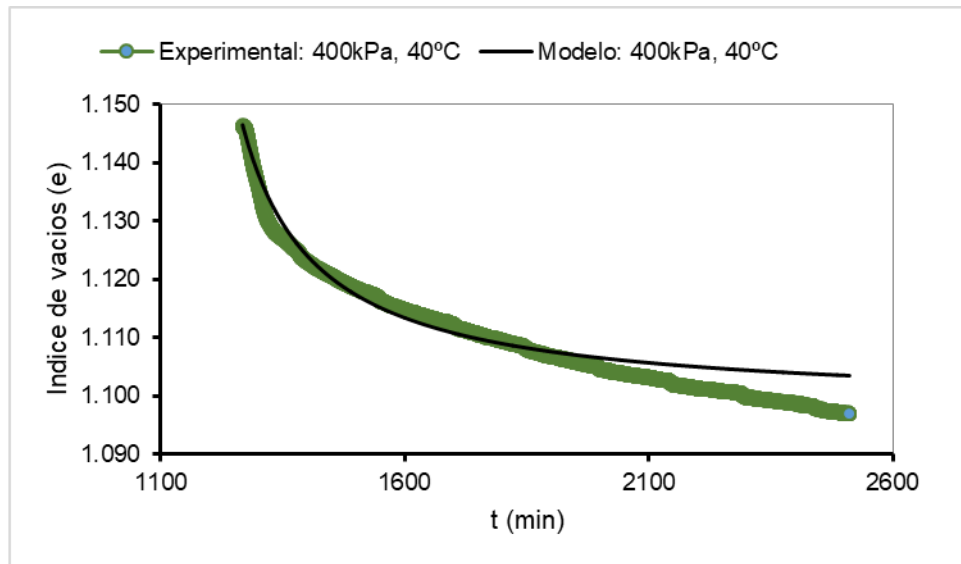


Figura 0.23 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 400kPa a 40°C.

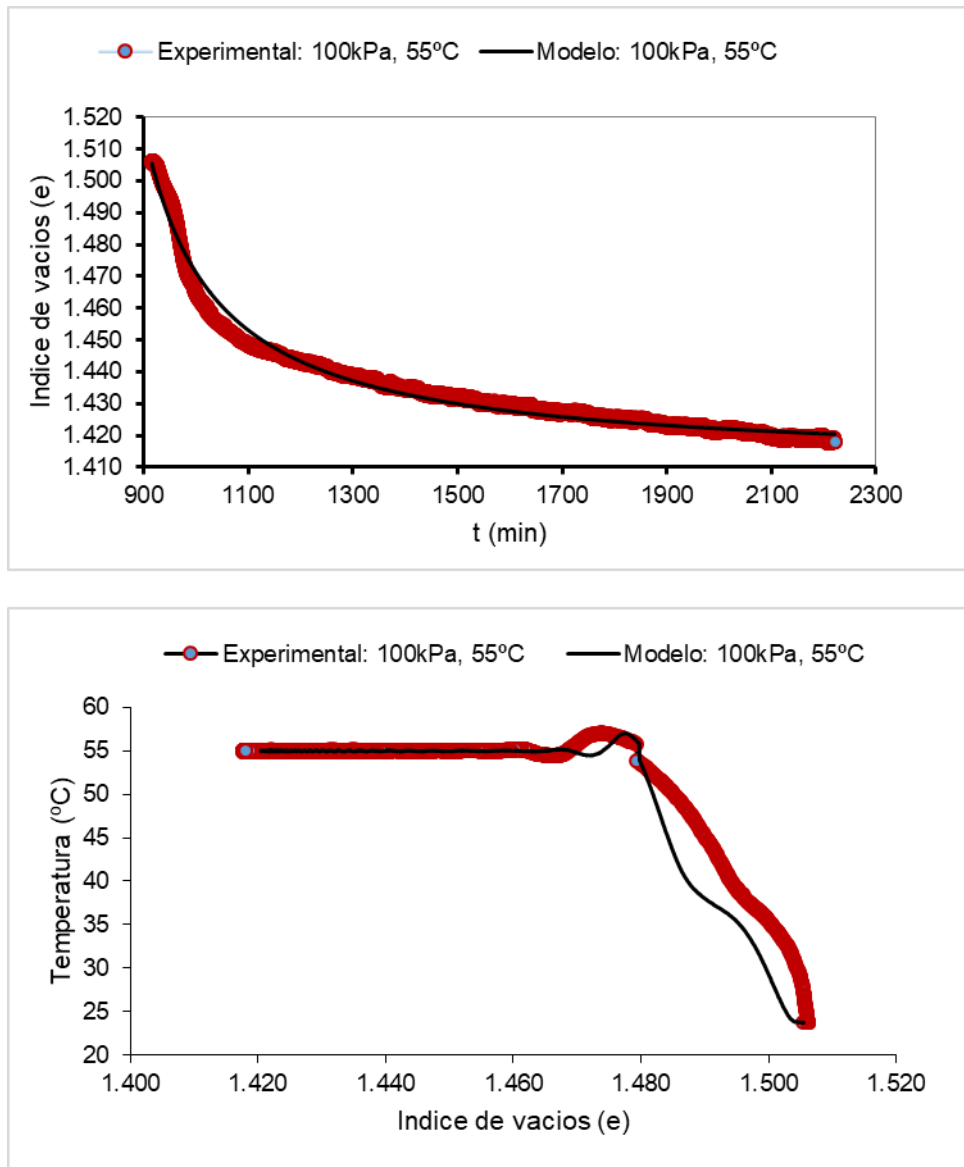


Figura 0.24 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 100kPa a 55°C.

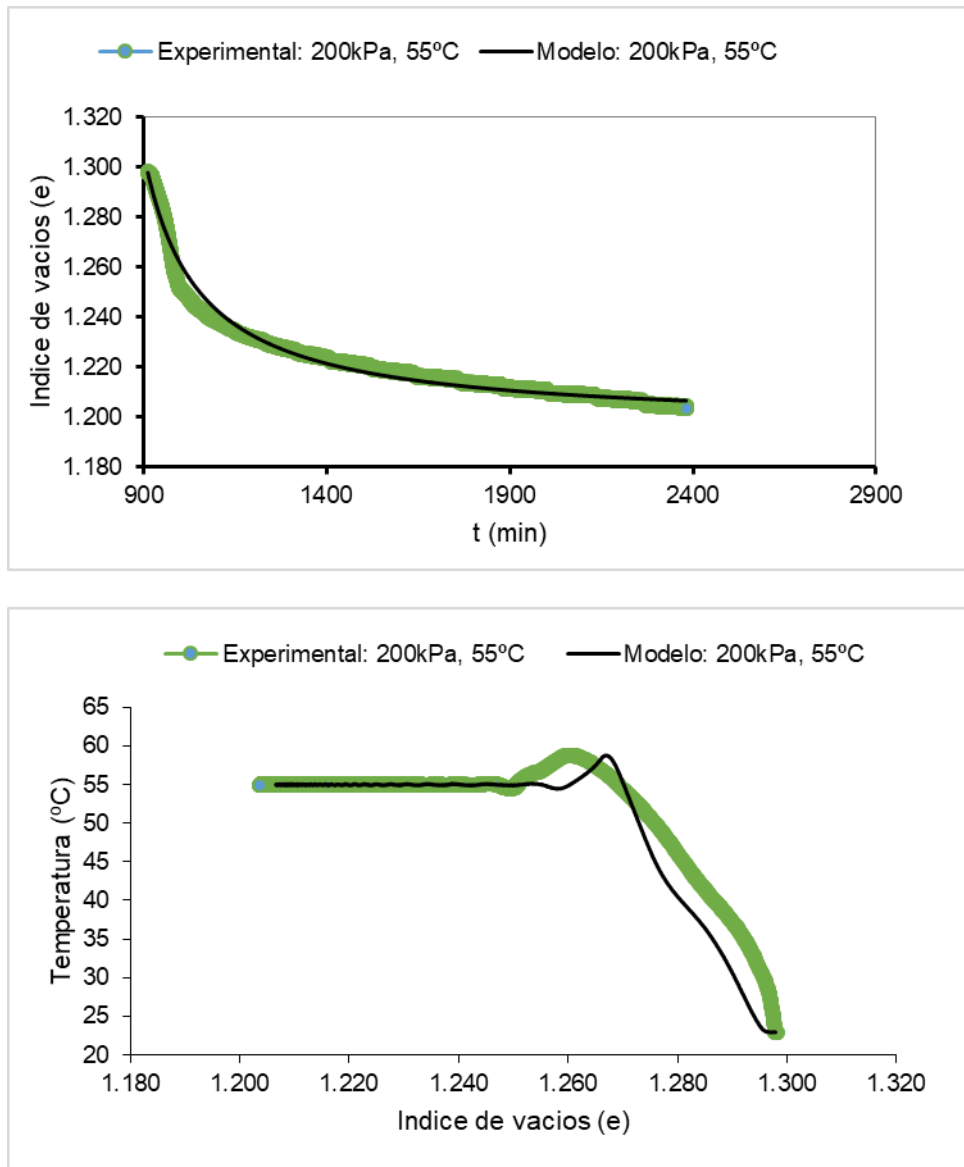


Figura 0.25 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 200kPa a 55°C.

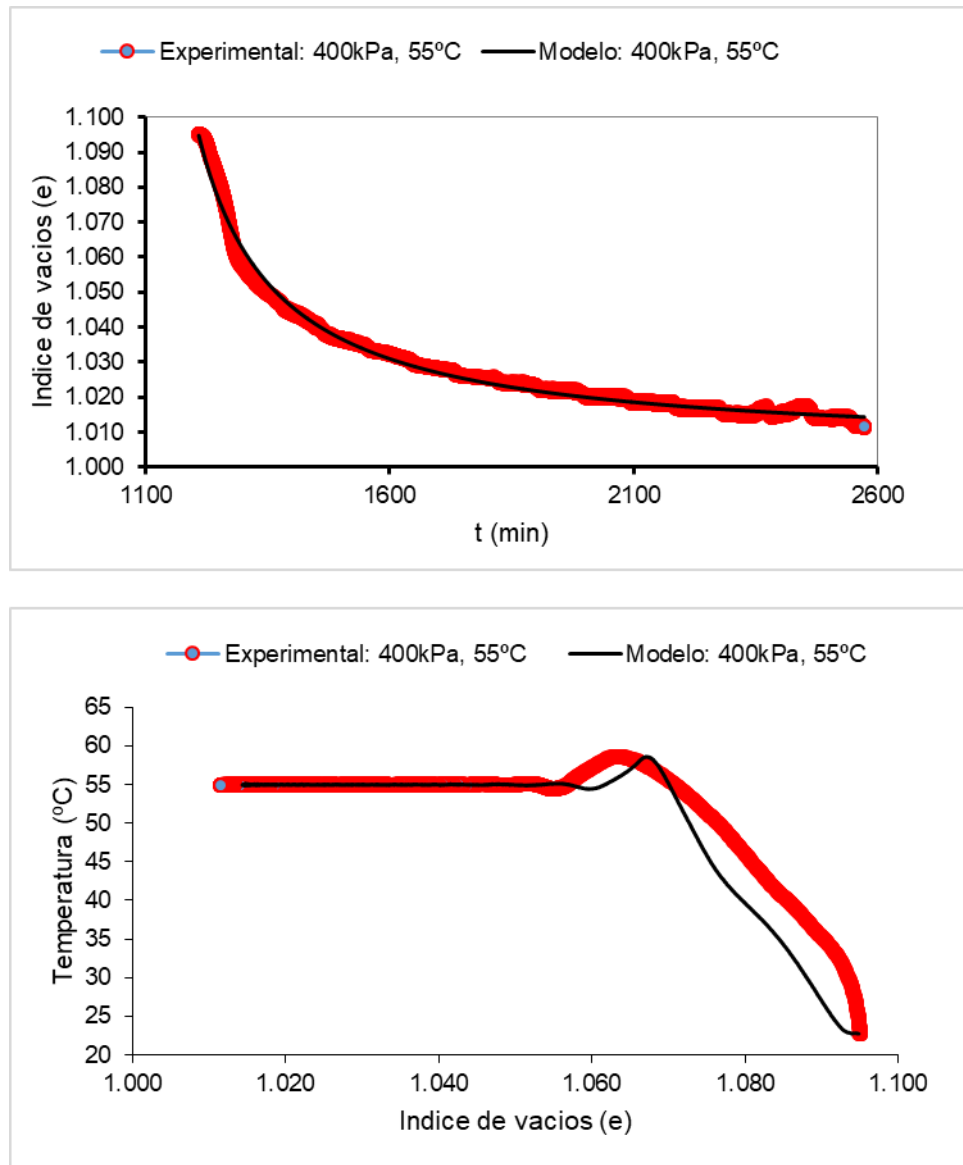


Figura 0.26 Comparación de las deformaciones volumétricas totales térmicas del modelo y el experimental para el CP a 400kPa a 55°C.

En las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se presentan la comparación de las deformaciones volumétricas térmicas totales de las muestras consolidadas a una temperatura de 40°C en esfuerzos efectivos de 100, 200 y 400kPa respectivamente. Puede observarse que las deformaciones (e) calculadas por la formulación matemática propuesta en la ecuación (10) tienen una buena concordancia con los resultados experimentales. Pero también puede notarse que todas las predicciones resultaron ser menor que las experimentales, esto puede atribuirse al efecto de no considerar en el modelo la viscosidad cinemática real del

agua adsorbida de entre los contactos viscosos del suelo. Ya que hasta la actualidad no se conoce cuan mayor es la viscosidad del agua adsorbida en relación al agua común en los poros del mismo.

En la parte (b) de las figuras mencionadas en el anterior párrafo, se muestra la relación entre la variación del índice de vacíos con el incremento de temperatura, en donde se observa que al inicio del ensayo las muestras experimentaron una pequeña expansión térmica. En cambio, el modelo no puede predecir esa pequeña etapa de la expansión térmica, considerándolo simplemente como un proceso continuo de deformación volumétrica. Sin embargo, eso no afecta considerablemente en la precisión del modelo.

En la figura 4.23 se puede observar que la curva del modelo tiene una mayor concordancia con la experimental en relación a los anteriores ensayos. Entonces, en cuanto mayor sea el esfuerzo actuante y la temperatura, mayor será la precisión del modelo.

En las figuras 4.24, 4.25 y 4.26 se presentan la comparación de las deformaciones volumétricas térmicas totales de las muestras consolidadas a una temperatura de 55°C a esfuerzos efectivos de 100, 200 y 400kPa respectivamente. Puede observarse que las deformaciones calculadas por la formulación matemática propuesta en la ecuación (10) tienen una mayor concordancia con los resultados experimentales, en relación a los ensayos a 40°C.

Este resultado puede atribuirse a la razón en que, cuanto mayor es la temperatura en la microestructura del suelo, la viscosidad del agua adsorbida disminuye con mayor velocidad, de esta forma asemejándose al de un agua común. Entonces si el modelo asume la evolución de la viscosidad en relación a un agua común, los ensayos a mayores temperaturas tenderán a ser más coincidentes con el modelo.



Para poder cuantificar el error de aproximación de los resultados numéricos se realizó un cálculo estadístico. Para dicho cálculo se tomaron datos provenientes de los resultados numéricos y experimentales, por tanto, estratégicamente los datos pertenecen al intervalo de tiempo donde ambas curvas tienden a ser paralelas. Además los datos son tomados obligatoriamente del final de ambas curvas, con el objetivo de cuantificar la deformación volumétrica total de cada uno.

En cuanto se seleccionaron los datos, se realizó la diferencia entre ambos resultados en un mismo tiempo del ensayo. Luego se calculó la media aritmética para cada ensayo, obteniendo seis datos finales. Con los datos finales se calculó el porcentaje de error de aproximación de cada resultado numérico, y en consecuencia se determinó una desviación estándar de 0.19 como se observa en la figura 4.27.

Según el análisis estadístico se determinó que el error de aproximación del modelo numérico oscila entre el 0.5 al 2%. Por tanto, la ecuación matemática propuesta en la presente tesis tiene la eficacia de predecir al 98% de las deformaciones volumétricas por variación de temperatura.

Por la evaluación comparativa de los resultados, se concluye que el modelo propuesto puede predecir razonablemente las deformaciones térmicas volumétricas totales en arcillas normalmente consolidadas bajo varios estados de esfuerzos.

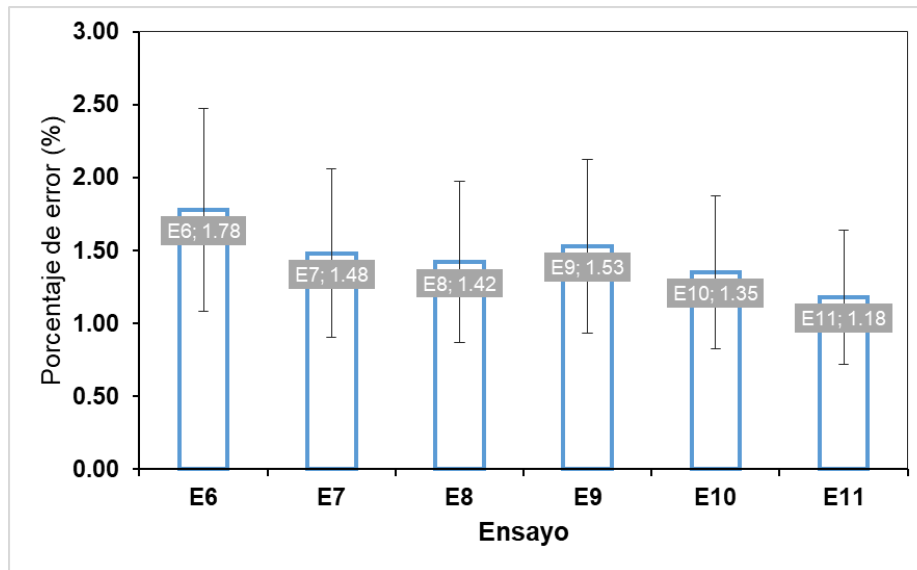


Figura 0.27: Porcentaje de error de aproximación del modelo numérico.

Las magnitudes de las deformaciones por temperatura oscilan entre el 10 al 15% de las deformaciones totales por consolidación mecánica. Además, se concluye que la magnitud de las deformaciones volumétricas por temperatura, se incrementa en cuanto mayor sea la temperatura de consolidación.

Cabe mencionar que el modelo requiere de mínimo tres ensayos en laboratorio para calibrar el modelo. Un límite del modelo es que no considera la viscosidad cinemática del agua adsorbida, lo que conduce a una ligera imprecisión del modelo a temperaturas menores a 50°C.

Según la evaluación estadística, el porcentaje de error del modelo propuesto disminuye en cuanto mayor sea el estado de esfuerzos actuante y mayor sea la temperatura de consolidación.

Si bien, el modelo propuesto mostro ser una iniciativa certera para la predicción de deformaciones térmicas para suelos saturados normalmente consolidados. Sin embargo, no se puede llegar a esa conclusión para suelos no saturados, o, para suelos sobre-consolidados. El cual invita a realizar más estudios en el área de la termomecánica de suelos.

V. CONCLUSIONES

- La caracterización de la muestra presentó límites de consistencia de $LL=106\%$, $LP=40.7\%$, $IP=65.2\%$ y un índice de consistencia de $IC=0.2$. Permitiendo clasificar el suelo marino como una arcilla blanda de color gris oscuro de alta compresibilidad.
- La metodología utilizada para moldear los especímenes se consideró adecuada porque permitió que todos los especímenes tuvieran propiedades e índices similares.
- En la presente investigación se logró formular satisfactoriamente una ecuación matemática, que permite predecir las deformaciones volumétricas térmicas totales a través de la base teórica de la consolidación secundaria.
- Para desarrollar el modelo propuesto los componentes obligatorios a considerar fueron el coeficiente de consolidación secundaria a temperatura ambiente ($C_{\alpha}(T_0)$), el tiempo de inicio y final de la consolidación térmica (t_0 , t), la temperatura ambiente ($^{\circ}C$), la velocidad de incremento de temperatura ($^{\circ}C/min$), la viscosidad cinemática a temperatura ambiente del agua en los poros $\zeta(T_0)$, el índice de vacíos inicial de cada espécimen (e_0) y la asíntota del modelo ε_{vult} . Estos componentes identificados son dependientes de la variación de temperatura y afectan directamente en la deformación volumétrica del suelo. Por tanto, en base a estos componentes se desarrolló la formulación matemática propuesta en la presente tesis.
- La formulación matemática propuesta en la presente tesis para determinar las deformaciones volumétricas totales por variaciones térmicas es:

$$\varepsilon_v = \frac{t}{\frac{1}{C_{\alpha}(T)} + \frac{t}{\varepsilon_{vult}}}$$

En donde:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

$$C\alpha(T) = \frac{\zeta(T_o)}{\zeta(T)} \times C\alpha(T_o)$$

$$\zeta(T) = \frac{-46.58 * 10^{-5} * \ln(T) + 23.92 * 10^{-4}}{-5.5 * 10^{-3} * T^2 + 2.28 * 10^{-2} * T + 999.97}$$

ε_{vult} : Se obtiene a través de la calibración del modelo

T: Temperatura ($T > T_o$), t: tiempo ($t_o < t$), e: índice de vacíos.

- De acuerdo a los resultados experimentales y numéricos obtenidos, el modelo propuesto predice al 98% la respuesta al cambio de volumen térmico en arcillas saturadas normalmente consolidadas en cualquier estado de esfuerzos. Sin embargo, el modelo se limita a conclusiones para su eficacia en la predicción de deformaciones volumétricas térmicas en suelos no saturados y en suelos sobre-consolidados.
- De los resultados experimentales se concluye que el comportamiento térmico del suelo en estudio fue lo esperado de acuerdo a la revisión bibliográfica. En cuanto culminó la consolidación mecánica, se pudo observar una aceleración de deformaciones volumétricas únicamente por el incremento de la temperatura.
- Las magnitudes de las deformaciones por temperatura oscilan entre el 10 al 15% de la deformación total por consolidación mecánica. Además, se concluye que la magnitud de las deformaciones volumétricas por temperatura, se incrementa en cuanto mayor sea la temperatura de consolidación.



VI. RECOMENDACIONES

Este trabajo se desarrolló con el fin de inducir una línea de investigación sobre la influencia de la temperatura en la geotecnia, por tanto, se recomienda:

- Recomiendo considerar el presente modelo para continuar en la optimización de modelos constitutivos en el comportamiento termo-visco-elasto-plástico de los suelos.
- Realizar estudios sobre la influencia de la temperatura en suelos no saturados.
- Realizar estudios sobre la influencia de la temperatura en suelos sobre-consolidados.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M. (2009). CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS ARGILAS MOLES DA CIDADE DE SANTOS. *Universidade Federal Do Rio de Janeiro*.
- Bai, B., Guo, L., & Han, S. (2014). Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling. *Mechanics of Materials*, 75, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.04.005>
- Baldi, G., Hueckel, T., & Pellegrini, R. (1988). Thermal volume changes of mineral-water system in low-porosity clay soil. *Canadian Geotechnical Journal*, c(January 1988). <https://doi.org/10.1139/t88-089>
- Campanella, G., & Mitchell, K. (1968). Influence of temperature variations on soil behavior.
- Chen, W. Z., Ma, Y. S., Yu, H. D., Li, F. F., Li, X. L., & Sillen, X. (2017). Effects of temperature and thermally-induced microstructure change on hydraulic conductivity of Boom Clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 383–395. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.03.006>
- Cui, Y. J., Sultan, N., & Delage, P. (2000). A thermomechanical model for saturated clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 620, 607–620.
- Delage, P., Sultan, N., & Cui, J. (2000). On The Thermal Consolidation Of Boom Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(August), 343–354. <https://doi.org/10.1139/cgj-37-2-343>
- Hong, P. Y., Pereira, J. M., Tang, A. M., & Cui, Y. J. (2013). On some advanced thermo-mechanical models for saturated clays. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS*, (February), 2952–2971. <https://doi.org/10.1002/nag>
- Laloui, L., & Cekerevac, C. (2003). Thermo-plasticity of clays: An isotropic yield



- mechanism. *Computers and Geotechnics*, 30, 649–660.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2003.09.001>
- Martins, I. (1992). Fundamentos de Um Modelo de Comportamento de Solos Argilosos Saturados.
- Plum, R. L., & Esrig, M. I. (1969). Some Temperature Effects on Soil Compressibility And Pore Water Pressure, (10), 231–242.
- Sallfors, G., & Tidfors, M. (1989). Temperature Effect on Preconsolidation Pressure. *Geotechnical Testing Journal*, 12, 93–97.
- Towhata, I., Kuntiwattanakul, P., Seko, I., & Ohishi, K. (1993). VOLUME CHANGE OF CLAYS INDUCED BY HEATING AS OBSERVED IN CONSOLIDATION TEST. *Soil and Foundation (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering)*, 33(4), 170–183.
- Abu-Hamdeh, N. H.; Reeder, R. C. SOIL THERMAL CONDUCTIVITY: EFFECTS OF DENSITY, MOISTURE, SALT CONCENTRATION, AND ORGANIC MATTER. *Soil sci. soc. am. j.* 64:1285-1290, p. 1285–1290, 2000.
- Abuel-Naga, H. M. Et Al. THERMOMECHANICAL MODEL FOR SATURATED CLAYS. *géotechnique*, v. 59, n. 3, p. 273–278, 2009.
- Abuel-Naga, H. M.; Bergado, D. T.; Lim, B. F. EFFECT OF TEMPERATURE ON SHEAR STRENGTH AND YIELDING BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY. v. 47, n. 3, p. 423–436, 2007.
- Alonso, E.; Gens, A.; Josa, A. CONSTITUTIVE MODEL FOR PARTIALLY SATURATED SOILS. *géotechnique*, n. january, 1990.
- Bag, R.; Rabbani, A. APPLIED CLAY SCIENCE EFFECT OF TEMPERATURE ON SWELLING PRESSURE AND COMPRESSIBILITY CHARACTERISTICS OF SOIL. *applied clay science*, v. 136, p. 1–7, 2016.



- Bai, B.; Guo, L.; Han, S. PORE PRESSURE AND CONSOLIDATION OF SATURATED SILTY CLAY INDUCED BY PROGRESSIVELY HEATING/COOLING. *mechanics of materials*, v. 75, p. 84–94, 2014.
- Baldi, G.; Hueckel, T.; Pellegrini, R. THERMAL VOLUME CHANGES OF MINERAL-WATER SYSTEM IN LOW-POROSITY CLAY SOIL. *canadian geotechnical journal*, v. c, n. january 1988, 1988.
- Burghignoli, A.; Desideri, A.; Miliziano, S. A LABORATORY STUDY ON THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOUR OF CLAYEY SOILS. *canadian geotechnical journal*, p. 764–780, 2000.
- Campanella, G.; Mitchell, K. INFLUENCE OF TEMPERATURE VARIATIONS ON SOIL BEHAVIOR, 1968.
- Cekerevac, C.; Laloui, L. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE CYCLIC BEHAVIOUR OF KAOLIN AT HIGH TEMPERATURE. *géotechnique*, n. 8, p. 651–655, 2010.
- Chen, W. Z. et al. EFFECTS OF TEMPERATURE AND THERMALLY-INDUCED MICROSTRUCTURE CHANGE ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF BOOM CLAY. *journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, v. 9, p. 383–395, 2017.
- Cui, Y. J.; Sultan, N.; Delage, P. A THERMOMECHANICAL MODEL FOR SATURATED CLAYS. *canadian geotechnical journal*, v. 620, p. 607–620, 1999.
- De Bruyn, D.; Thimus, J.-F. THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BOOM CLAY: THE RESULTS OF AN INITIAL LABORATORY PROGRAMME. *engineering geology*, v. 41, n. 1–4, p. 117–126, 1994.



- Delage, P.; Sultan, N.; Cui, J. ON THE THERMAL CONSOLIDATION OF BOOM CLAY. *canadian geotechnical journal*, v. 37, n. august, p. 343–354, 2000.
- Graham, J. Et Al. MODIFIED CAM-CLAY MODELLING OF TEMPERATURE EFFECTS IN CLAYS. *canadian geotechnical journal*, v. 621, p. 608–621, 2001.
- Houston, B. S. L.; Houston, W. N.; Williams, N. D. THERMO-MECHANICAL BEHAVIOR OF SEAFLOOR SEDIMENTS. v. i, n. 11, p. 1249–1263, 1986.
- Hueckel, T.; Baldi, G. THERMOPLASTICITY OF SATURATED CLAYS: EXPERIMENTAL CONSTITUTIVE STUDY. *journal of geotechnical engineering*, v. 12, 1990.
- Hueckel, T.; Borsetto, M. THERMOPLASTICITY OF SATURATED SOILS AND SHALES : CONSTITUTIVE EQUATIONS. *ASCE*, v. 9410, n. December 1990, 2014.
- HUeckel, T.; Francois, B.; Laloui, L. TEMPERATURE-DEPENDENT INTERNAL FRICTION OF CLAY IN A CYLINDRICAL HEAT SOURCE PROBLEM. *Géotechnique*, n. 10, p. 831–844, 2011.
- Kuntiwattanakul, P. et al. TEMPERATUE EFFECTS ON UNDRAINED SHEAR CHARACTERISTIC OF CLAY. *Soil and Foundation*, V. 35, N. 1, P. 147–162, 1995.
- Kurz, D. et al. SEMI-EMPIRICAL ELASTIC – THERMOVISCOPLASTIC MODEL FOR CLAY. *Canadian Geotechnical Journal*, V. 1599, N. June, P. 1583–1599, 2016.
- Laloui, L. et al. ISSUES INVOLVED WITH THERMOACTIVE GEOTECHNICAL SYSTEMS: CHARACTERIZATION OF THERMOMECHANICAL SOIL BEHAVIOR AND SOIL-STRUCTURE INTERFACE BEHAVIOR. *THE Journal Of The deep Foundations Institute*, V. 8, N. 2, P. 13, 2014.
- Laloui, L.; Cekerevac, C. THERMO-PLASTICITY OF CLAYS: AN ISOTROPIC YIELD MECHANISM. *Computers and Geotechnics*, V. 30, P. 649–660, 2003.



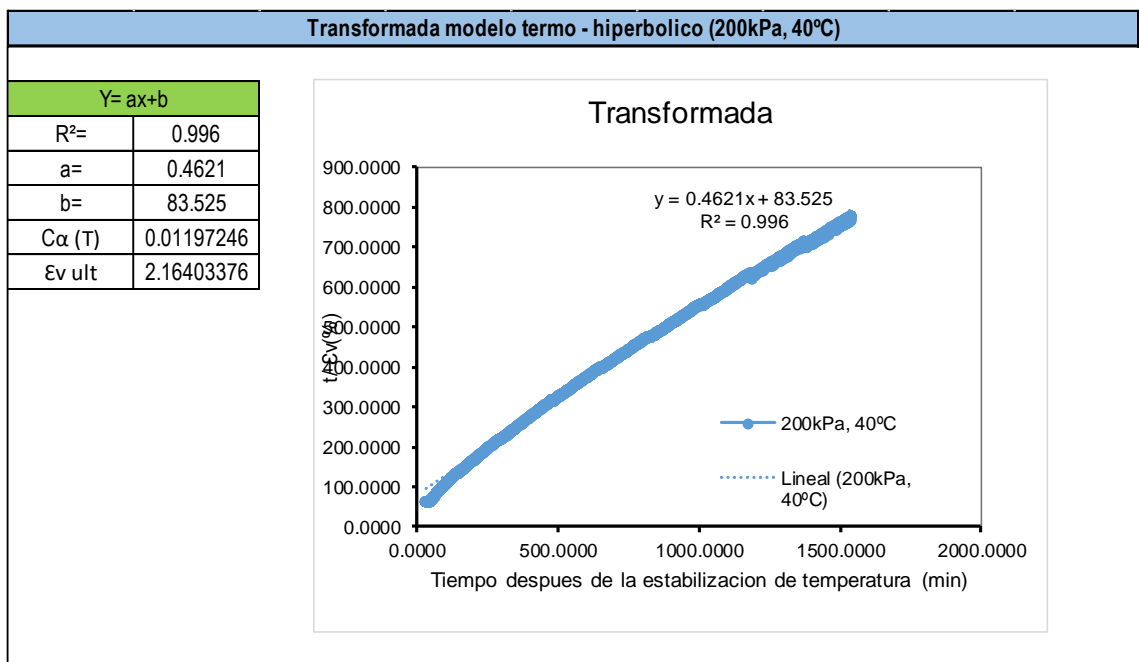
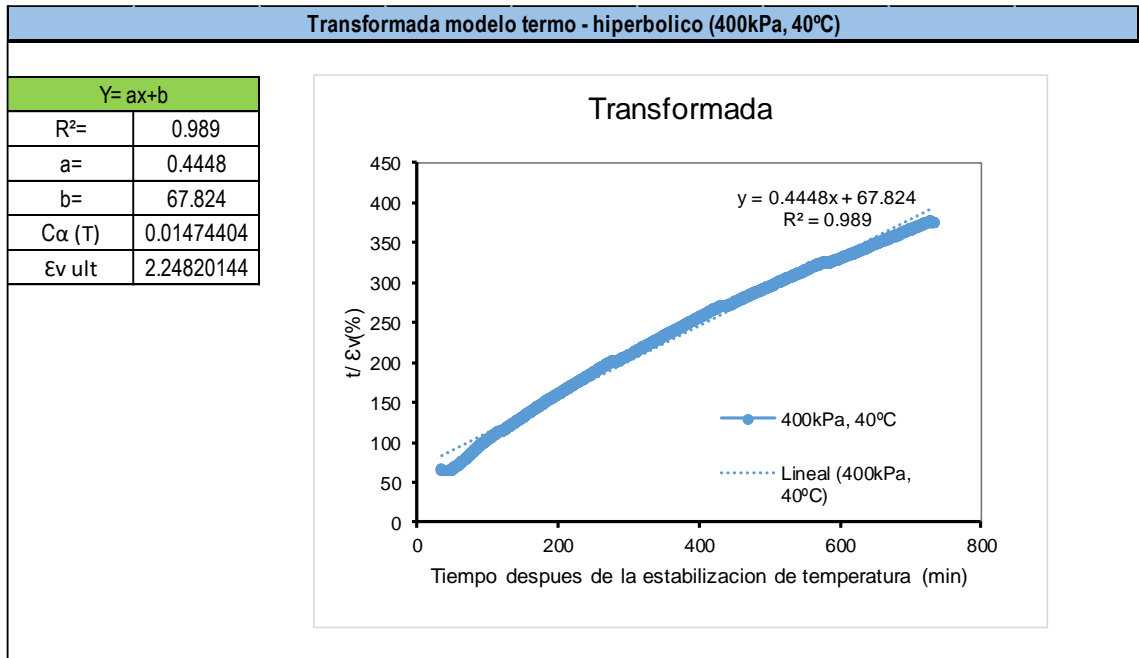
- Uchaipichat, A., & Khalili, N. (2009). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMO-HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF AN UNSATURATED SILT. *Géotechnique*, 59(4), 339-353.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., & Pender, M. (2009). THERMOMECHANICAL MODEL FOR SATURATED CLAYS. *Géotechnique*, 59(3), 273-278.
- Andrade, M. E. S. (2009). CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS ARGILAS MOLES DA CIDADE DE SANTOS (Doctoral Dissertation, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio De Janeiro, RJ, Brasil).
- Bishop, A. W., & Henkel, D. J. (1962). THE MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES IN THE TRIAXIAL TEST.
- Terzaghi, K. (1941). UNDISTURBED CLAY SAMPLES AND UNDISTURBED CLAYS. Harvard University.



ANEXOS

ANEXO 1

DESARROLLO DE CÁLCULO DEL MODELO

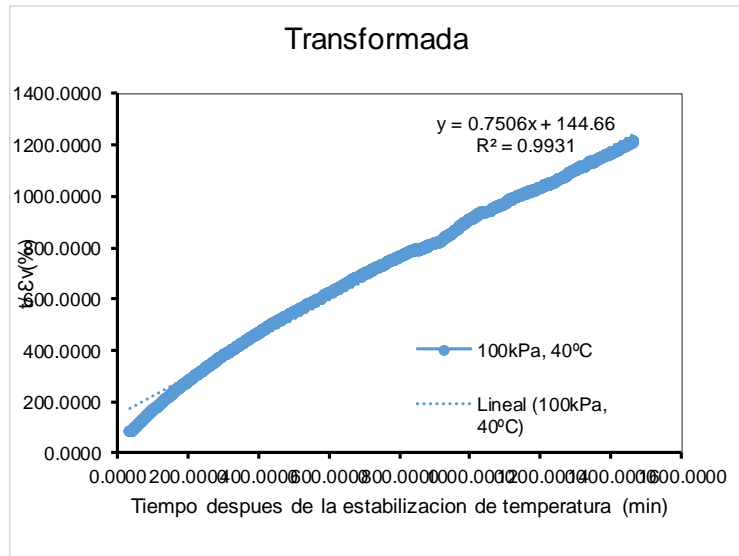




Transformada modelo termo - hiperbolico (100kPa, 40°C)

$Y = ax + b$

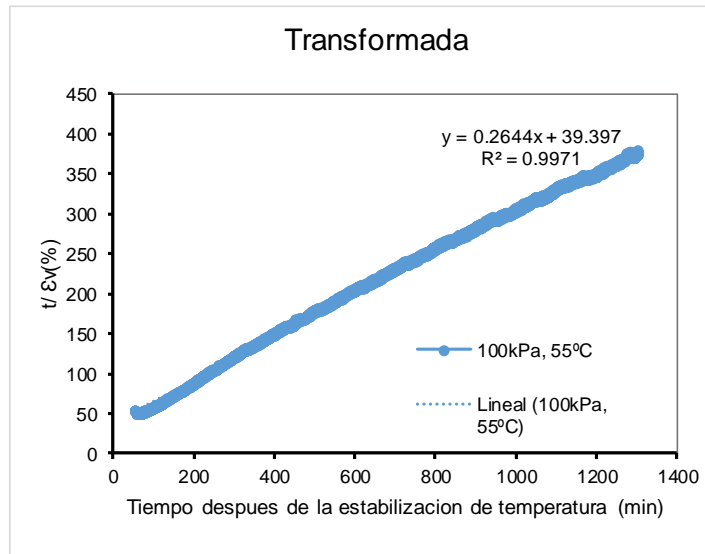
R ² =	0.9931
a=	0.7506
b=	144.66
C α (T)	0.00691276
Ev ult	1.33226752



Transformada modelo termo - hiperbolico (100kPa, 55°C)

$Y = ax + b$

R ² =	0.9971
a=	0.2644
b=	39.397
C α (T)	0.02538264
Ev ult	3.78214826

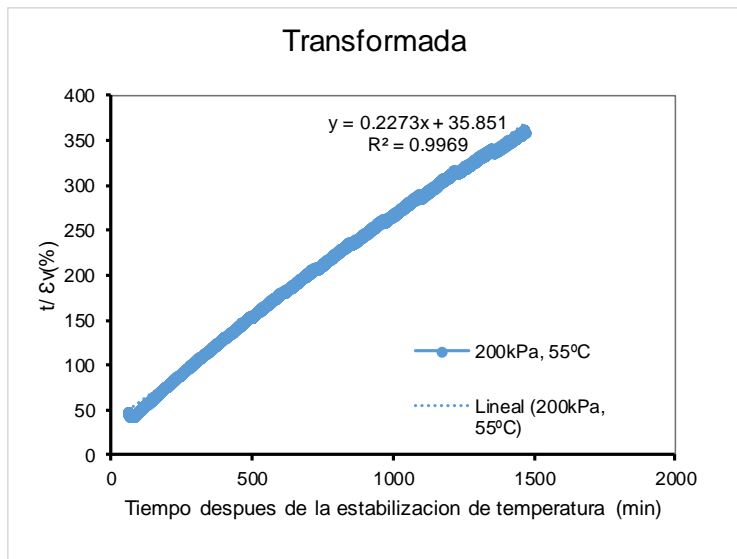




Transformada modelo termo - hiperbolico (200kPa, 55°C)

$Y = ax + b$

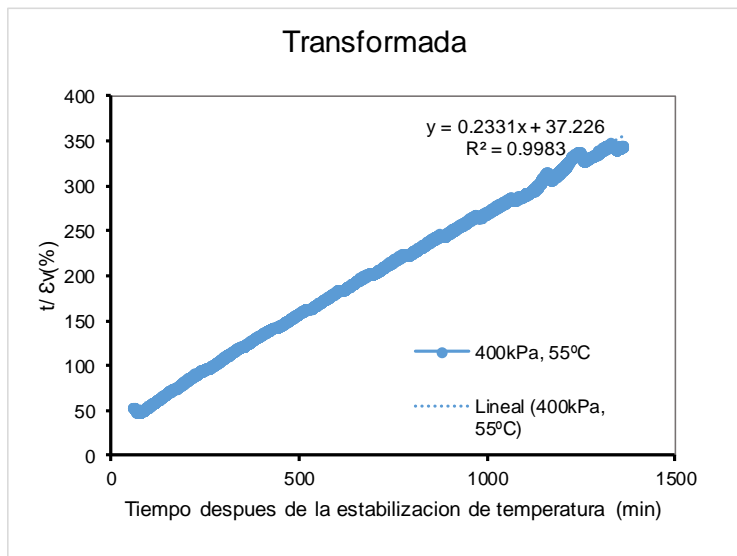
R ² =	0.9969
a=	0.2273
b=	35.851
C α (T)	0.02789322
Ev ult	4.39947206



Transformada modelo termo - hiperbolico (400kPa, 55°C)

$Y = ax + b$

R ² =	0.9983
a=	0.2331
b=	37.226
C α (T)	0.02686295
Ev ult	4.29000429





CP6								
ef : 1.4824		T (°C) : 40.00						
to (hr) : 1753.3333		σ _v (kPa) : 100.00						
DATOS EXPERIMENTAL				DATOS MODELO				
t (min)	e	Ev(%)= Δe/(1+eo)	ΔT ^o	t	t/Ev(%)	Cα (T)	Ev(%)	e
1753.3333	1.4824	0.0000	24.3890	0.0000	#DIV/0!	0.0069	0.0000	1.4824
1753.5000	1.4823	0.0040	24.3780	0.1667	41.3044	0.0069	0.0012	1.4824
1753.6667	1.4823	0.0027	24.3520	0.3333	123.9133	0.0069	0.0023	1.4823
1753.8333	1.4823	0.0040	24.3710	0.5000	123.9133	0.0069	0.0034	1.4823
1754.0000	1.4823	0.0027	24.3710	0.6667	247.8267	0.0069	0.0046	1.4823
1754.1667	1.4823	0.0027	24.3850	0.8333	309.7833	0.0069	0.0057	1.4823
1754.3333	1.4823	0.0054	24.4140	1.0000	185.8700	0.0069	0.0069	1.4822
1754.5000	1.4823	0.0054	24.3490	1.1667	216.8483	0.0069	0.0080	1.4822
1754.6667	1.4823	0.0054	24.3780	1.3333	247.8267	0.0069	0.0092	1.4822
1754.8333	1.4822	0.0067	24.4100	1.5000	223.0440	0.0069	0.0103	1.4821
1755.0000	1.4822	0.0081	24.3960	1.6667	206.5222	0.0069	0.0114	1.4821
1755.1667	1.4822	0.0081	24.4360	1.8333	227.1744	0.0069	0.0126	1.4821
1755.3333	1.4822	0.0081	24.4470	2.0000	247.8267	0.0069	0.0137	1.4821
1755.5000	1.4821	0.0108	24.4610	2.1667	201.3592	0.0069	0.0148	1.4820
1755.6667	1.4821	0.0108	24.4800	2.3333	216.8483	0.0069	0.0159	1.4820
1755.8333	1.4821	0.0121	24.5120	2.5000	206.5222	0.0069	0.0171	1.4820
1756.0000	1.4820	0.0148	24.5640	2.6667	180.2376	0.0069	0.0182	1.4820
1756.1667	1.4821	0.0121	24.6640	2.8333	234.0585	0.0069	0.0193	1.4819
1756.3333	1.4820	0.0148	24.6980	3.0000	202.7673	0.0069	0.0204	1.4819
1756.5000	1.4820	0.0161	24.7630	3.1667	196.1961	0.0069	0.0215	1.4819
1756.6667	1.4820	0.0175	24.8650	3.3333	190.6359	0.0069	0.0227	1.4818
1756.8333	1.4819	0.0188	24.9990	3.5000	185.8700	0.0069	0.0238	1.4818
1757.0000	1.4819	0.0215	25.1120	3.6667	170.3808	0.0069	0.0249	1.4818
1757.1667	1.4818	0.0229	25.2460	3.8333	167.6475	0.0069	0.0260	1.4818
1757.3333	1.4818	0.0229	25.3840	4.0000	174.9365	0.0069	0.0271	1.4817
1757.5000	1.4818	0.0242	25.5080	4.1667	172.1019	0.0069	0.0282	1.4817
1757.6667	1.4817	0.0282	25.6970	4.3333	153.4165	0.0069	0.0293	1.4817
1757.8333	1.4817	0.0269	25.8070	4.5000	167.2830	0.0069	0.0304	1.4816
1758.0000	1.4816	0.0309	25.9590	4.6667	150.8510	0.0069	0.0315	1.4816
1758.1667	1.4816	0.0323	26.1370	4.8333	149.7286	0.0069	0.0326	1.4816
1758.3333	1.4815	0.0350	26.2900	5.0000	142.9769	0.0069	0.0337	1.4816
1758.5000	1.4815	0.0377	26.4170	5.1667	137.1898	0.0069	0.0348	1.4815
1758.6667	1.4814	0.0404	26.6020	5.3333	132.1742	0.0069	0.0359	1.4815
1758.8333	1.4814	0.0417	26.7630	5.5000	131.9077	0.0069	0.0370	1.4815
1759.0000	1.4814	0.0417	26.9090	5.6667	135.9049	0.0069	0.0381	1.4815
1759.1667	1.4813	0.0444	27.0870	5.8333	131.4232	0.0069	0.0391	1.4814
1759.3333	1.4812	0.0471	27.2290	6.0000	127.4537	0.0069	0.0402	1.4814
1759.5000	1.4812	0.0498	27.4300	6.1667	123.9133	0.0069	0.0413	1.4814
1759.6667	1.4811	0.0511	27.6220	6.3333	123.9133	0.0069	0.0424	1.4814
1759.8333	1.4811	0.0538	27.7680	6.5000	120.8155	0.0069	0.0435	1.4813
1760.0000	1.4810	0.0551	27.9210	6.6667	120.8911	0.0069	0.0445	1.4813
1760.1667	1.4809	0.0592	28.1250	6.8333	115.4647	0.0069	0.0456	1.4813
1760.3333	1.4809	0.0619	28.8640	7.0000	113.1383	0.0069	0.0467	1.4812
1760.5000	1.4808	0.0632	29.0090	7.1667	113.3675	0.0069	0.0478	1.4812
1760.6667	1.4808	0.0659	29.1950	7.3333	111.2691	0.0069	0.0488	1.4812
1760.8333	1.4807	0.0686	29.5780	7.5000	109.3353	0.0069	0.0499	1.4812
1761.0000	1.4807	0.0699	29.6650	7.6667	109.6156	0.0069	0.0510	1.4811
1761.1667	1.4806	0.0726	29.8260	7.8333	107.8505	0.0069	0.0520	1.4811
1761.3333	1.4805	0.0753	30.0040	8.0000	106.2114	0.0069	0.0531	1.4811
1761.5000	1.4805	0.0780	30.2010	8.1667	104.6854	0.0069	0.0542	1.4811
1761.6667	1.4804	0.0807	30.3500	8.3333	103.2611	0.0069	0.0552	1.4810
1761.8333	1.4803	0.0834	30.4700	8.5000	101.9287	0.0069	0.0563	1.4810
1762.0000	1.4803	0.0861	30.6160	8.6667	100.6796	0.0069	0.0573	1.4810
1762.1667	1.4802	0.0874	30.7950	8.8333	101.0370	0.0069	0.0584	1.4810
1762.3333	1.4802	0.0901	30.9660	9.0000	99.8704	0.0069	0.0594	1.4809
1762.5000	1.4801	0.0928	31.1260	9.1667	98.7715	0.0069	0.0605	1.4809
1762.6667	1.4800	0.0955	31.2790	9.3333	97.7345	0.0069	0.0615	1.4809



CP7								
ef : 1.3637			T (°C) : 40.00					
to (hr) : 1232.8833			σ'v (kPa) : 200.00					
DATOS EXPERIMENTAL				DATOS MODELO				
t (min)	e	Ev(%)= Δe/(1+eo)	ΔT°	t	t/Ev(%)	Cα (T)	Ev(%)	e
1232.8833	1.3637	0.0000	21.9050	0.0000	#¡DIV/0!	0.0120	0.0000	1.3637
1233.0500	1.3640	-0.0113	21.9340	0.1667	-14.7044	0.0120	0.0020	1.3637
1233.2167	1.3640	-0.0099	21.9160	0.3333	-33.6101	0.0120	0.0040	1.3636
1233.3833	1.3640	-0.0099	21.8970	0.5000	-50.4151	0.0120	0.0060	1.3636
1233.5500	1.3640	-0.0099	21.9080	0.6667	-67.2202	0.0120	0.0080	1.3635
1233.7167	1.3640	-0.0099	21.8720	0.8333	-84.0252	0.0120	0.0099	1.3635
1233.8833	1.3640	-0.0099	21.9160	1.0000	-100.8303	0.0120	0.0119	1.3635
1234.0500	1.3640	-0.0099	21.9120	1.1667	-117.6353	0.0120	0.0139	1.3634
1234.2167	1.3640	-0.0099	21.9410	1.3333	-134.4404	0.0120	0.0158	1.3634
1234.3833	1.3640	-0.0099	21.8650	1.5000	-151.2454	0.0120	0.0178	1.3633
1234.5500	1.3640	-0.0113	21.9090	1.6667	-147.0442	0.0120	0.0198	1.3633
1234.7167	1.3640	-0.0113	21.8720	1.8333	-161.7486	0.0120	0.0217	1.3632
1234.8833	1.3640	-0.0128	21.8980	2.0000	-156.8471	0.0120	0.0237	1.3632
1235.0500	1.3641	-0.0142	21.8900	2.1667	-152.9259	0.0120	0.0256	1.3631
1235.2167	1.3640	-0.0128	21.8900	2.3333	-182.9883	0.0120	0.0276	1.3631
1235.3833	1.3640	-0.0128	21.8970	2.5000	-196.0589	0.0120	0.0295	1.3630
1235.5500	1.3640	-0.0128	21.9040	2.6667	-209.1295	0.0120	0.0315	1.3630
1235.7167	1.3641	-0.0142	21.9080	2.8333	-199.9801	0.0120	0.0334	1.3629
1235.8833	1.3641	-0.0142	21.8720	3.0000	-211.7436	0.0120	0.0353	1.3629
1236.0500	1.3641	-0.0142	21.9410	3.1667	-223.5071	0.0120	0.0373	1.3629
1236.2167	1.3641	-0.0142	21.9340	3.3333	-235.2707	0.0120	0.0392	1.3628
1236.3833	1.3641	-0.0142	21.9480	3.5000	-247.0342	0.0120	0.0411	1.3628
1236.5500	1.3640	-0.0128	21.9730	3.6667	-287.5530	0.0120	0.0430	1.3627
1236.7167	1.3640	-0.0128	21.9840	3.8333	-300.6236	0.0120	0.0449	1.3627
1236.8833	1.3640	-0.0113	21.9870	4.0000	-352.9060	0.0120	0.0469	1.3626
1237.0500	1.3640	-0.0099	22.0050	4.1667	-420.1262	0.0120	0.0488	1.3626
1237.2167	1.3640	-0.0099	22.0570	4.3333	-436.9312	0.0120	0.0507	1.3625
1237.3833	1.3640	-0.0099	22.1830	4.5000	-453.7363	0.0120	0.0526	1.3625
1237.5500	1.3640	-0.0099	22.1660	4.6667	-470.5413	0.0120	0.0545	1.3625
1237.7167	1.3639	-0.0071	22.2660	4.8333	-682.2849	0.0120	0.0564	1.3624
1237.8833	1.3639	-0.0085	22.3600	5.0000	-588.1767	0.0120	0.0583	1.3624
1238.0500	1.3640	-0.0099	22.4580	5.1667	-520.9565	0.0120	0.0601	1.3623
1238.2167	1.3639	-0.0071	22.5780	5.3333	-752.8661	0.0120	0.0620	1.3623
1238.3833	1.3639	-0.0071	22.6730	5.5000	-776.3932	0.0120	0.0639	1.3622
1238.5500	1.3639	-0.0057	22.7630	5.6667	-999.9003	0.0120	0.0658	1.3622
1238.7167	1.3639	-0.0057	22.9090	5.8333	-1029.3092	0.0120	0.0677	1.3621
1238.8833	1.3638	-0.0043	23.0250	6.0000	-1411.6240	0.0120	0.0695	1.3621
1239.0500	1.3638	-0.0028	23.2060	6.1667	-2176.2537	0.0120	0.0714	1.3620
1239.2167	1.3638	-0.0043	23.3220	6.3333	-1490.0476	0.0120	0.0733	1.3620
1239.3833	1.3638	-0.0014	23.4670	6.5000	-4587.7780	0.0120	0.0751	1.3620
1239.5500	1.3638	-0.0043	23.6020	6.6667	-1568.4711	0.0120	0.0770	1.3619
1239.7167	1.3637	0.0000	23.7540	6.8333	#¡DIV/0!	0.0120	0.0788	1.3619
1239.8833	1.3638	-0.0014	23.9070	7.0000	-4940.6840	0.0120	0.0807	1.3618
1240.0500	1.3637	0.0000	24.0160	7.1667	#¡DIV/0!	0.0120	0.0825	1.3618
1240.2167	1.3637	0.0000	24.2300	7.3333	#¡DIV/0!	0.0120	0.0844	1.3617
1240.3833	1.3637	0.0028	24.4330	7.5000	2646.7950	0.0120	0.0862	1.3617
1240.5500	1.3636	0.0043	24.5490	7.6667	1803.7418	0.0120	0.0881	1.3617
1240.7167	1.3636	0.0043	24.7020	7.8333	1842.9536	0.0120	0.0899	1.3616
1240.8833	1.3636	0.0057	24.8290	8.0000	1411.6240	0.0120	0.0917	1.3616
1241.0500	1.3636	0.0071	25.0760	8.1667	1152.8263	0.0120	0.0935	1.3615
1241.2167	1.3635	0.0085	25.2030	8.3333	980.2944	0.0120	0.0954	1.3615
1241.3833	1.3635	0.0099	25.3990	8.5000	857.0574	0.0120	0.0972	1.3614
1241.5500	1.3635	0.0113	25.5220	8.6667	764.6297	0.0120	0.0990	1.3614
1241.7167	1.3634	0.0142	25.7620	8.8333	623.4673	0.0120	0.1008	1.3614
1241.8833	1.3634	0.0156	25.8780	9.0000	577.4825	0.0120	0.1026	1.3613
1242.0500	1.3634	0.0156	26.0170	9.1667	588.1767	0.0120	0.1045	1.3613
1242.2167	1.3633	0.0184	26.2270	9.3333	506.7368	0.0120	0.1063	1.3612



CP8								
ef :	1.1464607	T (°C) :	40.00					
to (hr) :	1268.3000	σ'v (kPa) :	400.00					
DATOS EXPERIMENTAL				DATOS MODELO				
t (min)	e	Ev(%)= Δe/(1+eo)	ΔTº	t	t/Ev(%)	Cα (T)	Ev(%)	e
1268.3000	1.1465	0.0000	23.4340	0.0000	#¡DIV0!	0.0147	0.0000	1.1465
1268.4667	1.1462	0.0144	23.4340	0.1667	11.5790	0.0147	0.0025	1.1464
1268.6333	1.1462	0.0128	23.4160	0.3333	26.0527	0.0147	0.0049	1.1464
1268.8000	1.1462	0.0128	23.4230	0.5000	39.0790	0.0147	0.0073	1.1463
1268.9667	1.1461	0.0160	23.4230	0.6667	41.6843	0.0147	0.0098	1.1463
1269.1333	1.1462	0.0128	23.4050	0.8333	65.1317	0.0147	0.0122	1.1462
1269.3000	1.1462	0.0128	23.4400	1.0000	78.1580	0.0147	0.0146	1.1461
1269.4667	1.1462	0.0112	23.4550	1.1667	104.2107	0.0147	0.0171	1.1461
1269.6333	1.1462	0.0128	23.4660	1.3333	104.2107	0.0147	0.0195	1.1460
1269.8000	1.1462	0.0128	23.4730	1.5000	117.2370	0.0147	0.0219	1.1460
1269.9667	1.1462	0.0112	23.4990	1.6667	148.8724	0.0147	0.0243	1.1459
1270.1333	1.1463	0.0096	23.5320	1.8333	191.0529	0.0147	0.0267	1.1459
1270.3000	1.1462	0.0112	23.5460	2.0000	178.6469	0.0147	0.0291	1.1458
1270.4667	1.1462	0.0112	23.6220	2.1667	193.5341	0.0147	0.0315	1.1458
1270.6333	1.1462	0.0112	23.6980	2.3333	208.4213	0.0147	0.0339	1.1457
1270.8000	1.1462	0.0112	23.7560	2.5000	223.3086	0.0147	0.0363	1.1457
1270.9667	1.1462	0.0144	23.8250	2.6667	185.2634	0.0147	0.0386	1.1456
1271.1333	1.1462	0.0128	23.9600	2.8333	221.4477	0.0147	0.0410	1.1456
1271.3000	1.1461	0.0160	24.0280	3.0000	187.5792	0.0147	0.0434	1.1455
1271.4667	1.1461	0.0160	24.0800	3.1667	198.0003	0.0147	0.0457	1.1455
1271.6333	1.1461	0.0160	24.2460	3.3333	208.4213	0.0147	0.0481	1.1454
1271.8000	1.1461	0.0176	24.3920	3.5000	198.9476	0.0147	0.0504	1.1454
1271.9667	1.1461	0.0160	24.4940	3.6667	229.2635	0.0147	0.0528	1.1453
1272.1333	1.1461	0.0160	24.6540	3.8333	239.6845	0.0147	0.0551	1.1453
1272.3000	1.1460	0.0192	24.7810	4.0000	208.4213	0.0147	0.0575	1.1452
1272.4667	1.1460	0.0192	24.9080	4.1667	217.1056	0.0147	0.0598	1.1452
1272.6333	1.1460	0.0224	25.0680	4.3333	193.5341	0.0147	0.0621	1.1451
1272.8000	1.1460	0.0224	25.2460	4.5000	200.9777	0.0147	0.0644	1.1451
1272.9667	1.1459	0.0240	25.3910	4.6667	194.5266	0.0147	0.0668	1.1450
1273.1333	1.1459	0.0240	25.5440	4.8333	201.4740	0.0147	0.0691	1.1450
1273.3000	1.1459	0.0256	25.7290	5.0000	195.3950	0.0147	0.0714	1.1449
1273.4667	1.1459	0.0272	25.9370	5.1667	190.0312	0.0147	0.0737	1.1449
1273.6333	1.1458	0.0288	26.0600	5.3333	185.2634	0.0147	0.0760	1.1448
1273.8000	1.1458	0.0304	26.2130	5.5000	180.9975	0.0147	0.0783	1.1448
1273.9667	1.1458	0.0304	26.3980	5.6667	186.4822	0.0147	0.0806	1.1447
1274.1333	1.1458	0.0304	26.5870	5.8333	191.9670	0.0147	0.0828	1.1447
1274.3000	1.1457	0.0336	26.7120	6.0000	178.6469	0.0147	0.0851	1.1446
1274.4667	1.1457	0.0368	26.9000	6.1667	167.6432	0.0147	0.0874	1.1446
1274.6333	1.1457	0.0368	27.0780	6.3333	172.1741	0.0147	0.0897	1.1445
1274.8000	1.1456	0.0384	27.3150	6.5000	169.3423	0.0147	0.0919	1.1445
1274.9667	1.1456	0.0400	27.4600	6.6667	166.7371	0.0147	0.0942	1.1444
1275.1333	1.1456	0.0400	27.6200	6.8333	170.9055	0.0147	0.0964	1.1444
1275.3000	1.1456	0.0416	27.7730	7.0000	168.3403	0.0147	0.0987	1.1443
1275.4667	1.1455	0.0448	27.9510	7.1667	160.0378	0.0147	0.1009	1.1443
1275.6333	1.1454	0.0480	28.1300	7.3333	152.8423	0.0147	0.1032	1.1442
1275.8000	1.1454	0.0496	28.3150	7.5000	151.2735	0.0147	0.1054	1.1442
1275.9667	1.1453	0.0528	28.4680	7.6667	145.2634	0.0147	0.1076	1.1442
1276.1333	1.1453	0.0544	28.6570	7.8333	144.0559	0.0147	0.1099	1.1441
1276.3000	1.1453	0.0560	28.8540	8.0000	142.9175	0.0147	0.1121	1.1441
1276.4667	1.1452	0.0592	28.9960	8.1667	138.0087	0.0147	0.1143	1.1440
1276.6333	1.1451	0.0624	29.1810	8.3333	133.6034	0.0147	0.1165	1.1440
1276.8000	1.1451	0.0640	29.3340	8.5000	132.8686	0.0147	0.1187	1.1439
1276.9667	1.1450	0.0672	29.5160	8.6667	129.0227	0.0147	0.1209	1.1439
1277.1333	1.1450	0.0672	29.6840	8.8333	131.5039	0.0147	0.1231	1.1438
1277.3000	1.1449	0.0720	29.8980	9.0000	125.0528	0.0147	0.1253	1.1438
1277.4667	1.1448	0.0752	30.0150	9.1667	121.9487	0.0147	0.1275	1.1437
1277.6333	1.1448	0.0752	30.1860	9.3333	124.1659	0.0147	0.1297	1.1437



CP9								
ef :		1.50547		T (°C) :		55.00		
to (hr) :		916.1000		σ _v (kPa) :		100.00		
DATOS EXPERIMENTAL				DATOS MODELO				
t (min)	e	Ev(%)= Δe/(1+eo)	ΔTº	t	t/Ev(%)	Ca (T)	Ev(%)	e
916.1000	1.5055	0.0000	23.7040	0.0000	#DIV/0!	0.0254	0.0000	1.5055
916.2667	1.5062	-0.0295	23.7040	0.1667	-5.6582	0.0254	0.0042	1.5054
916.4333	1.5062	-0.0281	23.7220	0.3333	-11.8553	0.0254	0.0084	1.5053
916.6000	1.5061	-0.0268	23.7220	0.5000	-18.6721	0.0254	0.0126	1.5052
916.7667	1.5062	-0.0281	23.7410	0.6667	-23.7105	0.0254	0.0168	1.5051
916.9333	1.5062	-0.0281	23.7230	0.8333	-29.6382	0.0254	0.0210	1.5049
917.1000	1.5062	-0.0295	23.7660	1.0000	-33.9492	0.0254	0.0252	1.5048
917.2667	1.5062	-0.0281	23.7340	1.1667	-41.4934	0.0254	0.0294	1.5047
917.4333	1.5062	-0.0281	23.7730	1.3333	-47.4211	0.0254	0.0335	1.5046
917.6000	1.5062	-0.0281	23.7730	1.5000	-53.3487	0.0254	0.0377	1.5045
917.7667	1.5061	-0.0254	23.7810	1.6667	-65.5160	0.0254	0.0418	1.5044
917.9333	1.5061	-0.0254	23.8170	1.8333	-72.0676	0.0254	0.0460	1.5043
918.1000	1.5061	-0.0254	23.8380	2.0000	-78.6192	0.0254	0.0501	1.5042
918.2667	1.5061	-0.0254	23.7880	2.1667	-85.1708	0.0254	0.0542	1.5041
918.4333	1.5061	-0.0241	23.8380	2.3333	-96.8180	0.0254	0.0583	1.5040
918.6000	1.5060	-0.0228	23.8700	2.5000	-109.8356	0.0254	0.0624	1.5039
918.7667	1.5060	-0.0228	23.9140	2.6667	-117.1580	0.0254	0.0665	1.5038
918.9333	1.5060	-0.0214	23.9650	2.8333	-132.2604	0.0254	0.0706	1.5037
919.1000	1.5060	-0.0214	24.0670	3.0000	-140.0404	0.0254	0.0746	1.5036
919.2667	1.5060	-0.0228	24.1070	3.1667	-139.1251	0.0254	0.0787	1.5035
919.4333	1.5060	-0.0201	24.1390	3.3333	-165.9738	0.0254	0.0828	1.5034
919.6000	1.5060	-0.0214	24.2520	3.5000	-163.3804	0.0254	0.0868	1.5033
919.7667	1.5060	-0.0214	24.3680	3.6667	-171.1605	0.0254	0.0908	1.5032
919.9333	1.5059	-0.0187	24.4880	3.8333	-204.5034	0.0254	0.0949	1.5031
920.1000	1.5059	-0.0174	24.5470	4.0000	-229.8098	0.0254	0.0989	1.5030
920.2667	1.5059	-0.0187	24.7170	4.1667	-222.2863	0.0254	0.1029	1.5029
920.4333	1.5059	-0.0187	24.8070	4.3333	-231.1778	0.0254	0.1069	1.5028
920.6000	1.5059	-0.0187	24.9700	4.5000	-240.0692	0.0254	0.1109	1.5027
920.7667	1.5059	-0.0161	25.1160	4.6667	-290.4541	0.0254	0.1149	1.5026
920.9333	1.5058	-0.0134	25.2070	4.8333	-360.9930	0.0254	0.1188	1.5025
921.1000	1.5058	-0.0134	25.3340	5.0000	-373.4410	0.0254	0.1228	1.5024
921.2667	1.5058	-0.0121	25.4690	5.1667	-428.7656	0.0254	0.1267	1.5023
921.4333	1.5057	-0.0107	25.5890	5.3333	-497.9213	0.0254	0.1307	1.5022
921.6000	1.5057	-0.0094	25.7990	5.5000	-586.8359	0.0254	0.1346	1.5021
921.7667	1.5057	-0.0080	25.9700	5.6667	-705.3886	0.0254	0.1386	1.5020
921.9333	1.5056	-0.0067	26.1040	5.8333	-871.3623	0.0254	0.1425	1.5019
922.1000	1.5056	-0.0067	26.2500	6.0000	-896.2584	0.0254	0.1464	1.5018
922.2667	1.5056	-0.0054	26.4280	6.1667	-1151.4431	0.0254	0.1503	1.5017
922.4333	1.5055	-0.0027	26.5550	6.3333	-2365.1263	0.0254	0.1542	1.5016
922.6000	1.5056	-0.0040	26.6570	6.5000	-1618.2443	0.0254	0.1581	1.5015
922.7667	1.5055	-0.0027	26.8320	6.6667	-2489.6067	0.0254	0.1620	1.5014
922.9333	1.5055	-0.0013	27.0460	6.8333	-5103.6937	0.0254	0.1658	1.5013
923.1000	1.5055	0.0000	27.1800	7.0000	#DIV/0!	0.0254	0.1697	1.5012
923.2667	1.5054	0.0027	27.3510	7.1667	2676.3272	0.0254	0.1736	1.5011
923.4333	1.5054	0.0027	27.4930	7.3333	2738.5673	0.0254	0.1774	1.5010
923.6000	1.5054	0.0040	27.6640	7.5000	1867.2050	0.0254	0.1812	1.5009
923.7667	1.5053	0.0067	27.8280	7.6667	1145.2191	0.0254	0.1851	1.5008
923.9333	1.5052	0.0107	27.9730	7.8333	731.3220	0.0254	0.1889	1.5007
924.1000	1.5053	0.0080	28.1260	8.0000	995.8427	0.0254	0.1927	1.5006
924.2667	1.5052	0.0121	28.2860	8.1667	677.7263	0.0254	0.1965	1.5006
924.4333	1.5051	0.0134	28.3920	8.3333	622.4017	0.0254	0.2003	1.5005
924.6000	1.5051	0.0161	28.5990	8.5000	529.0414	0.0254	0.2041	1.5004
924.7667	1.5050	0.0187	28.8450	8.6667	462.3555	0.0254	0.2079	1.5003
924.9333	1.5050	0.0187	28.9370	8.8333	471.2470	0.0254	0.2117	1.5002
925.1000	1.5050	0.0201	29.0890	9.0000	448.1292	0.0254	0.2154	1.5001
925.2667	1.5048	0.0254	29.2490	9.1667	360.3378	0.0254	0.2192	1.5000
925.4333	1.5048	0.0281	29.3950	9.3333	331.9476	0.0254	0.2229	1.4999



1229.0667	1.0908	0.1908	34.4340	19.8333	103.9363	0.0269	0.4739	1.0849
1229.2333	1.0907	0.1940	34.5430	20.0000	103.0915	0.0269	0.4775	1.0848
1229.4000	1.0907	0.1972	34.6200	20.1667	102.2739	0.0269	0.4810	1.0847
1229.5667	1.0905	0.2035	34.7470	20.3333	99.8967	0.0269	0.4845	1.0846
1229.7333	1.0905	0.2067	34.7880	20.5000	99.1661	0.0269	0.4880	1.0846
1229.9000	1.0904	0.2115	34.9080	20.6667	97.7173	0.0269	0.4916	1.0845
1230.0667	1.0903	0.2163	34.9920	20.8333	96.3324	0.0269	0.4951	1.0844
1230.2333	1.0902	0.2210	35.0970	21.0000	95.0073	0.0269	0.4986	1.0844
1230.4000	1.0901	0.2242	35.1630	21.1667	94.4030	0.0269	0.5021	1.0843
1230.5667	1.0900	0.2274	35.2650	21.3333	93.8156	0.0269	0.5055	1.0842
1230.7333	1.0899	0.2322	35.3160	21.5000	92.6058	0.0269	0.5090	1.0841
1230.9000	1.0898	0.2369	35.4440	21.6667	91.4447	0.0269	0.5125	1.0841
1231.0667	1.0897	0.2417	35.4690	21.8333	90.3294	0.0269	0.5160	1.0840
1231.2333	1.0896	0.2465	35.5890	22.0000	89.2573	0.0269	0.5194	1.0839
1231.4000	1.0896	0.2497	35.6840	22.1667	88.7878	0.0269	0.5229	1.0838
1231.5667	1.0895	0.2544	35.7500	22.3333	87.7781	0.0269	0.5263	1.0838
1231.7333	1.0894	0.2592	35.8370	22.5000	86.8056	0.0269	0.5298	1.0837
1231.9000	1.0893	0.2608	35.9390	22.6667	86.9153	0.0269	0.5332	1.0836
1232.0667	1.0893	0.2640	36.0230	22.8333	86.4995	0.0269	0.5366	1.0836
1232.2333	1.0892	0.2687	36.1000	23.0000	85.5842	0.0269	0.5401	1.0835
1232.4000	1.0891	0.2703	36.1620	23.1667	85.6973	0.0269	0.5435	1.0834
1232.5667	1.0890	0.2751	36.2530	23.3333	84.8171	0.0269	0.5469	1.0833
1232.7333	1.0890	0.2783	36.2970	23.5000	84.4466	0.0269	0.5503	1.0833
1232.9000	1.0889	0.2815	36.4060	23.6667	84.0846	0.0269	0.5537	1.0832
1233.0667	1.0888	0.2846	36.4940	23.8333	83.7306	0.0269	0.5571	1.0831
1233.2333	1.0888	0.2862	36.5700	24.0000	83.8477	0.0269	0.5605	1.0831
1233.4000	1.0887	0.2910	36.6470	24.1667	83.0459	0.0269	0.5639	1.0830
1233.5667	1.0887	0.2926	36.7490	24.3333	83.1642	0.0269	0.5672	1.0829
1233.7333	1.0886	0.2974	36.8000	24.5000	82.3905	0.0269	0.5706	1.0828
1233.9000	1.0885	0.3005	36.8840	24.6667	82.0732	0.0269	0.5740	1.0828
1234.0667	1.0885	0.3021	36.9530	24.8333	82.1928	0.0269	0.5773	1.0827
1234.2333	1.0884	0.3069	37.0300	25.0000	81.4583	0.0269	0.5807	1.0826
1234.4000	1.0883	0.3085	37.1060	25.1667	81.5787	0.0269	0.5840	1.0826
1234.5667	1.0882	0.3133	37.1570	25.3333	80.8684	0.0269	0.5874	1.0825
1234.7333	1.0882	0.3164	37.2520	25.5000	80.5823	0.0269	0.5907	1.0824
1234.9000	1.0881	0.3180	37.3030	25.6667	80.7034	0.0269	0.5940	1.0824
1235.0667	1.0881	0.3212	37.3870	25.8333	80.4233	0.0269	0.5973	1.0823
1235.2333	1.0880	0.3260	37.4820	26.0000	79.7576	0.0269	0.6006	1.0822
1235.4000	1.0879	0.3308	37.5330	26.1667	79.1111	0.0269	0.6040	1.0821
1235.5667	1.0879	0.3308	37.5910	26.3333	79.6150	0.0269	0.6073	1.0821
1235.7333	1.0878	0.3339	37.6570	26.5000	79.3559	0.0269	0.6106	1.0820
1235.9000	1.0877	0.3371	37.7370	26.6667	79.1016	0.0269	0.6138	1.0819
1236.0667	1.0877	0.3403	37.7880	26.8333	78.8521	0.0269	0.6171	1.0819
1236.2333	1.0876	0.3435	37.8290	27.0000	78.6072	0.0269	0.6204	1.0818
1236.4000	1.0875	0.3467	37.9670	27.1667	78.3669	0.0269	0.6237	1.0817
1236.5667	1.0875	0.3498	38.0070	27.3333	78.1308	0.0269	0.6269	1.0817
1236.7333	1.0874	0.3530	38.0400	27.5000	77.8991	0.0269	0.6302	1.0816
1236.9000	1.0873	0.3562	38.1460	27.6667	77.6714	0.0269	0.6335	1.0815
1237.0667	1.0873	0.3578	38.1970	27.8333	77.7921	0.0269	0.6367	1.0815
1237.2333	1.0872	0.3610	38.2810	28.0000	77.5684	0.0269	0.6400	1.0814
1237.4000	1.0872	0.3642	38.3250	28.1667	77.3486	0.0269	0.6432	1.0813
1237.5667	1.0871	0.3673	38.3760	28.3333	77.1327	0.0269	0.6464	1.0813
1237.7333	1.0870	0.3705	38.4700	28.5000	76.9204	0.0269	0.6497	1.0812
1237.9000	1.0870	0.3737	38.5040	28.6667	76.7118	0.0269	0.6529	1.0811
1238.0667	1.0869	0.3753	38.6060	28.8333	76.8308	0.0269	0.6561	1.0811
1238.2333	1.0868	0.3801	38.6820	29.0000	76.3049	0.0269	0.6593	1.0810
1238.4000	1.0868	0.3816	38.7330	29.1667	76.4237	0.0269	0.6625	1.0809
1238.5667	1.0867	0.3864	38.7920	29.3333	75.9115	0.0269	0.6657	1.0809
1238.7333	1.0866	0.3896	38.8610	29.5000	75.7196	0.0269	0.6689	1.0808
1238.9000	1.0866	0.3912	38.9370	29.6667	75.8379	0.0269	0.6721	1.0807
1239.0667	1.0865	0.3944	38.9960	29.8333	75.6489	0.0269	0.6753	1.0807
1239.2333	1.0865	0.3975	39.0470	30.0000	75.4630	0.0269	0.6784	1.0806



ANEXO 2

CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN



ANEXO 3

CERTIFICADO DE USO DE EQUIPOS EN EL LABORATORIO DE GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE (UENF).