

Desarrollo de correlaciones para determinar el potencial a licuefacción aplicando el ensayo de penetración estática de piezocono (CPTu) en una cámara de calibración (CC).

SEBASTIÁN RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ 201200763

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Mayo 2018

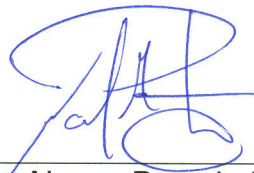
TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Alonso Poveda Montoya, Ing. Rafael Baltodano Goulding, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



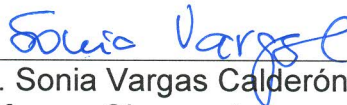
Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Alonso Poveda Montoya.
Profesor Guía



Ing. Rafael Baltodano Goulding.
Profesor Lector



Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

Desarrollo de correlaciones para determinar el potencial a licuefacción aplicando el ensayo de penetración estática de piezocono (CPTu) en una cámara de calibración (CC).

Dedicatoria y agradecimientos

Este proyecto de graduación no hubiese sido posible sin el apoyo de muchas personas; en primer lugar, quiero dar gracias a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado durante mis años de estudio en el Tecnológico de Costa Rica. Especialmente le debo mi más profundo respeto y gratitud a Vilma Rodríguez, mi madre. Gracias por su interminable cariño y apoyo.

Además, quisiera expresar agradecimiento a mis amigos que estuvieron pendientes, especialmente a Noelia Rodríguez, María Nela Rodríguez y Robert Schuppenhauer y también a todas las personas que he conocido durante mi corta estancia en Alemania; ya que sin ellos mi estadía en Karlsruhe no hubiese sido tan genial.

También agradezco con la Escuela de Ingeniería en Construcción, la Dirección de Cooperación del TEC y la Comisión Interdepartamental del programa de pasantías para Movilidad Estudiantil; por su apoyo y confianza en mis habilidades como estudiante para desarrollar esta práctica profesional en el KIT.

Finalmente, pero sin restar importancia, me gustaría expresar mi más sincera gratitud a mis supervisores, el Prof. Ing. Alonso Poveda, PD Dr. Ing. habil. Torsten Wichtmann, Nebil Demiral y el Ing. Ivo Kimming, por hacer posible el desarrollo de la práctica profesional en el KIT; agradezco con su apoyo a mi práctica profesional, por compartir su conocimiento, paciencia y entusiasmo hacia mi trabajo. Su orientación me ayudó en el período de trabajo y redacción de este informe.

Abstract

The main objective of this project was to develop correlations to determine the liquefaction potential of loose sand deposits, using the CPTu test; for this purpose, it was necessary to determine the behavior of CPTu tests in the calibration chamber (CC) of the Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics (IBF) in Karlsruhe Institute of Technology, moreover to determine the resistance to liquefaction by means of cyclic undrained tests for sand samples, also to establish a correlation between the relative storage density (I_D) of the sample, the tip resistance (q_c) of the CPTu and the liquefaction resistance (CRR) of the triaxial tests and finally compare the experimental correlation obtained with existing correlations of the literature. With this project it was concluded that when comparing the correlations for the experimental materials studied by the IBF, it was determined that in the region of low storage densities and low peak resistances a good similarity. However, for higher densities and, therefore, greater peak resistances, the correlation curves for the experimental materials were flatter than in bibliographic references. In other words, the liquefaction resistance of the experimental materials in this area is lower than what the curves of the literature would have predicted. Finally, it is not possible to directly apply the results of this project in any other sand deposit; since the materials of the correlations made (Kali4) and other materials differ in aspects such as mineralogy (geological criteria), granulometry and particle form (composition criteria); which influence the susceptibility to liquefaction.

Resumen

El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar correlaciones para determinar el potencial a licuefacción de depósitos de arenas sueltas, empleando el ensayo CPTu; para ello fue necesario determinar el comportamiento de ensayos de penetración estática de piezocono (CPTu) en la cámara de calibración (CC) del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas (IBF) en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe, además determinar la resistencia a licuefacción por medio de ensayos triaxiales cíclicos no drenados para muestras de arena, plantear una correlación entre la densidad relativa de almacenamiento (ID) de la muestra, la resistencia de punta (q_c) del CPTu y la resistencia al flujo (CRR) de los ensayos triaxiales y por último comparar la correlación experimental obtenida con correlaciones existentes de la literatura. Con este proyecto se concluyó que en la región de bajas densidades de almacenamiento y bajas resistencias en punta una buena similitud, esto al comparar las correlaciones para los materiales experimentales estudiados por el IBF con correlaciones provenientes de la literatura. Ahora bien, para densidades altas y, por lo tanto, mayores resistencias en punta, las curvas de correlación para los materiales experimentales fueron más planas que en referencias bibliográficas; en otras palabras, la resistencia a licuefacción de los materiales experimentales en esta área es menor de lo que habrían predicho las curvas de la literatura. Así pues, no es posible aplicar directamente los resultados de este proyecto a otros sitios de estudio; ya que los materiales de las correlaciones realizadas (Kali4) y otros suelos difieren en aspectos como la mineralogía (criterios geológicos), la granulometría y la forma de partícula (criterios de composición); los cuales influyen sobre la susceptibilidad a la licuación.

Keywords/Palabras clave: Ensayo penetración estática de piezocono (CPTu), Resistencia de cono en punta q_c , Densidad relativa I_D , Ensayos triaxiales cíclicos no drenados, Relación de resistencia cíclica (CRR), Licuefacción.

Sistemas de unidades y simbología

Múltiplos:

Micro(μ) = 10^{-6}
 Mili (m) = 10^{-3}
 Kilo (k) = 10^3
 Mega (M) = 10^6

Factores de conversión:

Fuerza:

1 ton = 9,8 kN
 1 kg = 9,8 N

Presión:

1 kg/cm² = 100 kPa = 1 bar
 1 t/m² \approx 10 kPa
 14,5 psi = 100 kPa

Unidades Imperial:

Distancia: Pies (ft)
Área: Pies cuadrados (ft²)
Fuerza: Pounds (p)
Presión/stress: Pounds/pies² (psf)

Unidades SI:

Metro (m)
 Metro cuadrado (m²)
 Newton (N)
 Pascal (Pa) = (N/m²)

Unidades múltiples:

Distancia: pulgadas (in)
Área: Pies cuadrados (ft²)
Fuerza: Tonelada (t)
Presión/stress: Pounds/pulgada² (psi)

Milímetro (mm)
 Milímetro cuadrado (mm²)
 kilonewton (kN)
 kilopascal (kPa) = (kN/m²)
 megapascal (MPa) = (MN/m²)

Términos derivados del ensayo CPTu y prueba triaxial cíclica no drenada:

CC: Cámara de calibración
CPTu: Ensayo penetración estática de piezocono
w: Contenido de humedad (%)
I_D: Densidad relativa (-)
C_U: Coeficiente de uniformidad (-)
q_c: Resistencia a penetración de punta (MPa)
u: Presión de poros (kPa)
q_{c1}: Resistencia a penetración de punta normalizada para una presión de 100 kPa

σ_1 : Esfuerzo vertical en la CC
 σ_3 : Esfuerzo horizontal en la CC
q^{ampl}: Amplitud del esfuerzo desviador
 $\sigma'_v = p_0'$: Presión inicial efectiva
CSR: Cyclic Stress Ratio
CRR: Cyclic Resistance Ratio
N_f ($\epsilon_1 = 10\%$): Número de ciclos para obtener el criterio de falla del 10% de alargamiento
B: Parámetro de Skempton B
R²: Proporción de variabilidad de dato

Contenido

PREFACIO	1		
RESUMEN EJECUTIVO	2		
1 INTRODUCCIÓN	7		
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8		
1.1.1 <i>Antecedentes</i>	9		
1.1.1.1 Minería a cielo abierto en Alemania	9		
1.1.1.2 Reutilización de fosas después del			
periodo de explotación.....	10		
1.1.1.3 Regiones sísmicas en Alemania.	10		
1.1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	11		
1.1.2.1 Problemática de licuefacción en			
depósitos de arena.....	11		
2 MARCO TEÓRICO	13		
2.1 MARCO TEÓRICO.....	14		
2.1.1 <i>Fenómeno de licuefacción de suelos</i>	14		
2.1.1.1 Parámetros que intervienen en la			
resistencia a licuefacción de arenas.....	15		
2.1.2 <i>Influencia de la densidad en la</i>			
<i>resistencia a licuefacción</i>	15		
2.1.3 <i>Investigación geotécnica in situ</i>	16		
2.1.4 <i>Ensayo de penetración estática de</i>			
<i>piezocono CPTu</i>	17		
2.1.4.1 CPTu en la cámara de calibración	18		
2.1.4.2 Efecto de las dimensiones de la			
cámara de calibración en la resistencia en punta			
q_c	18		
2.1.4.3 Relación entre los resultados			
provenientes de CPTu y la densidad.....	19		
2.1.5 <i>Ensayo triaxial cíclico no drenado</i>	21		
2.1.5.1 Criterio de estado.....	21		
2.1.5.2 Relación de Esfuerzos Cíclicos			
(CSR) y Relación de Resistencia Cíclica (CRR)	22		
2.1.6 <i>Propiedades del material</i>			
<i>experimental</i>	24		
2.1.7 <i>Labores previas con la CC del IBF</i>	25		
2.1.7.1 Proyecto de investigación			
(Wichtmann & Triantafyllidis, 2017), informe 2:	25		
2.1.7.2 Tesis de licenciatura (Scholz, 2017):	25		
3 METODOLOGÍA	27		
		3.1 METODOLOGÍA.....	28
		3.1.1 <i>Ensayos CPTu en la cámara de</i>	
		<i>calibración</i>	28
		3.1.1.1 Preparación del material Kali4.....	28
		3.1.1.2 Instalación de la muestra en la CC	29
		3.1.1.3 Ejecución del ensayo CPTu en la	30
		CC.....	
		3.1.1.4 Extracción de la CC y muestreo ..	31
		3.1.2 <i>Ensayos triaxiales cíclicos no</i>	
		<i>drenados</i>	33
		3.1.2.1 Instalación de la prueba.....	33
		3.1.3 <i>Desarrollo de la correlación</i>	36
		3.1.3.1 Relación resistencia en punta	
		máxima q_c vs I_D	36
		3.1.3.2 Relación de la resistencia a	
		licuefacción (CRR) vs I_D	38
		4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE	
		RESULTADOS	39
		4.1 RESULTADOS.....	40
		4.1.1 <i>Resultados de ensayos CPTu en la</i>	
		<i>cámara de calibración del IBF para el material</i>	
		<i>experimental Kali4</i>	40
		4.1.2 <i>Resultados de ensayos triaxiales</i>	
		<i>cíclicos no drenados para el material</i>	
		<i>experimental Kali4</i>	46
		4.1.2.1 Presión efectiva inicial $p'_0 = 100$ kPa	46
		4.1.3 <i>Correlación entre la resistencia en</i>	
		<i>punta normalizada q_{c1} y la relación de</i>	
		<i>resistencia cíclica CRR para el material</i>	
		<i>experimental Kali4</i>	48
		4.1.4 <i>Comparación entre la correlación del</i>	
		<i>material experimental y las existentes en la</i>	
		<i>literatura</i>	49
		4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
		4.2.1 <i>Ensayo CPTu en la cámara de</i>	
		<i>calibración del IBF</i>	51
		4.2.2 <i>Ensayos triaxiales cíclicos no</i>	
		<i>drenados</i>	59
		4.2.3 <i>Correlación resistencia en punta</i>	
		<i>normalizada q_{c1} - relación de resistencia</i>	
		<i>cíclica CRR</i>	60
		4.2.4 <i>Comparación entre la correlación del</i>	
		<i>material experimental y las existentes en la</i>	
		<i>literatura</i>	61

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
	63	
5.1	CONCLUSIONES	64
5.2	RECOMENDACIONES.....	65
6	APÉNDICES Y ANEXOS	66

6.1	APÉNDICES	67
6.2	ANEXOS.....	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

Prefacio

Este informe de proyecto de graduación está basado en la práctica profesional que se realizó en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe, también conocido como KIT por sus siglas en alemán (Karlsruher Institut für Technologie). El KIT es una de las mayores y más prestigiosas instituciones académicas y de investigación de Alemania; reconocida mundialmente por el alto nivel de los trabajos de investigación que en ella se desarrollan. Más específicamente, el proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, también conocido como IBF por sus siglas en alemán (Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik).

El IBF además de proyectos de investigación, realiza servicios de consultoría en proyectos geotécnicos, así como la evaluación de subsuelos en investigaciones de campo; por lo tanto, se propuso como proyecto de graduación la participación en la campaña programada de investigaciones geotécnicas en el IBF; esto con la intención de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería en Construcción. Entre las razones principales por las cuales se deben realizar investigaciones geotécnicas detalladas se encuentra: la susceptibilidad a licuefacción, presencia de suelos expansivos. Por otra parte, los desarrollos de los estudios geotécnicos pueden dividirse especialmente en cuatro etapas: estudios geotécnicos preliminares, estudios geotécnicos para el diseño y construcción, estudios geotécnicos de comprobación durante la ejecución de la obra y, por último, estudios de seguimiento.

Durante el tiempo de práctica, el personal del IBF se encontraba realizando un estudio para una compañía desarrolladora de energía; la cual aplica sistemas de control de calidad y aceptación de

materiales en el campo de explotación minera a cielo abierto, dedicada a la extracción de carbón, esto durante las cuatro etapas anteriormente mencionadas. Se participó en un proyecto en el IBF en donde se empleó el ensayo de penetración estática de piezocono (CPTu); por lo tanto, se aplicaron las metodologías empleadas por el IBF para el uso de este ensayo.

En la realización de las pruebas, las muestras de arena se instalaron en la cámara de calibración (diámetro: 1,0 m, altura: 1,5 m). El recipiente de calibración se cierra y la muestra se coloca bajo una presión isotrópica específica. Luego se inserta una sonda CPTu en la muestra, esto a través de una abertura en la tapa de la CC y se mide la presión en punta máxima (q_c) hasta una distancia de sondaje de aproximadamente 1,2 m. Cuando se retira la arena de la cámara, se extraen muestras más pequeñas en cilindros especiales, donde se determina la densidad relativa de almacenamiento (I_D) y el contenido de humedad (w) de la muestra. La resistencia a licuefacción del suelo (CRR) se determinó aplicando las mismas presiones laterales de la CC y densidades de almacenamiento en ensayos triaxiales cíclicos no drenados.

Los resultados de los ensayos se utilizan entonces para establecer la correlación entre la resistencia a licuefacción de los ensayos triaxiales cíclicos y la presión en punta máxima del CPTu; lo que sirve a la desarrolladora de energía para obtener sus propias correlaciones de los materiales provenientes de la explotación minera y así poder determinar si existe susceptibilidad de que los apilamientos de arena sufran licuefacción. En fin, el propósito principal de este informe es desarrollar la correlación para una muestra de arena nombrada como "Kali4", esto de acuerdo a las metodologías utilizadas por el personal del IBF.

Resumen ejecutivo

Este informe de proyecto de graduación se basa en la práctica profesional que se ha realizado en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe, también conocido como KIT por sus siglas en alemán (Karlsruher Institut für Technologie). Específicamente, la práctica se desarrolló en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, también conocido como IBF por sus siglas en alemán (Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik).

Se propuso como proyecto de graduación la participación en la campaña programada de investigaciones geotécnicas en el IBF. La intención fue poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería en Construcción; durante el tiempo de práctica, el personal del IBF se encontraba realizando una investigación con depósitos de arenas sueltas provenientes de la explotación minera a cielo abierto, en este caso dedicada a la extracción de carbón; en donde se aplican sistemas de control de calidad y comprobación de las condiciones geotécnicas del terreno durante la ejecución de la obra y además, estudios de seguimiento.

La planificación para la reutilización de los sitios explotados con minería a cielo abierto desempeña un papel importante para las empresas que se dedican a desarrollar este tipo de labores. Para su reutilización, la fosa restante que queda después de la terminación de la explotación se llena con tierra (proveniente de la excavación, en este caso es mayor proporción de arenas) o agua debido al déficit de masa de la fosa. Así, por ejemplo, los sitios pueden utilizarse para uso agrícola o la aplicación de un lago residual. Por lo tanto, es necesario aprobar las condiciones geotécnicas del terreno ya que los depósitos de arenas sueltas y saturadas son susceptibles de sufrir licuefacción y se debe además reconsiderar adecuadamente la protección del medio ambiente.

Para estos propósitos, en la bibliografía se proporcionan diagramas de correlación que indican la resistencia a licuefacción dependiendo de la resistencia en punta de los sondeos de presión, especialmente el ensayo CPT (Figura 1).

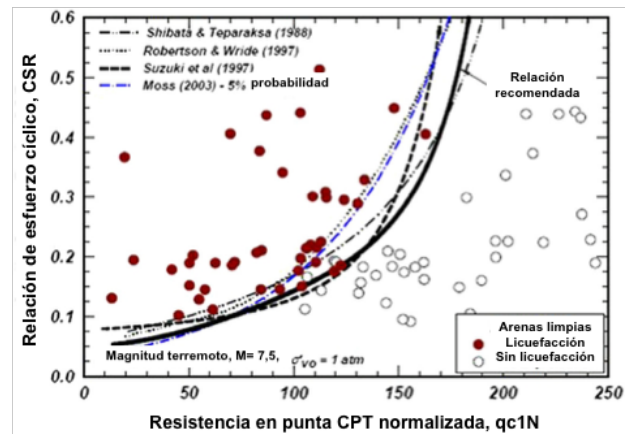


Figura 1. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función de resistencia en punta q_c . **Fuente:** (Dorby & Abdoun, 2015).

Sin embargo, los diagramas de correlación en la literatura generalmente solamente son válidos para suelos de origen natural o depósitos de arena sedimentados bajo el agua. No se puede suponer una aplicabilidad a los depósitos de arenas sueltas y húmedas en las fosas a cielo abierto debido a que su estructura se encuentra fuertemente desviada o en estado suelto; de modo que para los depósitos de arenas sueltas e inclinadas se tienen que desarrollar sus propias correlaciones. Este proyecto tiene como referencia pruebas CPTu de informes de labores de laboratorio IBF y anteriores tesis de licenciatura, por lo que ya se desarrollaron correlaciones entre la resistencia a licuefacción y la resistencia máxima del CPTu para varias arenas provenientes de depósitos sueltos de arena (Kali1, Kali2 y Kali3) como se muestra en la Figura 6.

Dentro del alcance de este proyecto de licenciatura, se desarrollaron las correlaciones para determinar el potencial a licuefacción de depósitos de arenas sueltas, empleando el ensayo CPTu; para ello fue necesario determinar el comportamiento de ensayos de penetración estática de piezocono (CPTu) en la cámara de calibración (CC) del IBF. Además, determinar la resistencia a licuefacción por medio de ensayos triaxiales cíclicos no drenados para muestras de arena, plantear una correlación entre la densidad relativa de almacenamiento (I_D) de la muestra, la resistencia en punta (q_c) del CPTu y la resistencia a licuefacción (CRR) de los ensayos triaxiales, comparar la correlación experimental obtenida con correlaciones existentes de la literatura y por último determinar si existe una posible aplicación de los resultados obtenidos con alguna de las metodologías vigentes para el ensayo CPTu en Costa Rica.

Las resistencias de punta CPTu se evaluaron en ensayos con la cámara de calibración (CC) del IBF y las resistencias a licuefacción en ensayos triaxiales cíclicos no drenados. Se llevaron a cabo un total de 14 ensayos con el material experimental "Kali4", el cual se considera como una arena limo-arcillosa, SM-SC (Figura 2). La preparación y ejecución de la prueba se puede dividir en los siguientes pasos:

- Mezclado de los materiales con hasta un contenido de humedad de aproximadamente 12% a 15%.
- Instalación del material en la cámara de calibración (variando la densidad de almacenamiento en la instalación).
- Ejecución de prueba (variación de la presión lateral).
- Eliminación y muestreo con determinación del contenido de humedad y la densidad de almacenamiento.

Un esquema del ensayo en la cámara de calibración se muestra en la Figura 3. Las muestras de arena miden aproximadamente 1,0 m de diámetro y aproximadamente 1,5 m de altura dentro de la CC. Después de la colocación de la muestra se coloca una tapa que contiene una abertura para

el paso de la sonda de presión. Las paredes laterales, el fondo de la CC y la tapa están revestidos con membranas de goma, a través de las cuales se pueden aplicar presiones a la muestra en las direcciones horizontal (σ_2 , σ_3) y vertical (σ_1). De esta manera, se puede probar un estado de tensión isotrópico ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) así como anisotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$).

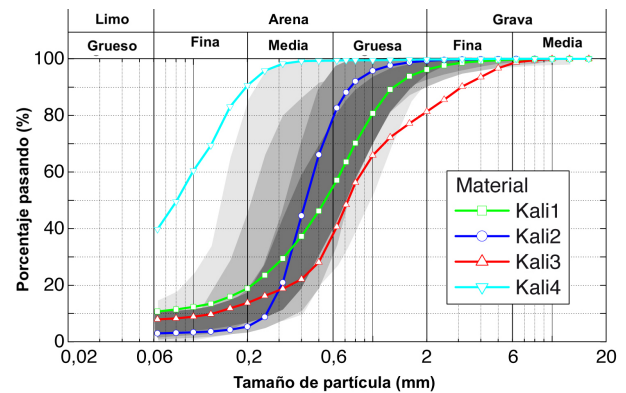


Figura 2. Curvas granulométricas de los materiales experimentales. **Fuente:** (Wichtmann & Kimmig, 2017).

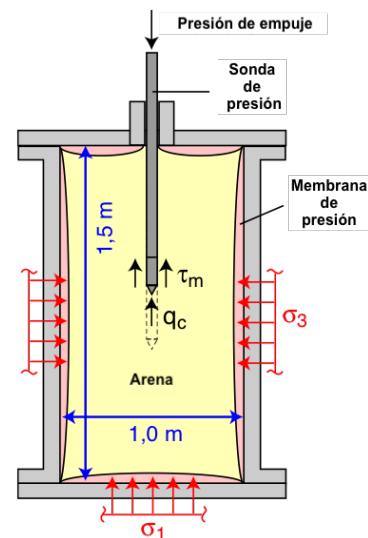


Figura 3. Esquema de la cámara de calibración del IBF. **Fuente:** (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

Después de la aplicación de la presión, la prueba se lleva a cabo. En este proceso, una sonda de presión estándar (Van den Berg, Heerenveen) se introduce a través de la abertura en la tapa y

posteriormente se introduce verticalmente en la muestra de suelo a una velocidad constante. La fuerza de inyección se genera por medio de un equipo hidráulico. Se mide la presión en punta q_c , la fricción del manguito T_m y la distancia vertical.

Además, fue necesario determinar la resistencia a licuefacción de las arenas a diferentes densidades. Para esto, se llevaron a cabo ensayos triaxiales cíclicos no drenados. La producción de los ensayos fue realizada por personal de laboratorio. En un experimento triaxial cíclico no drenado, se aplica un estrés vertical total σ_1 , una tensión lateral total σ_3 y una presión de agua intersticial u . El esfuerzo de tensión efectivo se convierte en $\sigma_1' = \sigma_1 - u$ y el esfuerzo lateral efectivo a $\sigma_3' = \sigma_3 - u$. Durante el ensayo, la tensión lateral σ_3 se mantiene constante y la tensión vertical σ_1 es cíclicamente variada con una amplitud σ_1^{ampl} alrededor del valor medio σ_1^{av} . Al comienzo del ensayo, la tensión inicial $\sigma_1 = \sigma_1^{av}$ corresponde generalmente a el esfuerzo lateral σ_3 (Figura 4); es decir la condición de carga inicial es isotrópica. La resistencia a licuefacción CRR (relación de resistencia cíclica) se

leyó como la relación de amplitud, que conduce a una licuefacción después de $N = 10$ ciclos.

El valor de CRR se leyó en cada curva proveniente del diagrama de CSR vs número de ciclos y se representó en las como una función de la densidad relativa. Con los diagramas $qc_1 - I_D$ y $CRR - I_D$ se construyó la correlación presentada en la Figura 5. Por último, se hizo un diagrama en donde se presenta la correlación experimental y se compara con lo establecido en la literatura Figura 6.

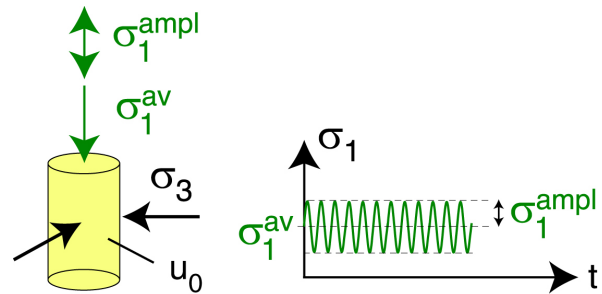


Figura 4. Estado de esfuerzos en el ensayo triaxial cíclico. **Fuente:** (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

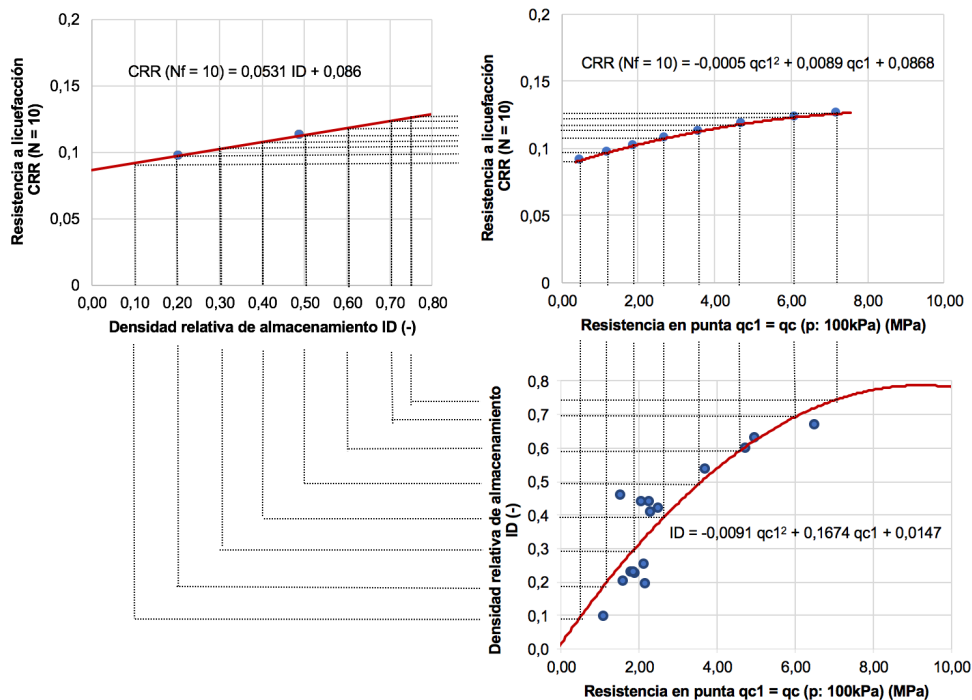


Figura 5. Correlación entre la resistencia a licuefacción CRR para falla después de $N_f = 10$ ciclos y la resistencia en punta máxima normalizada $qc_1 = qc$ ($p' = 100$ kPa) para el material experimental "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

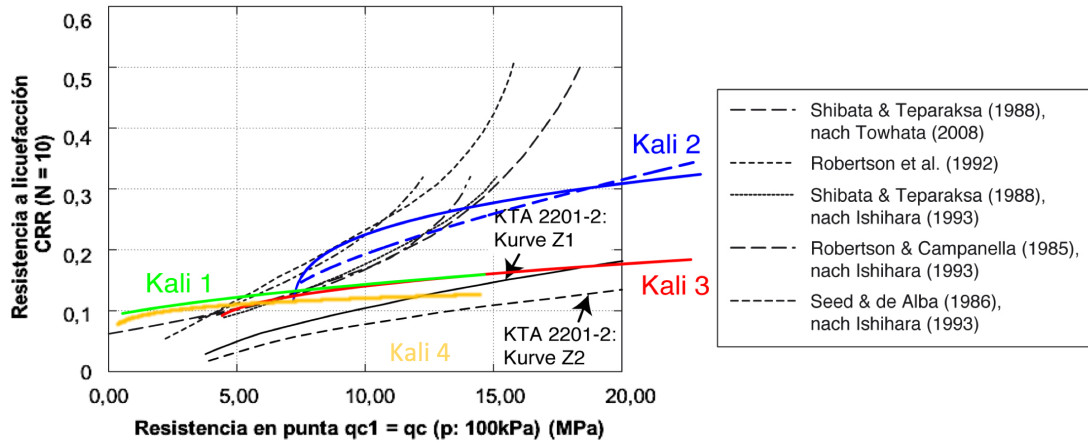


Figura 6. Comparación de la correlación CRR – qc_1 para el material experimental “Kali4” con trabajos previos del IBF y con correlaciones presentes en la literatura para depósitos de arenas de origen natural. **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

Finalmente, se logró comprobar que existe un aumento en la resistencia en punta qc con el aumento de la densidad relativa de almacenamiento I_D y el aumento de la presión en la CC. Ambas dependencias fueron descritas por medio de ecuaciones; además se testifica que los incrementos de $qc - I_D$ que se recomiendan en la norma DIN 4094-1 para arenas uniformes ($C_u < 3$) o mezclas de arena y grava, a partir una I_D de 0,3 exceden las resistencias de qc para el material experimental Kali4.

Ahora bien, de acuerdo con los ensayos triaxiales cíclicos no drenados, la resistencia a licuefacción está influenciada principalmente por la densidad de almacenamiento I_D ; por lo tanto, a medida que aumenta la densidad relativa de almacenamiento I_D , también aumenta la resistencia a licuefacción CRR (N = 10). Según el diagrama de correlación CRR - qc_1 (Figura 5), la resistencia a licuefacción aumenta al aumentar la resistencia en punta CPTu máxima.

Asimismo, con este informe de proyecto de graduación se determinó que la correlación realizada depende significativamente del material experimental, donde la resistencia máxima en punta del ensayo CPTu disminuye con el aumento del contenido de finos. Por lo tanto, el material experimental “Kali4” se le relaciona con las

menores resistencias en punta (Figura 6). Los resultados indican que también un alto nivel de grano fino da como resultado una baja resistencia a la licuefacción; determinando así que el material Kali4 tiene resistencias a la penetración de cono y a licuefacción menores que los otros materiales experimentales estudiados anteriormente, esto por sus propiedades granulométricas (Figura 2).

Según la comparación de las correlaciones para los cuatro materiales experimentales estudiados por el IBF con correlaciones del ensayo CPTu para suelos de origen natural, provenientes de la literatura, se determina que en la región de bajas densidades de almacenamiento y bajas resistencias de pico una buena similitud. Ahora bien, para mayores densidades de almacenamiento y, por lo tanto, mayores resistencias en punta, las curvas de correlación para los materiales experimentales son más planas que las referenciadas de la literatura. En otras palabras, la resistencia a la licuefacción de los materiales experimentales en esta área es menor de lo que habrían predicho las curvas de la literatura.

Es necesario y conveniente para el proyecto del IBF que se hagan más ensayos triaxiales cíclicos no drenados con mayor diversidad de densidades relativas, ya que para este informe de práctica profesional solamente se contó con 8

ensayos triaxiales para el material Kali4. Para futuros proyectos, también se podría dar uso de los resultados provenientes de la relación de fricción en el CPTu en la CC.

Para finalizar, quisiera dar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado durante mis años de estudio en el Tecnológico de Costa

Rica. Además, a mis supervisores, el Prof. Ing. Alonso Poveda, Dr. Ing. Torsten Wichmann, Nebil Demiral y el Ing. Ivo Kimming, por hacer posible el desarrollo de la práctica profesional en el KIT; agradezco su apoyo a mi práctica profesional, por compartir su conocimiento, paciencia y entusiasmo hacia mi trabajo. Su orientación me ayudó en el período de trabajo y redacción de este informe.

Introducción

1.1 Introducción

La proyección para la reutilización de los sitios explotados con minería a cielo abierto desempeña un papel importante para las empresas que se dedican a desarrollar este tipo de labores. Para su reutilización, el agujero restante que queda después de la terminación de la explotación a cielo abierto se llena con materiales residuales (proveniente de la excavación, en este caso es arena) o agua debido al déficit de masa de la fosa. Así, por ejemplo, los sitios pueden reutilizarse a futuro para uso agrícola o la aplicación de un lago residual.

Por lo tanto, es necesario aprobar las condiciones geotécnicas del terreno y además considerar adecuadamente la protección del medio ambiente. Para estos propósitos, en la bibliografía se proporcionan diagramas de correlación que indican la resistencia a licuefacción o licuefacción dependiendo de la presión máxima de los sondeos de presión, especialmente el CPT.

Sin embargo, los diagramas de correlación en la literatura generalmente son válidos para suelos naturales o depósitos de arena sedimentados bajo el agua. No se puede suponer una aplicabilidad a los depósitos de arenas sueltas y húmedas en las fosas a cielo abierto debido a que su estructura se encuentra fuertemente desviada o en estado suelto, de modo que para los depósitos de arenas sueltas e inclinadas se tienen que desarrollar sus propias correlaciones.

Este informe describe el proceso que se llevó a cabo para obtener la correlación entre la resistencia de licuefacción y la resistencia de punta de las pruebas de CPTu para una muestra de un depósito de arena nombrada "Kali4". Las resistencias de punta del CPTu se midieron en ensayos con la cámara de calibración (CC) del IBF

y las resistencias de flujo en ensayos triaxiales cíclicos no drenados.

Este proyecto está basado en los resultados obtenidos en laboratorio durante la elaboración de la práctica profesional y además tiene como referencia pruebas CPTu de informes de labores de laboratorio IBF y una tesis de licenciatura anterior, por lo que ya se desarrollaron correlaciones entre la resistencia a licuefacción y la resistencia máxima del CPTu para varias arenas de la minería a cielo abierto (Kali1, Kali2 y Kali3).

Dentro del alcance de este proyecto de licenciatura, se debe desarrollar correlaciones para la otra muestra de arena llamada Kali4. Los resultados de los ensayos se utilizan entonces para establecer la correlación entre la resistencia a licuefacción de los ensayos triaxiales cíclicos y la presión máxima de punta del CPTu. Como objetivo general se propuso desarrollar las correlaciones para determinar el potencial a licuefacción de depósitos de arenas sueltas, empleando el ensayo CPTu; con este propósito se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el comportamiento de ensayos de penetración estática de piezocono (CPTu) en la cámara de calibración (CC) del IBF.
- Determinar la resistencia a licuefacción por medio de ensayos triaxiales cíclicos no drenados para muestras de arena.
- Plantear una correlación entre la densidad relativa de almacenamiento (I_D) de la muestra, la resistencia de punta (q_c) del CPTu y la resistencia a licuefacción (CRR) de los ensayos triaxiales.
- Comparar la correlación experimental obtenida con correlaciones existentes de la literatura.

1.1.1 Antecedentes

1.1.1.1 Minería a cielo abierto en Alemania

En Alemania, hay tres grandes reservas para la extracción de carbón: el área de Lausitz, el distrito de Mitteldeutsche y el área de Rhenish. El RUHR (Figura 1.1) es la mayor reserva de Europa con un nivel estimado de carbón de 55 mil millones de toneladas (Scholz, 2017).

Para la extracción del carbón crudo, el nivel del agua subterránea se debe primero bajar. Para ello, es posible, entre otras cosas, utilizar pozos de succión que alcancen una profundidad de hasta 750 m. El siguiente paso es remover la sobrecarga de suelos sobre el carbón con la ayuda de excavadoras (Figura 1.2).

La capa exterior está constituida principalmente por suelos granulares como arenas y se transportan por medio de sistemas transportadores, donde se deposita el material. De esta manera se crean "terrazas"; el carbón se extrae de los suelos inferiores y luego se transporta por medio de sistemas transportadores a instalaciones de almacenamiento intermedias en bunkers de carbón o directamente a las centrales eléctricas circundantes.



Figura 1.1. Zonas de extracción de carbón en Alemania. **Fuente:** (SciELO, 2012).



Figura 1.2. Excavadora utilizada en los procesos de extracción de carbón. **Fuente:** (RWE AG, 2017).

1.1.1.2 Reutilización de fosas después del periodo de explotación

Se prevé una reutilización en forma de un lago residual para las zonas de explotación a cielo abierto de la región Rheinische Revier.

Como el carbón se debe explotar tanto como sea posible durante el período minero, las excavaciones son generalmente muy amplias e inclinadas (Figura 1.3); cuando se va a poner en funcionamiento el lago se prevé una inclinación baja; por lo tanto, para obtener un fondo plano el sitio debe estar parcialmente lleno de suelo. Para el rellenado de la fosa, se puede utilizar material de las capas intermedias extraídas anteriormente o material del desmantelamiento de otras minas a cielo abierto y por último el agua, la cual es obtenida de una fuente externa que se utiliza entonces para el llenado, esto con la intención de crear reservas artificiales de agua y zonas de recreación.

De este modo, los aspectos medioambientales y de protección de la naturaleza, como la calidad de las aguas subterráneas, deben verificarse para una condición permanente.

1.1.1.3 Regiones sísmicas en Alemania

Con el fin de tener en cuenta los posibles terremotos en Alemania, se desarrolló un mapa de zonificación de terremotos por el Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción (DIBt) en 1998. En el mapa, incluido en la norma DIN EN 1998 (EUROCODE 8) (Figura 1.4); las regiones de terremoto de Alemania se dividen en cuatro zonas (zonas o regiones de riesgo sísmico mundial). Los intervalos de intensidad se utilizaron como base para la división de las regiones; donde se hace una distinción entre las zonas 0, 1, 2 y 3, siendo la zona 3 la región sísmica con mayor peligro. Un terremoto puede generar una licuefacción del suelo. La minería a cielo abierto de la región Rheinische Revier se encuentra en zona de rango 3, lo que

plantea la posibilidad de licuefacción del terreno lo que genera un riesgo de inundación para los habitantes de pueblos aledaños al lago, así mismo para bañistas en la zona del lago.



Figura 1.3. Reutilización de fosas explotadas en minería. Fuente: (Endesa S.A., 2011)

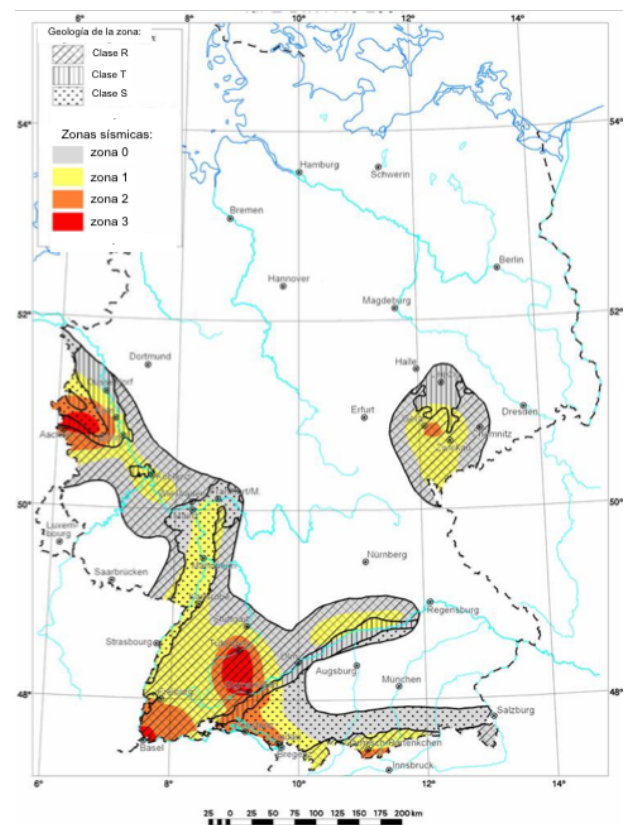


Figura 1.4. Mapa sísmico de Alemania. Fuente: (Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik E.V., 1998).

1.1.2 Planteamiento del problema

1.1.2.1 Problemática de licuefacción en depósitos de arena

Como se mencionó anteriormente, la zona de explotación de la empresa para la cual se realiza el estudio se encuentra en la zona 3 de la zonificación de terremotos y, por lo tanto, pertenece a los sitios de "tierra activa" de Alemania. Al eliminar la arena que se encuentra por encima de las capas de carbón y colocarse en otro sitio, se forman depósitos sueltos de arena. En cuanto a licuefacción, las ondas espaciales provocadas por terremotos tienen una participación primordial. Las ondas espaciales se clasifican en ondas de compresión (ondas primarias, ondas P) y ondas de corte (ondas secundarias, ondas S). Las ondas de corte son determinantes para dar cabida al fenómeno de licuefacción del suelo. Las cuales producen una tensión de cizallamiento cíclico en el suelo.

En el caso de una carga cíclica lenta en el estado drenado, el suelo se comprimiría. Pero debido a la rápida aplicación en caso de un terremoto, el agua no puede escapar rápidamente de los poros y al disolver la estructura del grano, las partículas de arena pierden sus fuerzas de contacto y comienzan a "nadar" en el agua; en fin, se forma una pesada suspensión de agua, arenas y carbón; donde el suelo pierde su capacidad soportante lo que puede provocar que edificios enteros se "hundán" en el suelo (Figura 1.5).

La resistencia a licuefacción del suelo puede estimarse a partir de ensayos triaxiales cíclicos no drenados, en la medida de lo posible en muestras no alteradas o bien realizando reconstrucción de muestras en laboratorio. Alternativamente, es posible utilizar diagramas que relacionan la resistencia a licuefacción en función de la resistencia en punta en ensayos de penetración (El número de impactos N_{SPT} o la resistencia máxima de la sonda de presión CPT) o la velocidad de la

onda de corte. Estos diagramas de correlación han sido construidos basándose en la recolección de datos en campo (factores de sondeo, velocidad de onda de corte) y las intensidades de los terremotos en el pasado.



Figura 1.5. Efectos de licuefacción de suelos por el terremoto de Limón en 1991. Fuente: (Castro, 1991).

La Figura 1.6 muestra la relación entre la resistencia a licuefacción CRR y la velocidad de la onda cortante V_{s1} en función de la fracción de grano fino del suelo.

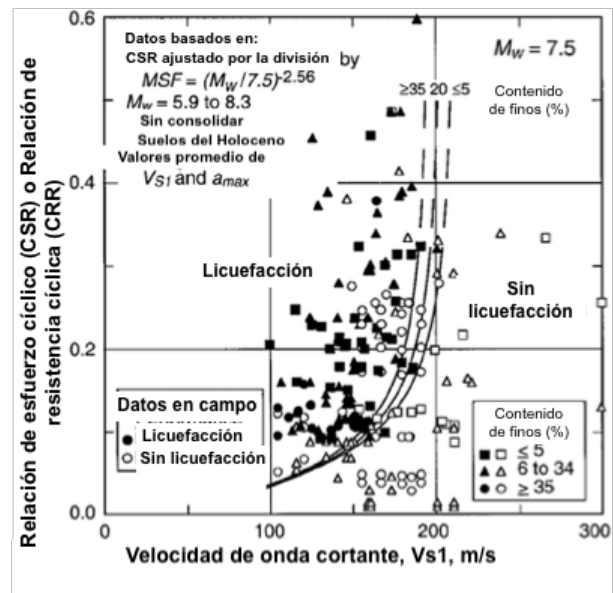


Figura 1.6. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR y la velocidad Vs1 de la onda cortante en función de la fracción de grano fino del suelo. **Fuente:** (Dorby & Abdoun, 2015).

La Figura 1.7 muestra una correlación entre la tasa de impacto de una prueba SPT ($(N_1)_{60}$) y la resistencia a licuefacción CRR. La Figura 1.8 muestra la relación entre la resistencia de punta del CPT y la resistencia a licuefacción.

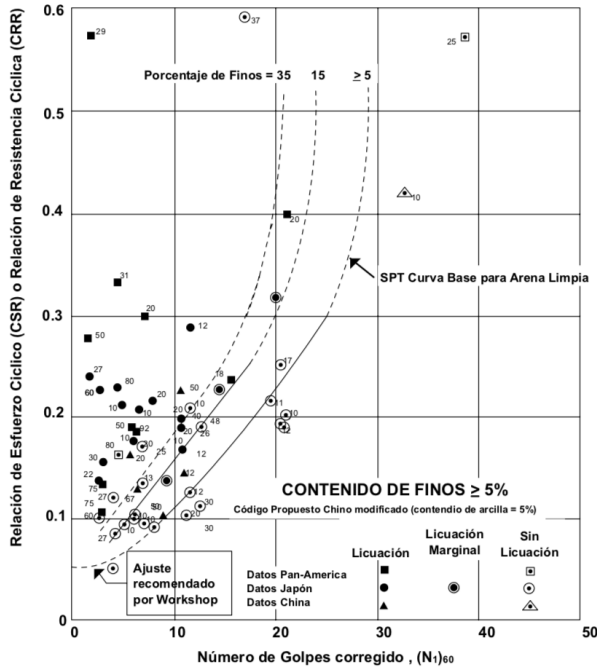


Figura 1.7. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función del número de impactos SPT ($(N_1)_{60}$). **Fuente:** (Dorby & Abdoun, 2015).

Los diagramas de correlación existentes (Figuras 1.6, 1.7 y 1.8) solamente son aplicables a suelos en estado natural; por lo tanto, no pueden ser simplemente transferidos a suelos sueltos provenientes de la explotación minera. Así entonces para deducir la susceptibilidad al flujo de los suelos en las fosas de minería a cielo abierto se deben desarrollar diagramas que correlacionen la resistencia al flujo para material extraído. Por ende, este proyecto se enfoca en las correlaciones derivadas de la resistencia de punta del ensayo CPTu. Para el desarrollo de la correlación, son necesarias pruebas CPTu en una cámara de calibración (CC), así como ensayos triaxiales cíclicos no drenados con variación de las densidades de almacenamiento.

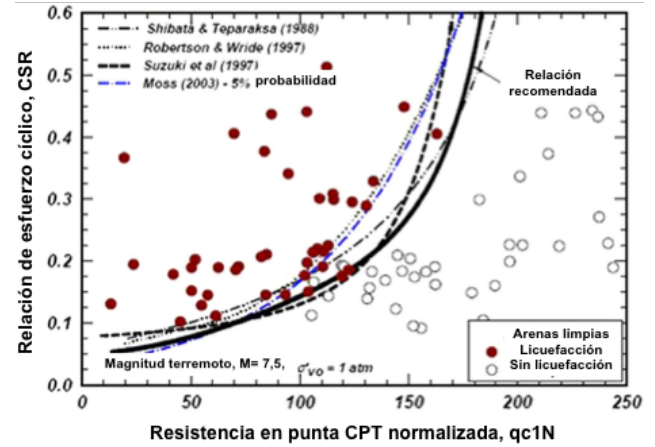


Figura 1.8. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función de resistencia en punta qc. **Fuente:** (Dorby & Abdoun, 2015).

Marco teórico

2.1 Marco teórico

2.1.1 Fenómeno de licuefacción de suelos

Según (Ishihara, 1996), el fenómeno se manifiesta cuando un depósito de arena saturada se ve sometido a las ondas de corte que se propagan durante un sismo; de manera que la estructura de la arena tiende a densificarse. En adición, como la duración de la aplicación de las tensiones de corte cíclico es, en general muy pequeño en comparación con el tiempo necesario para que ocurra algún drenaje, la tendencia de la arena a disminuir de volumen durante cada ciclo se refleja en un incremento progresivo de la presión de poros.

Esto produce una reducción continua de la tensión efectiva y consecuentemente una disminución en la resistencia al corte de la arena. Si la arena se encuentra en estado suelto, la presión de poros puede incrementarse rápidamente a un valor igual a la presión de confinamiento, y la capa de suelo puede experimentar grandes deformaciones.

Por lo tanto, en el curso de la carga cíclica la presión de poros aumenta hasta un valor igual a la tensión de confinamiento inicial, la tensión efectiva existente en el “esqueleto” de la arena se reduce a cero y en consecuencia la arena pierde completamente la resistencia al corte, al menos en principio (Guzmán , 1987).

En otras palabras, la arena sufre licuefacción, esto es, se comporta como un líquido viscoso, generándose grandes deformaciones que pueden dar origen a múltiples mecanismos de falla, algunas de ellas catastróficas como falla de taludes, el rompimiento de presas y la destrucción de puentes (Núñez, 2007).

En la Figura 2.1 se ilustra un elemento de suelo sometido a una serie de tensiones cíclicas y por lo tanto una representación esquemática del fenómeno de licuefacción; en la sección **a)** existe un estado inicial de tensiones; en **b)** representa las fuerzas de contacto entre las partículas de suelo y en la sección **c)** se muestra la disminución de las fuerzas de contacto entre partículas, al incrementarse la presión de poros.

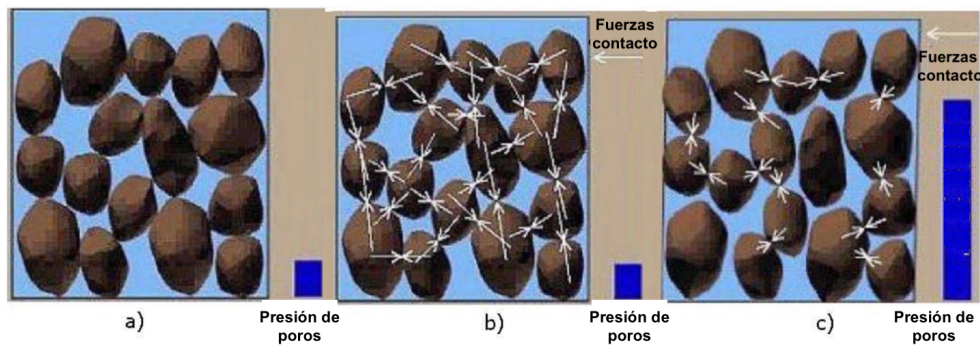


Figura 2.1. Esquema de elemento de suelo sometido a tensiones cíclicas. Fuente: (Núñez, 2007).

2.1.1.1 Parámetros que intervienen en la resistencia a licuefacción de arenas

Entre los principales factores que participan, condicionan y modifican las características de licuefacción de suelos se pueden mencionar los siguientes (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009):

- Características del sismo: la posibilidad de ocurrencia de licuefacción o susceptibilidad de un depósito de suelo depende de los esfuerzos cortantes inducidos por el sismo, los cuales son proporcionales a las aceleraciones. Para una misma magnitud sísmica, la susceptibilidad disminuye con la distancia epicentral y para una distancia epicentral fija, la susceptibilidad a la licuefacción aumenta con la magnitud, así como con el tiempo de duración de la fase más energética del movimiento (número de ciclos de carga).
- Densidad o compacidad relativa: la susceptibilidad a la licuefacción es menor cuanto mayor sea compacidad relativa.
- Granulometría: las arenas son más susceptibles a la licuefacción cuanto más finas y uniformes.
- Estratigrafía del depósito: la posibilidad de ocurrencia de la licuefacción es mayor cuanto menos estratificado es el suelo.
- Estructura interna del suelo: cuanto más estable por su granulometría, compacidad y forma de granos, menor la susceptibilidad a la licuefacción.
- Plasticidad: la susceptibilidad a la licuefacción es menor entre mayor sea el contenido de finos plásticos.
- Permeabilidad: la susceptibilidad a la licuefacción de un depósito es menor cuanto mayor sea su permeabilidad.
- Grado de saturación: la susceptibilidad a la licuefacción de un suelo granular aumenta con el grado de saturación.

2.1.2 Influencia de la densidad en la resistencia a licuefacción

Es importante mencionar que el comportamiento físico-mecánico del suelo está determinado generalmente por propiedades físicas y el tamaño de las partículas. Las propiedades físicas, como la densidad de grano ρ_s y la curva de distribución de tamaño de grano, se determinan en el laboratorio y no pueden modificarse por cargas u otras influencias externas. La condición del suelo, como cantidad de poros, la densidad de almacenamiento, el contenido de humedad, la consistencia y la permeabilidad, pueden modificarse mediante una carga u otras influencias externas. Con base en la densidad relativa I_D de un suelo no cohesivo, el estado de almacenamiento se puede designar de acuerdo con el Cuadro 2.1. La densidad de almacenamiento relativa de un suelo no cohesivo tiene una influencia significativa en la resistencia a licuefacción (Scholz, 2017). El suelo se puede idealizar como un medio trifásico que consiste en un sólido, un líquido y un gas (Figura 2.2).

Densidad D (-)	Densidad relativa I_D (-)	Designación del almacenamiento del suelo
0-0,15	0-0,15	muy suelto
0,15-0,30	0,15-0,33	suelto
0,30-0,50	0,33-0,67	densidad media
0,5-1,0	0,67-1,0	denso

Cuadro 2.1. Descripción de las densidades de almacenamiento de suelos. **Fuente:** (Triantafyllidis, 2013).

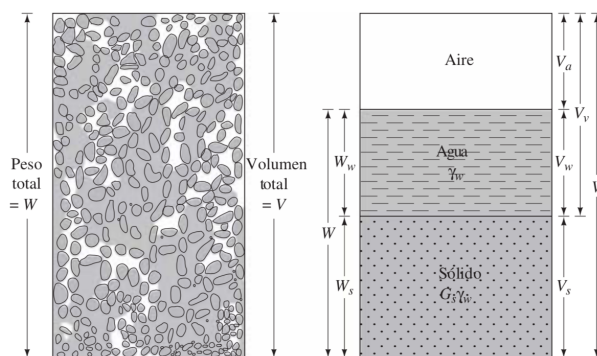


Figura 2.2. Esquema idealizado del suelo de mezcla trifásica para una unidad cúbica. **Fuente:** (Brajá Das, 2015).

Las cavidades entre las partículas sólidas se denominan espacios de poros y pueden describirse por medio de la porosidad n o la relación de vacíos e . Las siguientes ecuaciones se pueden extraer del cubo unitario (Figura 2.2):

$$n = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen total}} = \frac{e}{1+e} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$e = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen de sólidos}} = \frac{n}{1-n} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La densidad del grano, la densidad seca y la densidad de humedad del suelo se pueden calcular por la referencia de la masa respectiva al volumen respectivo de la siguiente manera:

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_{\text{grano}}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$\rho_f = \frac{m_f}{V} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

ρ_s : Densidad de grano

ρ_f : Densidad húmeda

ρ_d : Densidad seca

m_d : Masa seca

m_f : Masa húmeda

V_{Grano} : Volumen grano

V : Volumen húmedo

Con la ayuda de la densidad de grano y la densidad seca, se puede calcular la relación de vacíos e :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En principio, se hace una distinción entre la densidad de almacenamiento D y la densidad relativa I_D .

$$I_D = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$D = \frac{1+e_{\text{mín}}}{1+e} * I_D = \frac{n_{\text{máx}} - n}{n_{\text{máx}} - n_{\text{mín}}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

La densidad relativa (I_D) en suelos es un término utilizado para expresar el estado de almacenamiento, de acuerdo con un porcentaje de vacíos real (e) y los valores límite $e_{\text{máx}}$ y $e_{\text{mín}}$ los cuales son obtenidos en ensayos de laboratorio de acuerdo a la norma ASTM D2049. Una arena en su estado más más denso $I_D = 1$ ($e = e_{\text{mín}}$) y en su estado más suelto $I_D = 0$ ($e = e_{\text{máx}}$).

2.1.3 Investigación geotécnica in situ

Los ensayos geotécnicos in situ corresponden a una serie de técnicas especializadas, las cuales son independientes y variadas (Figura 2.3), pero con un propósito común: la caracterización mecánica de las capas que componen los subsuelos a través de diversos parámetros medidos en el sitio de estudio. Entre los principales ensayos geotécnicos in situ se encuentran: ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de penetración estática de cono y piezocono (CPT y CPTu), ensayo dilatométrico de Marchetti (DMT), ensayo presiométrico, ensayo de molinete (FVT) y ensayos de placa de carga. A continuación, se muestra una breve descripción detallada del CPT que es el ensayo de penetración utilizado en el desarrollo de este proyecto.

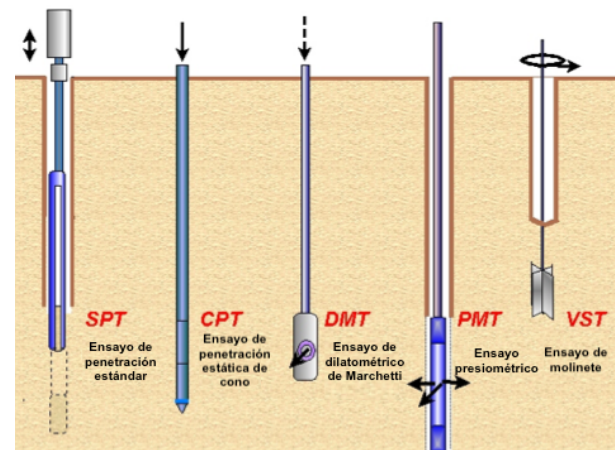


Figura 2.3. Ensayos de penetración in situ más comunes. Fuente: (Trillos, 2011).

2.1.4 Ensayo de penetración estática de piezocono CPTu

El ensayo de penetración de cono (CPT) y sus versiones mejoradas, como el piezocono (CPTu) y sísmico (SCPT), tienen aplicaciones extensas en una amplia gama de suelos. El CPT se limita principalmente a suelos más blandos, sin embargo, con modernos y grandes equipos de empuje y conos más robustos, el CPT se puede realizar en suelos rígidos a muy rígidos, y en algunos casos roca blanda (Robertson & Cabal, 2015).

Dentro de las ventajas del CPT se encuentran: obtención de perfiles de manera rápida y continua, datos repetibles y confiables (no dependen del operador), económico y productivo y una fuerte base teórica para la interpretación; pero también se encuentran algunas desventajas como que requiere de operadores capacitados y no se obtienen muestras de suelo durante un CPT.

El ensayo CPT consiste en hincar a presión constante una barra con punta cónica (Figura 2.4) de área A_c al suelo, donde se mide la fuerza necesaria (Q_c) para la penetración del cono en el suelo (Robertson & Cabal, 2015). La fuerza total que actúa sobre el cono, Q_c , dividida por el área proyectada del cono, A_c , produce la resistencia del cono, q_c (Ecuación 2.10). La fuerza total que actúa sobre el manguito de fricción, F_s , dividido por el área superficial del manguito de fricción, A_s , produce la resistencia a fricción del manguito, f_s (Ecuación 2.12).

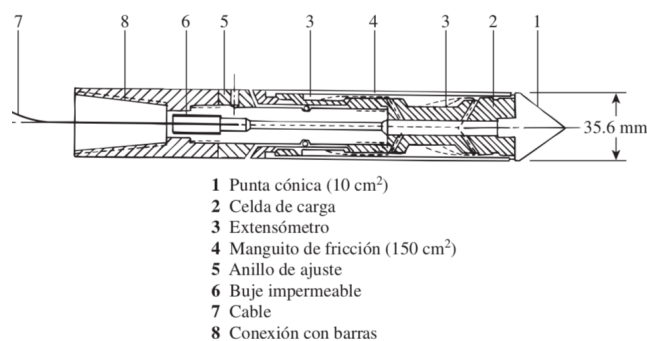


Figura 2.4. Terminología de un penetrómetro de piezocono.
Fuente: (ASTM D5778-12, 2012).

El CPTu es un ensayo de penetración estática que lleva incorporado un sensor de presión de poro que permite conocer las presiones de poros en el suelo (u) y así poder corregir los parámetros anteriormente mencionados como se muestra en la Ecuación 2.11 (Robertson & Cabal, 2015).

$$a = \frac{A_n}{A_c} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

a : Factor de área de la punta

A_c : Área proyectada del cono: 1000 mm²

A_n : Área neta del cono

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$q_t = q_c + u(1 - a) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

q_c : Resistencia por punta (sin corregir)

Q_c : Fuerza que actúa sobre el cono

A_c : Área proyectada del cono: 1000 mm²

q_t : Resistencia por punta (corregida)

u : Presión de poros

a : Factor de área de la punta

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

f_s : Resistencia a fricción (sin corregir)

F_s : Fuerza total de fricción sobre el manguito

A_s : Área superficial del manguito de fricción

Entre los parámetros correlacionables con los datos obtenidos en estos ensayos se encuentran: densidad relativa, ángulo de rozamiento interno, módulo de deformabilidad, resistencia a la licuefacción, grado de preconsolidación, resistencia al corte no drenado, sensibilidad, coeficiente de consolidación horizontal o radial, finalmente, densidad, permeabilidad y además correlación con el parámetro N_{SPT} , para todo tipo de suelos.

2.1.4.1 CPTu en la cámara de calibración

Las cámaras de calibración son equipos relativamente grandes (Figura 2.5), y los ensayos en ellas son bastante costosos en tiempo y recursos. Por otra parte, las pruebas se realizan en muestras de arenas reconstituidas cuyas propiedades varían (densidad y humedad) respecto de los depósitos naturales de donde provienen (Butlanska, 2014).

Para este proyecto de graduación se llevaron a cabo un total de 14 ensayos con el material "Kali4". Como ya se había trabajado en numerosas ocasiones, el método de instalación en la CC fue el mismo para anteriores tesis de licenciatura e informes de labores del IBF, por lo tanto, el método de instalación está basado en la experiencia adquirida que se mencionará más adelante en el apartado de metodología. La preparación y ejecución de la prueba se puede resumir y dividir en los siguientes pasos, que se describe en detalle en la sección de metodología:

- Mezclado de los materiales con hasta un contenido de humedad de aproximadamente 12% a 15%.
- Instalación del material en la cámara de calibración (variando la densidad relativa de almacenamiento en la instalación desde 0,2 – 0,8).
- Ejecución de prueba (variación de la presión lateral).
- Eliminación y muestreo con determinación del contenido de humedad y la densidad de almacenamiento.

Un esquema del ensayo en la cámara de calibración se muestra en la Figura 2.5. Las muestras de arena miden aproximadamente 1,0 m de diámetro y aproximadamente 1,5 m de altura dentro de la CC.

Después de la colocación de la muestra se coloca una tapa que contiene una abertura para el paso de la sonda de presión. Las paredes laterales, el fondo de la CC y la tapa están revestidos con membranas de goma, a través de las cuales se pueden aplicar presiones a la muestra en las

direcciones horizontal ($\sigma_2 = \sigma_3$) y vertical (σ_1). De esta manera, se puede probar un estado de tensión isotrópico ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) así como anisotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2, \sigma_3$). Después de la aplicación de la presión, la prueba se lleva a cabo.

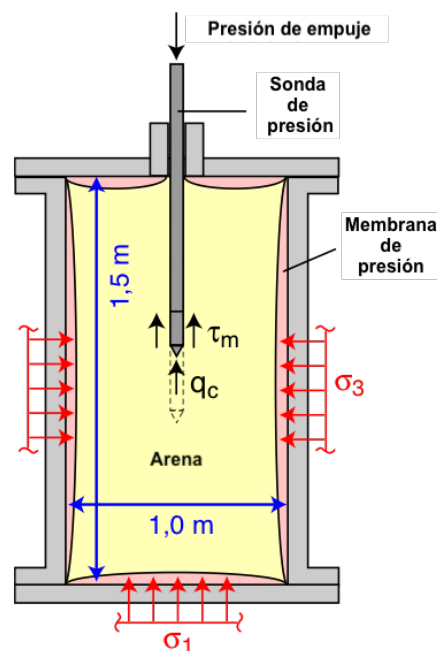


Figura 2.5. Esquema de la cámara de calibración del IBF. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

En este proceso, una sonda de presión estándar (Van den Berg, Heerenveen, Anexo 4) se introduce a través de la abertura en la tapa y posteriormente se introduce verticalmente en la muestra de suelo a una velocidad constante. La fuerza de inyección se genera por medio de un equipo hidráulico. Se mide la presión pico q_c , la fricción del manguito τ_m y la distancia vertical.

2.1.4.2 Efecto de las dimensiones de la cámara de calibración en la resistencia en punta q_c

Aunque los experimentos en cámaras de calibración se han utilizado ampliamente para establecer correlaciones entre la resistencia de la punta del cono q_c y las propiedades del suelo, existen algunos problemas o limitaciones que hacen que el q_c difiera de datos obtenidos in situ.

Esta diferencia es causada principalmente por el tamaño limitado de la cámara, condiciones de límite impuestas en la cámara, peculiaridad de la correlación (la correlación obtenida para una arena no puede aplicarse generalmente a otro suelo). (Butlanska, 2014).

El uso de los resultados de la cámara de calibración para predecir el rendimiento en el campo necesita tener en cuenta el efecto de las dimensiones limitadas de la cámara. El efecto de tamaño generalmente se explora usando el parámetro R_d , una relación de diámetro de cámara calibración CC – cono CPTu (Ecuación 2.13).

$$R_d = \frac{D_{CC}}{D_c} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

R_d : Parámetro efecto de escala en la CC
 D_{CC} : Diámetro de la cámara de calibración
 D_c : Diámetro del cono CPTu

(Parkin, 1988) sugirió que el valor del parámetro R_d para eliminar los efectos del tamaño de la cámara tendría que ser mayor que 70,0.

(Jamiolkowski, Ghionna, Lancellotta, & Pasqualini, 1988) después de examinar grupos de datos de ensayos CPT en cámaras de calibración para diferentes rangos del parámetro R_d propusieron la Ecuación 2.14; la cual corrige los efectos de la escala CC - CPTu en los resultados de la resistencia en punta.

$$q_c \text{ corregido} = q_c \text{ medido CC} \left(1 + \frac{0,2(D_r - 30)}{60} \right) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

$q_c \text{ corregido}$: Resistencia en punta corregida esperada en el campo, para la misma arena con la misma densidad y estado de tensión que en el CC.

$q_c \text{ medido en CC}$: Resistencia en punta corregida obtenida en la CC

R_d : Parámetro efecto de escala en la CC
 D_r : Densidad relativa (%)

La Ecuación 2.14 es válida para un penetrómetro de cono estándar ($d_c = 36 \text{ mm}$) y una cámara con un radio de 1,2 m y condiciones de contorno B_{c1} (Isotrópico). Además, la fórmula implica que los valores sueltos ($D_r \leq 30\%$) no son afectados por el tamaño de la CC.

(HUI & HUANG, 1999) no propusieron un factor de corrección para eliminar el efecto de escala entre la CC y el cono CPT. Los autores desarrollaron un sistema de cámara de calibración en el que CPT podría realizarse en condiciones simuladas de campo. La principal diferencia entre el CC estándar y el nuevo simulador era un diseño que consistía en una pila de anillos forrados con una membrana de goma de silicona inflable en el interior.

Esta innovación facilitó las mediciones de desplazamiento límite y el control del estado de esfuerzos. Los autores compararon sus resultados (sin corrección) con las correlaciones empíricas (R_d) propuestas por otros autores. Los resultados mostraron una tendencia similar a la de (Jamiolkowski, Ghionna, Lancellotta, & Pasqualini, 1988) a una densidad relativa de 65% y 84%.

2.1.4.3 Relación entre los resultados provenientes de CPTu y la densidad

Los resultados de las pruebas CPTu pueden utilizarse para determinar el estado de almacenamiento o la densidad del material. En la norma DIN 4094-1 (subsuelo – investigaciones de campo - parte 1: Cone penetration test, junio 2002) se describen correlaciones entre la resistencia máxima y la densidad del almacenamiento, así como entre la resistencia máxima y el ángulo de fricción. En el caso de una prueba según DIN 4094-1 de una arena de grano fino a medio, se puede estimar la densidad de almacenamiento de acuerdo con el Cuadro 2.2.

Las Figuras 2.6 y 2.7 muestran otros diagramas de correlación con los cuales se puede determinar aproximadamente la densidad de almacenamiento de arenas con $C_u \leq 3$ y mezclas de arenas con grava. Además, el ángulo de fricción puede estimarse utilizando la Figura 2.8.

Resistencia en punta q_c (MPa)	Densidad D	Designación del almacenamiento del suelo
<2,5	<0,15	muy suelto
>2,5-7,5	0,15-0,30	suelto
7,5-15,0	0,30-0,50	densidad media
15,0-25,0	0,50-0,65	denso
>25,0	>0,65	Muy denso

Cuadro 2.2. Relación entre la resistencia en punta del CPTu y la densidad en arenas uniformes, húmedas y de grano fino-medio. **Fuente:** (Triantafyllidis, 2013).

Sin embargo, las correlaciones descritas en DIN 4094-1 están limitadas a arenas de origen natural. Por lo tanto, en el caso de arenas sueltas o poco densas provenientes de actividades humanas no se puede suponer la aplicabilidad de estos diagramas; ya que dichos diagramas han sido realizados para materiales de origen natural en investigaciones geotécnicas in situ, los cuales han pasado por un proceso de formación geológico de años. Así en este caso, para los depósitos de arenas sueltas de minas a cielo abierto las correlaciones deben desarrollarse basándose en ensayos en cámaras de calibración ya que su estructura ha sido desviada de su origen natural (Kimmig, 2017).

Figura 2.6. Densidad de almacenamiento en función de la resistencia máxima q_c para arenas con $C_u \leq 3$ sin agua subterránea. **Fuente:** (DIN 4094-1, 2002).

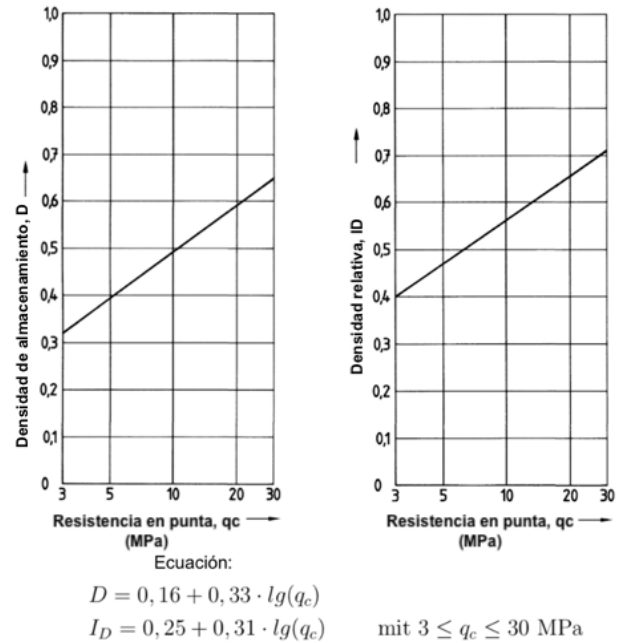


Figura 2.7. Densidad de almacenamiento en función de la resistencia máxima q_c para mezclas de arena y grava sin agua subterránea. **Fuente:** (DIN 4094-1, 2002).

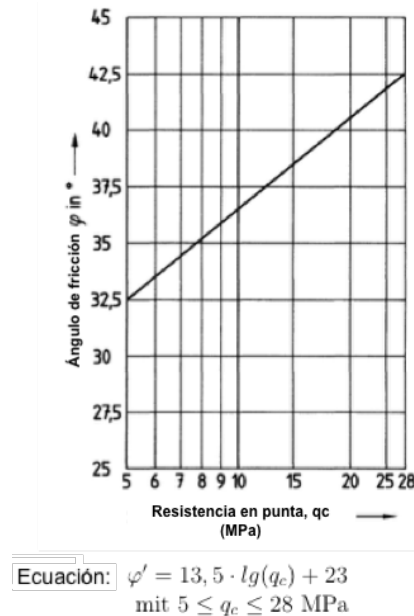
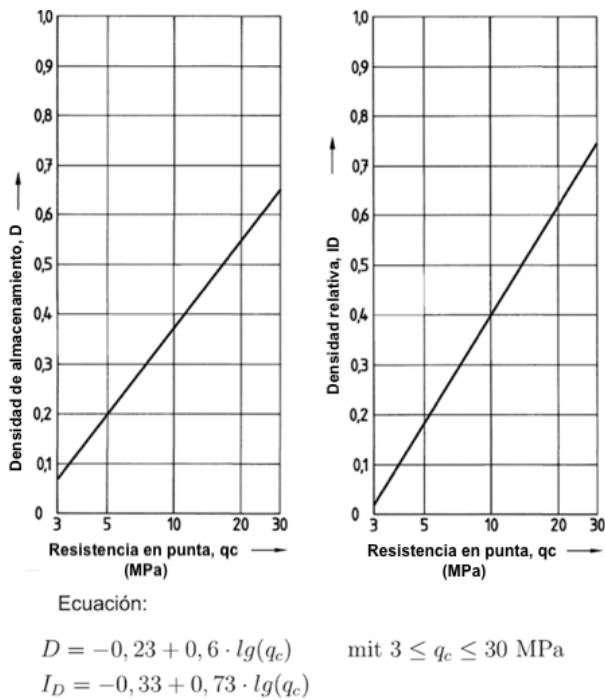


Figura 2.8. Correlación entre la resistencia máxima y el ángulo de fricción para arenas con $C_u \leq 3$. **Fuente:** (DIN 4094-1, 2002).

2.1.5 Ensayo triaxial cíclico no drenado

Con el fin de poder establecer correlaciones entre la resistencia en punta del CPTu y la resistencia a licuefacción, fue necesario aplicar carga cíclica no drenada en la arena experimental Kali4 con variación de la densidad de almacenamiento. Los ensayos han sido realizados por el personal del IBF.

Según (Salas, 2011) en un ensayo triaxial, un espécimen cilíndrico de suelo es revestido con una membrana de látex o caucho dentro de una cámara a presión. La parte superior e inferior de espécimen tiene discos porosos, los cuales se conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen. En el ensayo triaxial se puede variar la presión lateral actuante sobre la muestra de suelo en tres direcciones ortogonales, efectuándose así las mediciones sobre sus características mecánicas. El agua de la cámara puede adquirir cualquier presión deseada por la acción de un compresor. La carga axial se transmite al espécimen por medio de una barra que atraviesa la parte superior de la cámara. La presión que se ejerce con el agua que llena la cámara es hidrostática y produce, por lo tanto, esfuerzos principales sobre el espécimen, iguales en todas las direcciones. Es usual llamar a los esfuerzos principales mayor, intermedio y mínimo como σ_1 , σ_2 y σ_3 respectivamente. En una prueba triaxial de compresión, la presión axial siempre es el esfuerzo principal mayor, σ_1 ; los esfuerzos intermedios y menor son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$) y son iguales a la presión lateral.

En un ensayo triaxial cíclico no drenado, se aplica un esfuerzo vertical total σ_1 , una tensión lateral total σ_3 y una presión de agua intersticial u (Figura 2.9). El esfuerzo de tensión efectivo se convierte en $\sigma_1' = \sigma - u$ y el esfuerzo lateral efectivo a $\sigma_3' = \sigma_3 - u$. Durante el ensayo, la tensión lateral σ_3 se mantiene constante y la tensión vertical σ_1 con una amplitud σ_1^{ampl} alrededor del valor medio σ_1^{av} es cíclicamente variada. Al comienzo del ensayo, la tensión inicial $\sigma_1 = \sigma_1^{av}$ corresponde generalmente a el esfuerzo lateral σ_3 (Figura 2.9), es decir la condición de carga inicial es isotrópica.

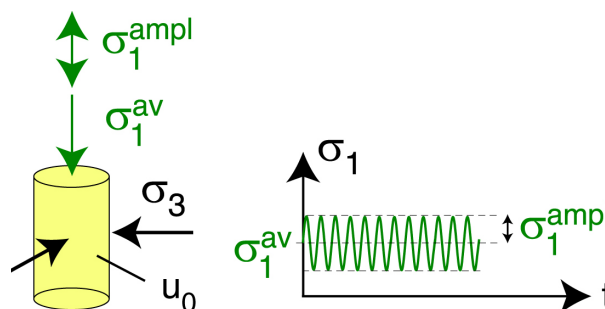


Figura 2.9. Estado de esfuerzos en el ensayo triaxial cíclico. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

2.1.5.1 Criterio de estado

(Krammer, 1996) definió el criterio de estado, que hace referencia al estado inicial del suelo, es decir a las características de esfuerzo y densidad al momento de recibir la carga aplicada, estas influyen altamente de la generación de exceso de presión de poros en el suelo.

De acuerdo con (Rincón, 2014) al graficar la trayectoria de esfuerzos $q - p'$, para un material suelto con baja presión de confinamiento, se desarrollan una serie de estados: estado crítico (SC), estado de transformación de fase (PTS), estado cuasi-estable (QSS) y el estado inestable no drenado (UIS).

En el plano $e - p'$, localizando los estados obtenidos para el material con diferentes valores de densidad relativa, es posible evaluar la línea del estado crítico (CSL) y la línea de transformación de fase (PTL), las cuales dependen del confinamiento de la muestra en la etapa de falla (Rincón, 2014).

- **Relación de vacíos crítica:** es la relación de vacíos en la cual dos muestras de suelo, en estado denso y suelto, sometidas a grandes deformaciones se acercan a la misma densidad y la resistencia al corte continúa siendo constante. Como se muestra en la Figura 2.10, las muestras de arena suelta, que tienden a densificarse durante el corte y las muestras de arena densa, que primero se contraen y luego se empiezan a dilatar, alcanzan un mismo estado de esfuerzos cuando llegan a la relación de vacíos crítica (Krammer, 1996).

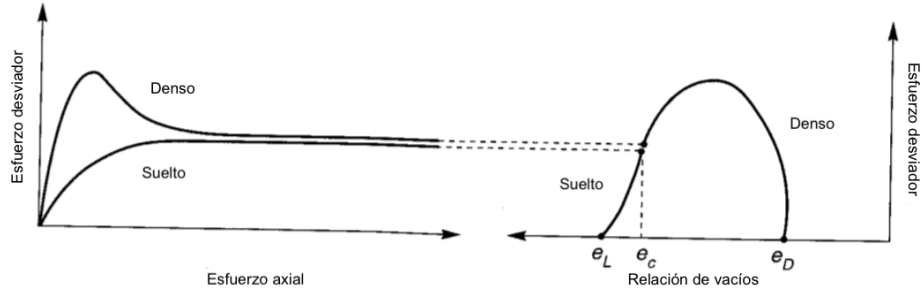


Figura 2.10. Relación de vacíos crítica. Fuente: (Krammer, 1996)

- **Parámetro de estado:** es la diferencia entre la relación de vacíos de un suelo ensayado y la relación de vacíos de la línea de estado estable a una misma presión de confinamiento Figura 2.11. El parámetro de estado es utilizado para identificar si un suelo es susceptible a licuefacción por flujo. Cuando el parámetro de estado es positivo, el suelo presenta un comportamiento contractivo y puede ser susceptible a licuación, cuando es negativo, su comportamiento es dilatante y no es susceptible a licuación (Krammer, 1996).

- **Estado crítico:** según (Idriss & Boulanger, 2008) es la condición que presenta una muestra de arena cuando al cortarse de manera continua, fluye sin presentar cambios de volumen o esfuerzo. El estado crítico es alcanzado sólo a altas deformaciones y gobierna la respuesta del suelo licuado. Su comportamiento se describe por la línea de estado crítico (CSL), también denominada línea de falla, la cual es determinada mediante ensayos drenados y representa todas las posibles combinaciones de relación de vacíos y presión de confinamiento para un suelo en el estado crítico; es usada para identificar las condiciones en las cuales un suelo puede o no ser susceptible a licuefacción por flujo. Además, (Sandoval & Pando, 2012) afirman que el comportamiento de una arena bajo cargas externas puede ser contráctil o dilatante, según sea su estado inicial con respecto a la línea de estado crítico (CSL). El estado inicial de una muestra de suelo suele definirse, para fines de licuación, en términos de su relación de vacíos (e) y su estado de esfuerzos (σ'_3 o p'). Para el análisis de licuefacción, las muestras que se encuentran más

alejadas hacia la derecha o hacia arriba de la CSL, mayor será su potencial contractivo y su susceptibilidad a licuefacción. Por otra parte, muestras con estado inicial por debajo o a la izquierda de la CSL se refieren a arenas en estado dilatante y menor será su potencial de licuefacción.

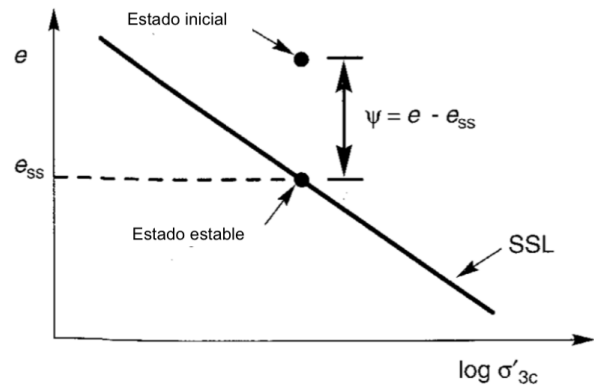


Figura 2.11. Parámetro de estado. Fuente: (Krammer, 1996)

2.1.5.2 Relación de Esfuerzos Cíclicos (CSR) y Relación de Resistencia Cíclica (CRR)

Para evaluar la resistencia a licuefacción del suelo es necesario considerar dos variables:

- La demanda sísmica que se espera en las capas de suelo durante un sismo de diseño, expresada en términos de resistencia CSR (cyclic stress ratio).
- La resistencia de suelo para oponerse a la licuefacción, expresado con CRR (cyclic resistance ratio).

El factor de seguridad frente a licuefacción puede definirse como el cociente CRR/CSR (Figura 2.12).

$$FS_{lic} = \frac{CRR}{CSR} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

CRR : Relación de resistencia cíclica, representa la capacidad de resistencia del suelo

CSR: Relación de esfuerzo cíclico, representa la fuerza que actúa en el suelo

Cuando el factor de seguridad contra licuefacción es menor que la unidad se presenta el fenómeno de licuefacción a la profundidad analizada (Figura 2.13). Sin embargo, existe la incertidumbre acerca del valor de FS_{lic} que debe considerarse en la práctica, ya que existen casos en los que el suelo se ha licuado a pesar de tener un $FS_{lic} > 1$ (Youd, y otros, 2001). Para la evaluación del CSR, (Seed & Idriss, 1971) formularon la siguiente expresión:

$$CSR = 0,65 \frac{a_{m\acute{a}x} \sigma_v}{g \sigma_v'} r_d \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Donde:

CSR: Relación de esfuerzo cíclico, representa la fuerza que actúa en el suelo

$a_{m\acute{a}x}$: Aceleración máxima medida en la superficie del terreno

g : Aceleración de la gravedad

σ_v : Esfuerzo vertical total

σ_v' : Esfuerzo vertical efectivo

r_d : Factor de reducción

El factor de reducción (r_d) se puede determinar a partir de la Figura 2.13. También, para efectos prácticos se pueden utilizar las siguientes ecuaciones para estimar el valor promedio de r_d (Liao & Whitman, 1986).

$$r_d = 1,0 - 0,00765 z \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Para: $z \leq 9,15$ m

$$r_d = 1,174 - 0,0267 z \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Para: $9,15 \text{ m} \leq z \leq 23 \text{ m}$

Donde:

r_d : Factor de reducción

z : Profundidad

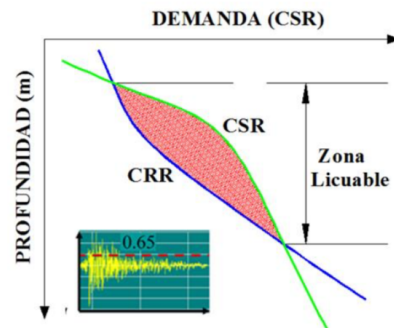


Figura 2.12. Esquema de relación de esfuerzo cíclico. Fuente: (Moreno, 2015).

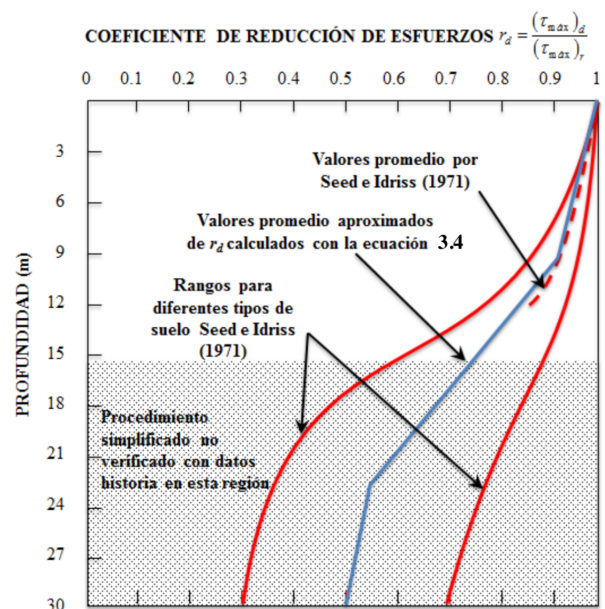


Figura 2.13. Valores del factor de reducción según la profundidad. Fuente: (Youd, y otros, 2001).

Para la aplicación de este método se requieren determinar la magnitud del sismo (M_w) y la máxima aceleración horizontal ($a_{m\acute{a}x}$) del suelo. Estos factores caracterizan la duración e intensidad del sismo.

2.1.6 Propiedades del material experimental

Las pruebas en la cámara de calibración se han enumerado consecutivamente (Kali1, Kali2, Kali3 y Kali4). El material de prueba utilizado para este proyecto de graduación ha sido una arena tomada en junio de 2017 en un campo de apilamiento de la explotación de carbón a cielo abierto; la cual se almacenó en varias bolsas grandes. Esta arena fue identificada como "Kali4".

Con el propósito de evitar algún efecto de los materiales arcilloso o las partículas de grava (con un diámetro mayor de 10,0 mm) en los valores de resistencia en punta q_c ; se decidió eliminarlos antes del uso del material experimental Kali4 en la celda de calibración, además las arenas limpias presentan mayor susceptibilidad a ser licuadas y por lo tanto se podrían tener efectos sobre el estudio de licuefacción del material Kali4. Para todas las muestras de la campaña de recolección de especímenes (Kali's), se puede observar una clara dispersión de las curvas de distribución del tamaño de grano en la Figura 2.14. Esto se puede explicar por el hecho de que el muestreo del material se ha realizado en diferentes sitios, fechas y profundidades.

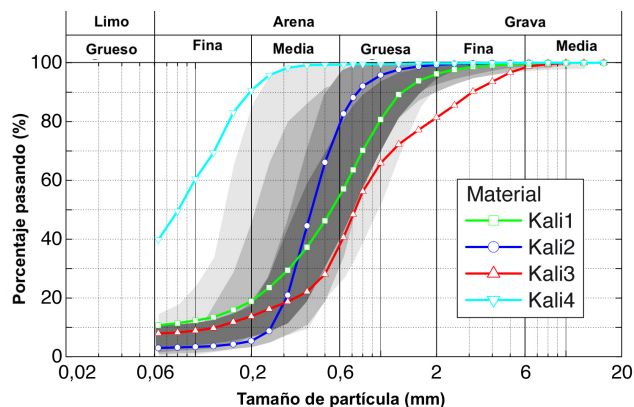


Figura 2.14. Curvas granulométricas de los materiales experimentales. **Fuente:** (Wichtmann & Kimmig, 2017).

Luego de la recolección de muestras en campo, se tomó una muestra de cada "Big Bag" después de una homogeneización para un análisis de granulométrico por tamizado. Las curvas resultantes de distribución de tamaño de grano de los cuatro materiales de prueba se muestran en la Figura 2.14.

Las arenas "Kali1", "Kali2", "Kali3" y "Kali4" difieren significativamente en la distribución del tamaño de grano. "Kali2" es un material grueso, "Kali1" es un medio de grano grueso, arena fina y arena gruesa, "Kali3" es una arena gruesa fina y de grano fino de tamaño medio y "Kali4" es una arena más fina que todas las arenas anteriores, la cual contiene aproximadamente un 40% de finos (arcillas, limos y hasta posiblemente material orgánico). Según las especificaciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), "Kali4" se considera una arena limo-arcillosa, SM-SC o SU-ST según la norma DIN 18196.

Los parámetros más importantes de los materiales experimentales se resumen en el Cuadro 2.3.

	Arena			
	Kali1	Kali2	Kali3	Kali4
Diámetro medio del grano d_{50} (mm)	0,54	0,42	0,73	0,116
Proporción de grano fino FC (%)	10,7	3,0	7,9	39,7
Coefficiente de uniformidad $C_u = d_{60} / d_{10}$	3,77	1,83	6,79	-
Coefficiente de curvatura $C_c = d_{30}^2 / (d_{60} \cdot d_{10})$	2,39	1,04	2,18	-
Densidad de grano ρ_s (g/cm^3)	2,65	2,64	2,64	2,64
Densidad seca mínima $\rho_{d \min}$ (g/cm^3)	1,472	1,431	1,607	1,431
Densidad seca máxima $\rho_{d \max}$ (g/cm^3)	1,877	1,699	1,922	1,699

Cuadro 2.3. Propiedades físicas - mecánicas de los materiales de experimentales. **Fuente:** (Kimmig, 2017).

2.1.7 Labores previas con la CC del IBF

2.1.7.1 Proyecto de investigación (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017), informe 2:

Este informe de investigación (informe de trabajo 2) es de parte del IBF para la empresa desarrolladora de energía, donde se estableció una correlación entre la resistencia máxima del CPTu y la resistencia a licuefacción en el caso de una carga cíclica, esto para una arena procedente de la extracción minera a cielo abierto nombrada como "Kali1". Para este propósito, el material se ensayó utilizando el CPTu en la cámara de calibración del IBF; en este trabajo se variaron las densidades de ensamblaje y la presión isotrópica. Como se esperaba, los resultados de la prueba muestran un aumento de la resistencia en punta (q_c) con el aumento de la densidad relativa y el aumento de la presión de la CC.

Adicionalmente, el mismo material se ensayó en experimentos triaxiales cíclicos no drenados; la resistencia CRR y la relación de amplitud $CSR = q^{amp} / (2p_0')$, se estudiaron en función de la densidad y el estado de esfuerzo, por lo cual se variaron las presiones iniciales y las densidades en el ensayo triaxial. Por medio de las relaciones $q_{c1}(I_D)$ y $CRR(I_D)$ obtenidas a partir de los dos tipos de ensayos, se creó una correlación entre la resistencia a licuefacción CRR y la resistencia de punta q_{c1} (Anexo 1). Según esta investigación, en el diagrama de correlación CRR - q_{c1} (Figura 2.15) se observa que la curva del material "Kali1" tiene un comportamiento más plano que las correlaciones de arenas de la literatura; en el rango de resistencias de CPT ($5 \text{ MPa} \leq q_{c1} \leq 7 \text{ MPa}$), se obtienen resistencias a licuefacción similares entre las correlaciones nuevas y las existentes. En el caso de presiones q_{c1} más pequeñas, la nueva

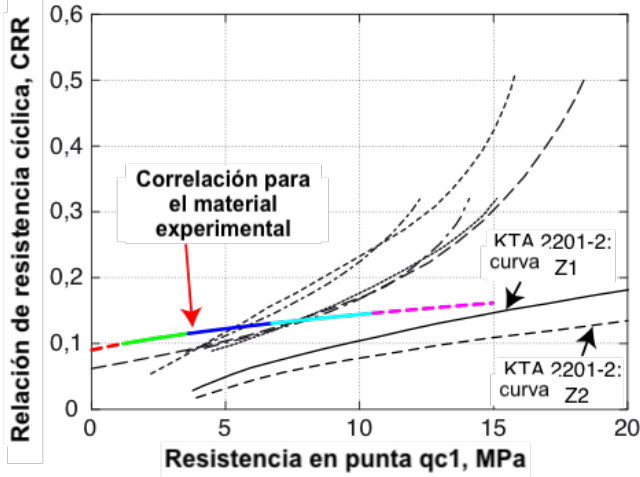
correlación produce factores más grandes propuestos en la literatura.

2.1.7.2 Tesis de licenciatura (Scholz, 2017):

El objetivo de esta tesis fue desarrollar las correlaciones para determinar la susceptibilidad a licuefacción como el "informe de trabajo 2" resumido anteriormente, además el autor se propuso investigar la influencia de la curva de distribución granulométrica, utilizando los mismos materiales de minería a cielo abierto en la correlación entre la resistencia a licuefacción y la resistencia máxima de las pruebas CPTu. Para estas investigaciones experimentales, se estudiaron tres materiales ("Kali1", "Kali2" y "Kali3"), los cuales tienen diferente granulometría (Figura 2.14).

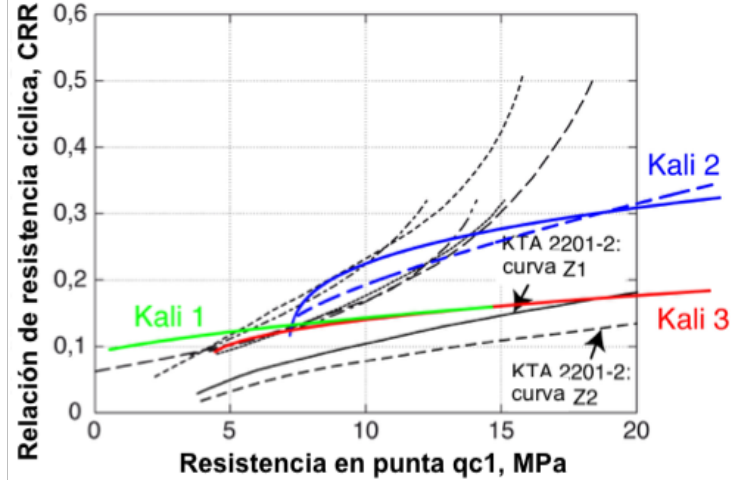
Igualmente, que el proyecto de investigación anterior, las resistencias de punta se midieron en mediciones de penetración de cono en la celda de calibración, mientras que las resistencias a licuefacción se derivaron de pruebas triaxiales cíclicas no drenadas, las correlaciones se muestran en el apartado de Anexos 2 y 3.

(Scholz, 2017) concluye que la correlación (tres materiales experimentales vs correlaciones para suelos de origen natural propuestos en la literatura) presenta en la región de bajas densidades de almacenamiento y bajas resistencias de punta una buena similitud (Figura 2.16). Sin embargo, con mayores densidades de almacenamiento y, por lo tanto, mayores resistencias CPTu, las curvas de correlación para los materiales experimentales son más planas que las referencias bibliográficas, por lo tanto, la resistencia a la licuefacción de los materiales experimentales en esta área es menor de lo que habrían predicho las curvas de la literatura.



- Shibata & Teparaksa (1988), nach Towhata (2008)
- Robertson et al. (1992)
- Shibata & Teparaksa (1988), nach Ishihara (1993)
- - - Robertson & Campanella (1985), nach Ishihara (1993)
- Seed & de Alba (1986), nach Ishihara (1993)

Figura 2.15. Comparación de la nueva correlación CRR – qc1 para el material experimental Kali1 con correlaciones obtenidas de la literatura. **Fuente:** (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).



- Shibata & Teparaksa (1988), nach Towhata (2008)
- Robertson et al. (1992)
- Shibata & Teparaksa (1988), nach Ishihara (1993)
- - - Robertson & Campanella (1985), nach Ishihara (1993)
- Seed & de Alba (1986), nach Ishihara (1993)

Figura 2.16. Comparación de la nueva correlación CRR – qc1 para el material experimental Kali1, Kali2 y Kali3 con correlaciones obtenidas de la literatura. **Fuente:** (Scholz, 2017).

Metodología

3.1 Metodología

3.1.1 Ensayos CPTu en la cámara de calibración

3.1.1.1 Preparación del material Kali4

En cuanto a la preparación del material proveniente del sitio en estudio, anticipadamente, se eliminó por medio de tamizaje todas aquellas partículas de grava o material arcilloso con tamaño mayor a 10 mm. El contenido de humedad del material se determinó de la siguiente manera: el material húmedo se trabajó en lotes de aproximadamente 80 kg, y se mezcló con la ayuda de un homegenizador para garantizar una distribución uniforme (Figura 3.1). Para tal propósito, se pesó un lote y luego se aplicó la Ecuación 3.1 para determinar la masa de agua que debe agregarse para obtener el contenido de humedad deseado (12% - 15%).

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_f - m_d}{m_d} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

w: Contenido de humedad

m_w : Masa agua

m_d : Masa arena seca

m_f : Masa húmeda total

El agua se añadió lentamente al material durante el mezclado, empleando un recipiente de medición (Figura 3.1). Después de vaciar el recipiente, la muestra se homogenizó durante otros 60 segundos para obtener la mezcla lo más homogénea posible. El material con la humedad corregida obtenida se colocó de nuevo en una “Big

Bag”, que se cerró lo más herméticamente posible para evitar que se perdiera humedad.



Figura 3.1. Corrección de humedad del material utilizado en los ensayos. Fuente: IBF.

3.1.1.2 Instalación de la muestra en la CC

Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran vacía la cámara de calibración, esto antes del establecimiento de la muestra dentro de la misma. Como se observa en las siguientes imágenes, la CC se coloca en el sótano, en uno de los compartimentos de la sala experimental para instalar la muestra. La incorporación de la muestra se llevó a cabo en estado húmedo (12% - 15%) en todos los experimentos.



Figura 3.2. Cámara de calibración en el sótano del IBF. Fuente: IBF.



Figura 3.3. Cámara de calibración en el sótano del IBF. Fuente: IBF.

Antes de la instalación, se tenía que definir la densidad de almacenamiento deseada. Para ello, los parámetros más significativos del material (densidad relativa de almacenamiento y contenido de humedad) son definidos con anterioridad y obtenidos por ensayos complementarios; los parámetros son aplicados con la intención de calcular peso de material en la instalación por capa y por lo tanto el número de capas y las dimensiones de las capas.

Basándose en la profundidad de la instalación (capas), fue posible entonces verificar más tarde si se alcanzó la densidad de almacenamiento requerida en cada capa, o si es necesario compactar la muestra durante la instalación de las capas. La instalación de la muestra experimental en la CC se dividió en dos etapas de trabajo; en primer lugar, la muestra se pesó con una balanza acoplada a la grúa. Posteriormente, la arena húmeda se agregó lentamente dentro de la CC utilizando palas (Figura 3.4).



Figura 3.4. Instalación de la muestra en la CC del IBF. Fuente: IBF.

En el caso de almacenamiento suelto, la instalación tuvo que llevarse a cabo con especial cuidado para que la altura de cada capa no alcanzara densidades de almacenamiento altas. Un operario, el cual se encontraba junto a la CC (en el sótano), coordinaba el área de la CC donde se debía agregar el material y así lograr una distribución lo más uniforme posible.

La densidad de almacenamiento se controló continuamente por medio de la profundidad de cada una de las “n” capas (Figura 3.5). Para este propósito, las profundidades se midieron desde el borde superior de la celda después de la instalación de cada capa y se compararon con las profundidades nominales de instalación calculadas anteriormente. Si era necesario, el material experimental se compactaba con un dispositivo para tal propósito. Al final del vertido de una capa, las diferencias de altura se equilibraron con un rastrillo o tenedor; el material se tenía que distribuir uniformemente en la CC. Como el material colocado en la CC no se podía reinstalar, era importante elegir la altura de caída adecuada o al menos baja (1,5 m) en el caso de almacenamiento suelto ($I_b = 0,2 - 0,4$), esto estuvo determinado por la experiencia de los técnicos del laboratorio. En densidades de almacenamiento densas, el material se incorporó con mayor energía, es decir, el material se dejó caer desde una altura mayor.

Tan pronto como todas las capas se instalaron correctamente, la tapa de la CC se coloca y se atornilla al cilindro de la celda de calibración.



Figura 3.5. Instalación de la muestra en la CC del IBF. Fuente: IBF.

3.1.1.3 Ejecución del ensayo CPTu en la CC

La Figura 3.6 muestra la celda de prueba después del ensamblaje de la tapa en la CC y la colocación del marco guía de la sonda CPTu. Este último consiste en un marco que tiene un sistema

verticalmente móvil, con un recorrido de 1,2 metros aproximadamente, además, se cuenta con una unidad hidráulica y una computadora para el control de la prueba y registro de mediciones (Figura 3.7).



Figura 3.6. Ejecución del CPTu en la CC del IBF. Fuente: IBF.



Figura 3.7. Equipo hidráulico y PC utilizados con el ensayo CPTu en el IBF. Fuente: IBF.

La sonda CPTu (Figura 3.6), junto con su barra, se encuentra unida a la viga transversal del marco guía. En el extremo superior de la sonda surge el cable que transfiere los datos a la computadora. Antes de insertar la sonda en la CC (abertura de la tapa), se realizan mediciones de referencia; estas medidas de referencia se llevaron a cabo en una posición donde la sonda se encontraba acostada y conectada. Los valores obtenidos se registraron como valores cero para la posterior penetración de la sonda en la CC; una vez de haber colocado la sonda a través de abertura en la tapa de la CC, la sonda debe solamente penetrar lo mínimo (2,0 – 5,0 cm) en la muestra de arena Kali4.

Ahora, las presiones laterales (definidas con anterioridad) se aplican a la muestra por medio de las membranas de goma. Para que el suelo se reacomode y por lo tanto se densifique lo suficiente bajo el estado de presión aplicado, la presión se mantuvo durante aproximadamente 20 minutos antes de introducir la sonda CPTu. En la fase de sondeo se realizó a una velocidad de avance constante. Se utilizó la unidad hidráulica, la velocidad de prueba fue de aproximadamente 18 mm / s, que está dentro del rango (15 - 25 mm / s) especificado en DIN 4094. En fin, los valores medidos de la resistencia máxima, la fricción del manguito y el desplazamiento de la sonda se registraron.

3.1.1.4 Extracción de la CC y muestreo

Después de completar la prueba CPTu, se tomaron muestras a cuatro profundidades con cilindros de corte para determinar los parámetros del material Kali4 dentro de la cámara, se obtuvieron datos para la obtención de la densidad húmeda ρ_f , el contenido de humedad w , la densidad seca ρ_d y la densidad relativa de almacenamiento I_D . Previamente a la extracción de las muestras, las membranas de caucho se adhieren a la pared de la celda de calibración por medio de una presión de vacío.

En la Figura 3.8 se muestra la estructura superficial del material "Kali4" después del sondeo a una presión de 100 kPa (Ensayo 10), una densidad de almacenamiento relativa promedio de

$I_D = 0,77$ y un contenido promedio de humedad de $w = 13,57\%$; se puede observar que sólo se comprime una pequeña parte del material como resultado de la presión aplicada durante el sondeo; además, la superficie permanece lisa y sin agrietarse. En comparación, la Figura 3.9 muestra la superficie del material experimental "Kali4" después de una prueba de 100 kPa (Ensayo 6), una densidad de almacenamiento relativa promedio de $I_D = 0,25$ y un contenido promedio de humedad de $w = 8,2\%$. En este caso tanto la densidad relativa I_D como el contenido de humedad w son distintos en ambas pruebas, por lo tanto, se encuentran asentamientos significativamente mayores en el material del "Ensayo 6" y las grietas resultantes en la superficie son mayores.



Figura 3.8. Superficie de la muestra en la CC después del ensayo 10. **Fuente:** IBF.



Figura 3.9. Superficie de la muestra en la CC después del ensayo 6. **Fuente:** IBF.

En la Figura 3.10 se muestra la posición en las cuales se muestreó el material de la celda de calibración, empezando por 1 (abajo centro), 2 (superior izquierdo) y 5 (superior derecho). Las profundidades (medidas desde el borde superior del cilindro) en las que se muestreo fueron establecidas a 12,0 cm, 37,5 cm, 63,5 cm y 91,0 cm.

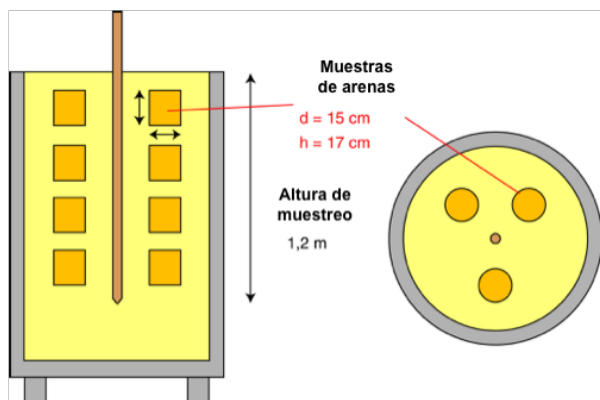


Figura 3.10. Posiciones del muestreo en la CC después del CPTu. **Fuente:** (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

En las primeras tres profundidades, se toman tres muestras (Figura 3.11) y se toman dos muestras en la última profundidad debido a la profundidad en la cuarta posición, donde el muestreo de forma precisa solamente es posible ingresando una persona en la CC. La decisión de hacer sólo dos muestras, se toma basándose de valores en la experiencia de ensayos anteriores. Para eliminar la muestra de la CC, la arena se extrajo por medio de palas a la profundidad deseada y luego los cilindros (15,0 cm diámetro, 17,0 cm altura) se presionaron de manera vertical en la arena utilizando niveles de agua instalados en el equipo (Figura 3.12). Tanto como sea posible, en la penetración de los cilindros perforadores y su extracción era necesario garantizar que la muestra se alterara lo menos posible. Cada muestra se mantuvo cerrada herméticamente (Figura 3.13) para evitar una variación de los parámetros de almacenamiento, esto hasta la posterior determinación del contenido de humedad w , la densidad de humedad ρ_f , la densidad seca ρ_d y la densidad relativa de almacenamiento I_D .

Para determinar el contenido de humedad, las muestras parciales se homogenizaron en los baldes (Figura 3.14) y luego se pesaron. Para extraer toda el agua, las sub-muestras se secaron al horno durante al menos dos días a 105 ° C (Figura 3.14).

En el material se observó una distribución generalmente similar en el contenido de humedad vs la profundidad en la CC. Para minimizar la influencia de la pérdida de humedad, era importante llevar a cabo la instalación, el sondeo y la extracción de la celda de calibración en el menor tiempo posible. Dado que la instalación y la extracción generalmente duraban de cinco a ocho horas cada una, un ensayo en su totalidad toma aproximadamente de dos a tres días.



Figura 3.11. Posiciones del muestreo para la profundidad de 12 cm. **Fuente:** IBF.



Figura 3.12. Introducción vertical de los cilindros perforadores para el muestreo. **Fuente:** IBF.



Figura 3.13. Posiciones del muestreo para la profundidad de 12 cm. Fuente: IBF.



Figura 3.14. Horno para muestras del IBF. Fuente: IBF.

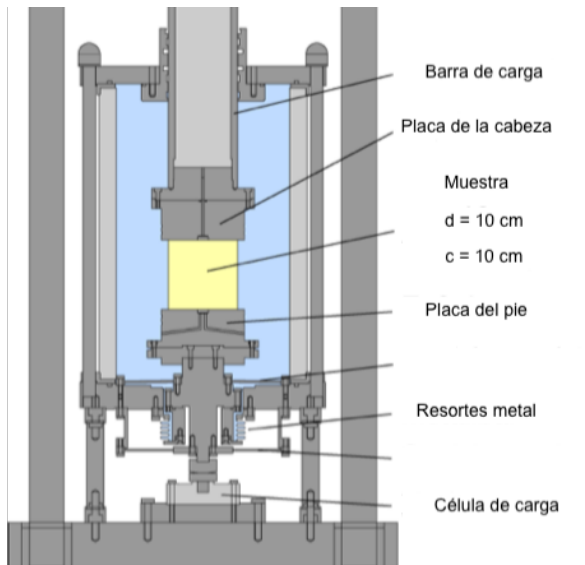


Figura 3.15. Esquema del dispositivo utilizado en el ensayo triaxial cíclico no drenado. Fuente: (Wichtman & Triantafyllidis, 2012).

3.1.2 Ensayos triaxiales cíclicos no drenados

Con el fin de determinar la resistencia a la licuación del material experimental, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas no drenadas por parte del personal del IBF. Además de la influencia de la densidad de almacenamiento, también se investigó la influencia de la presión de confinamiento en la celda triaxial. Se probarán cuatro diferentes presiones iniciales efectivas p'_0 (50, 100, 200 y 400 kPa); por el momento de la redacción de este informe se cuenta solamente con valores para la presión de 100 kPa. Todas las muestras han sido instaladas por caída libre, por lo que la densidad de almacenamiento ha sido variada, además, se da la elección de diferentes contenidos de humedad incorporados.

La Figura 3.15 muestra un esquema del dispositivo triaxial utilizado en el IBF para pruebas triaxiales cíclicas no drenadas en el material experimental Kali4. En este ensayo se inserta una muestra en el banco de pruebas con altura de $h = 10,0$ cm y un diámetro de $d = 10,0$ cm (relación: $h/d = 1,0$). Para aplicar una presión lateral a la muestra, se aplica una presión al agua que llena la celda de presión. La fuerza vertical se aplica a la muestra a través de la placa en la cabeza y la barra de carga. La barra, a su vez está conectada fijamente a un dispositivo que se mueve verticalmente con la ayuda de un motor eléctrico. La fuerza vertical debajo de la placa del pie de la muestra se mide con una celda de carga. Un mecanismo mide el desplazamiento vertical el cual es registrado por medio de una computadora. La presión de poro y la presión de la celda también se registran a través de transductores de presión.

3.1.2.1 Instalación de la prueba

Para reducir la fricción entre la muestra y la placa del pie, se engrasa la parte superior de la placa del pie de la muestra antes de colocar un disco de goma (Figura 3.16).

Las burbujas incluidas debajo del disco de goma se eliminan con un cuchillo. Luego para una mejor manipulación, la media de goma de la muestra se unta con talco y se fija con dos juntas de empaques en la placa del pie de la muestra (Figura 3.17). El molde formador de muestra (Figura 3.18) se monta entonces rodeando la estructura de caucho que se muestra en la Figura 3.17. El caucho de goma se aspira con un vacío en la pared del molde formador de muestra.

El peso en vacío del dispositivo se obtiene para luego instalar el material experimental, el formador de muestra se alinea debajo de un embudo para insertar la muestra (Figura 3.19) con una altura de caída de 150,0 cm. Este proceso se realizó colocando en el extremo inferior del embudo una lámina metálica; luego el embudo se llena con la arena Kali4 húmeda. A continuación, se retira la placa de cierre para que el material descienda abruptamente en el formador de muestra.

La Figura 3.20 ilustra el formador de la muestra después de que cuidadosamente se elimina el exceso de material. Al realizar esto, se debe asegurar de que no se den vibraciones o golpes para evitar que la muestra se afloje o se densifique. Ahora se pesa el formador de muestras que incluye el material de muestra y se coloca en el dispositivo triaxial. En la placa de la cabeza de la muestra preparada, se aplica una capa de lubricante con el disco de goma, la placa en la cabeza de la muestra está firmemente conectada a la barra de carga del dispositivo triaxial, la cual se baja lentamente sobre la superficie superior de la muestra. La media de caucho lateral se enrolla sobre la placa de cabeza de muestra y se sella con dos empaques. A continuación, la muestra se estabiliza con un vacío de 30 kPa y se retira el formador de muestra (Figura 3.21). Después la presión de vacío se aumenta a 50 kPa y tanto la altura como el diámetro se miden en 3 posiciones.

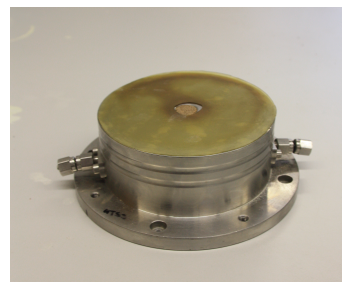


Figura 3.16. Placa al pie de la muestra con filtro central y disco de goma. **Fuente:** IBF.

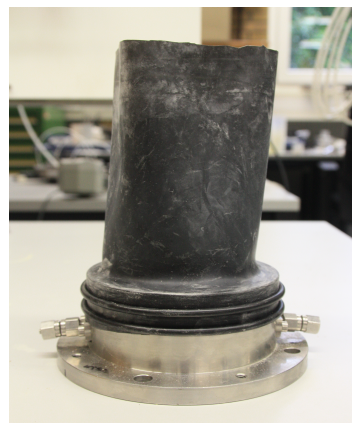


Figura 3.17. Pared de hule del dispositivo. **Fuente:** IBF.

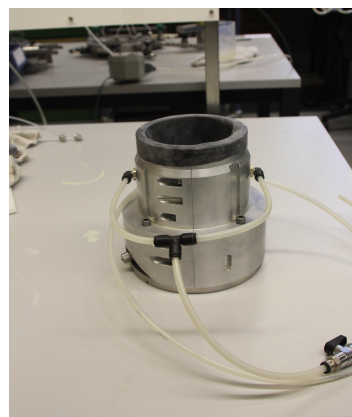


Figura 3.18. Formador de la muestra del dispositivo. **Fuente:** IBF.



Figura 3.19. Marco de caída con embudo de caída para introducir el material húmedo en el formador de la muestra. **Fuente:** IBF.

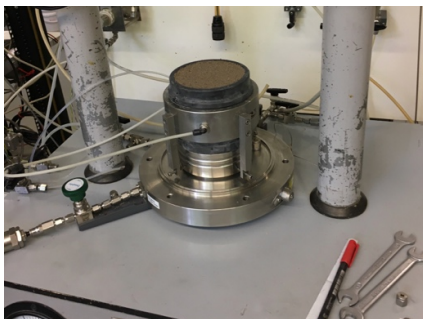


Figura 3.20. Muestra lista para ensayo. **Fuente:** IBF.

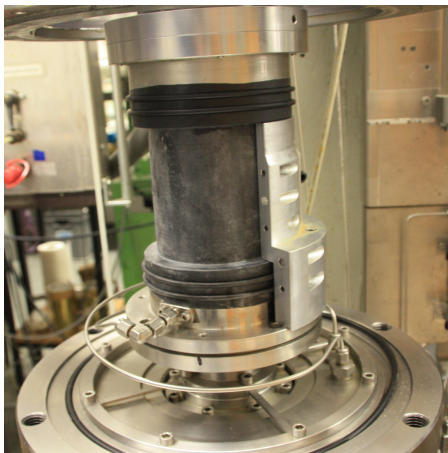


Figura 3.21. Muestra lista para ensayo triaxial cíclico. **Fuente:** IBF.

El volumen inicial V_0 de la muestra se puede determinar a partir de estas variables de medición. El contenido de humedad w del material de muestra se determinó antes de la instalación. Con la masa seca agregada m_f y el contenido de humedad determinado anteriormente, la masa seca incorporada puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$m_d = \frac{m_f}{1+w} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

- m_d : Masa seca agregada
- w : Contenido de humedad
- m_f : Masa húmeda total

Con la ayuda del volumen y la masa seca incorporada, se puede determinar la densidad seca $\rho_d = m_d / V$, así como la densidad de almacenamiento ρ_b correspondiente. Después se coloca la celda de presión del dispositivo triaxial, la cual se atornilla a la placa de pie de la celda triaxial.

La celda se llena con agua desmineralizada (Figura 3.22). Después de la colocación de la celda, el vacío aplicado al interior de la muestra se elimina gradualmente y la presión de la celda aumenta a 50 kPa al mismo tiempo. En este caso, en la barra de carga se comprime automáticamente para garantizar un estado de presión isotrópica ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Después, la muestra se pasa a través de CO_2 durante 30 minutos. El CO_2 reemplaza el aire en el espacio de los poros; luego, la muestra se enjuaga con agua sin aire. A través del sistema la contrapresión se incrementa en turnos de 20 kPa hasta 200 kPa. La presión de la celda aumenta simultáneamente a 220 kPa. En el caso del aumento de presión, la presión de poro siempre se mantiene 20 kPa por debajo de la presión de la celda, de modo que un estrés isotrópico de soporte actúa sobre la muestra. Después de que la presión de poro se lleva a 200 kPa y la presión de la celda a 220 kPa, la muestra se deja reposar bajo estas presiones durante una hora para permitir que el CO_2 residual se reemplace en el agua.

Luego, bajo estas presiones, la muestra nuevamente se enjuaga cuidadosamente con agua desmineralizada. Durante este proceso, el tanque de agua se presuriza por debajo de 200 kPa para mantener constante la presión del agua intersticial. Después de completar esta nueva penetración de agua, la contrapresión (presión de poros) y la presión de las celdas se incrementan gradualmente, a 500 kPa (presión de poro) y 520 kPa (presión de celda). La muestra se deja reposar durante la noche bajo estas presiones, que también se pretende para mejorar aún más la completa saturación.

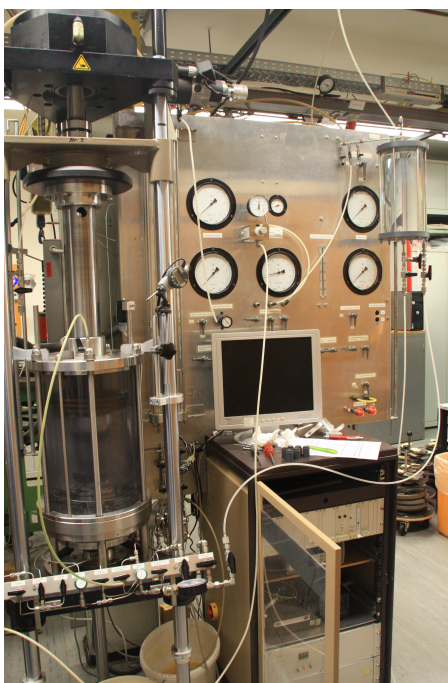


Figura 3.22. Ensayo triaxial cíclico no drenado. Fuente: IBF.

A la mañana siguiente, la calidad de la muestra se comprobará con la prueba B según Skempton. Los drenajes están cerrados y la presión de la celda aumenta en $\Delta\sigma_3$.

Esto produce un aumento en la presión del agua intersticial en la cantidad Δu . El parámetro de skempton B, se define como la relación entre el incremento medido de la presión de poro Δu y el incremento de la presión de celda $\Delta\sigma_3$, el cual debe ser de al menos 0,97 para las muestras de arena (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017):

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma} \geq 0,97 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

B: Parámetro de Skempton B

Δu : Incremento medido de la presión de poro

$\Delta\sigma$: Incremento de la presión de celda

Posteriormente, la presión de la celda se reduce nuevamente al valor inicial de 520 kPa y se abren los drenajes. Ahora la presión de la celda aumenta a 600 kPa cuando se abre el drenaje.

El programa de control comienza con los ciclos. La carga cíclica finaliza tan pronto como se alcanza el criterio de ruptura del 10% de alargamiento (ya sea en el rango de compresión o extensión).

3.1.3 Desarrollo de la correlación

3.1.3.1 Relación resistencia en punta máxima q_c vs I_D

Antes de desarrollar la correlación es necesario determinar el comportamiento entre los valores de la resistencia de punta q_c y la densidad de almacenamiento I_D , lo anterior solamente para la segunda, tercera y cuarta posición de muestreo o profundidades obtenidas con los cilindros.

Los datos provenientes de la muestra más alta no se tomaron en cuenta, ya que los datos de resistencia de punta suelen ser irregulares (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).

Típicamente en las correlaciones presentes en la literatura las resistencias de punta q_c se refieren a una presión efectiva vertical de $\sigma_v' = 100$ kPa y una presión lateral de $p = 100$ kPa, por lo que es necesario normalizar todos aquellos datos obtenidos con presiones laterales distintas a 100 kPa (Kimmig, 2017).

Para tal propósito, se creó un gráfico (Figura 4.15) que contiene sólo los datos para una presión lateral y vertical de $p = 100$ kPa.

La relación se describió mediante el siguiente polinomio (curva azul en la Figura 4.15):

$$q_c(100 \text{ kPa}) = 4,4566 - 22,109 I_D + 38,79 I_D^2$$

$$R^2 = 0,9614 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Para la realizar una comparación de datos, en la Figura 4.15 también se graficaron los valores de $q_c - I_D$ que se recomiendan en DIN 4094-1 para arenas de $C_u \leq 3$ o mezclas de arena y grava; la curva según DIN excede la resistencia de punta medidas para el material experimental.

Para corregir los datos sobre la influencia de las diferentes densidades de almacenamiento, las resistencias de sondeo en la Figura 4.17 se convirtieron en valores de q_c (100 kPa) para una densidad de almacenamiento relativa media de $I_D = 0,57$.

Estas correcciones por densidad se representan en la Figura 4.18 vs la presión de la cámara. Una cierta variedad de datos todavía está presente, pero se ha reducido un poco en comparación con la Figura 4.17.

Antes de la creación del diagrama de correlación para el análisis de la resistencia a la licuefacción; la presión de la resistencia de punta fue normalizada, la cual se denotó como q_{c1} y se calculó de la siguiente manera a partir de q_c del CPTu:

$$q_{c1} = C_N * q_c \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$\frac{q_c}{q_{c1}} = \frac{q_c}{q_c(100 \text{ MPa})} = \frac{1}{C_N} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

- qc: Resistencia de punta del CPTu
- qc1: Resistencia de punta normalizada
- CN: Factor de normalización

(Shibata & Teparaksa, 1988) proponen el factor de normalización C_N , que también se utilizó en evaluaciones anteriores de las resistencias de sondeo de las minas a cielo abierto; además, (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017) y (Scholz, 2017)

propusieron otro factor C_N para el material experimental Kali1, Kali2 y Kali3 respectivamente. La expresión del factor C_N se puede expresar de dos funciones distintas una lineal y otra potencial, la Ecuación 3.7 y 3.8 respectivamente, donde se utiliza la que se ajuste mejor al comportamiento de los datos obtenidos, esto se realizó gráficamente presentado en el Apéndice 3 y Figura 4.20.

$$\frac{1}{C_N} = \frac{\frac{\sigma'_v(\text{kPa})}{100} + a}{1+a} = \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$\frac{1}{C_N} = b + (1 - b) \left(\frac{\sigma'_v(\text{kPa})}{100} \right)^c \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

- C_N : Factor de normalización
- $\sigma'_v = p'$: Presión de confinamiento en la CC
- a, b, c: Factores de ajuste

$$\frac{1}{C_N} = \frac{\frac{\sigma'_v(\text{kPa})}{100} + 0,7}{1,7} = \text{Shibata y Teparaska}$$

$$\text{Ecuación 3.9}$$

$$\frac{1}{C_N} = \frac{\frac{\sigma'_v(\text{kPa})}{100} + 0,16}{1,16} = \text{Kali1} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$\frac{1}{C_N} = 0,35 + (1 - 0,35) \left(\frac{\sigma'_v(\text{kPa})}{100} \right)^{0,8} \quad \text{Kali2 y Kali3}$$

$$\text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

$$1 / C_N = 1 \text{ para } p' = 100 \text{ kPa.}$$

El Apéndice 3 y Figura 4.20 demuestra con los datos medidos, que la curva de la Ecuación 3.7 no se ajusta de acuerdo a la dispersión de los datos reales. La otra función (potencial), que se agregó como una línea color rojo en la Figura 4.20, es más adecuada para la normalización de la resistencia del material experimental; entonces la expresión del $1/C_N$ resultó dada por:

$$\frac{1}{C_N} = \frac{\frac{\sigma'_v (kPa)}{100} + 1,06}{1 + 1,06} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$\frac{1}{C_N} = 0,244 + (1 - 0,244) \left(\frac{\sigma'_v (kPa)}{100} \right)^{0,64} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Entonces el ajuste (Anexo 4 y Figura 4.6) resultó ser: a = 1,06411, b = 0,24418 y c = 0,6381. En fin, se verificó que se satisface la condición $1 / C_N = 1$ para $p' = 100$ kPa.

3.1.3.2 Relación de la resistencia a licuefacción (CRR) vs I_D

Por medio de los resultados de los ensayos triaxiales cíclicos no drenados presentes en el Cuadro 4.2, se configuraron entonces las curvas para determinar la resistencia a licuefacción.

La CRR (relación de resistencia cíclica) se leyó entonces como la relación de amplitud, que conduce a una licuefacción después de $N = 10$ ciclos. El valor de CRR se leyó en cada curva y se representó en las Figuras 4.31 y 4.32 como una función de la densidad relativa.

Con los diagramas $qc_1 - I_D$ y $CRR - I_D$ se construyó la correlación presentada en la Figura 4.25. Por último, se hizo un diagrama en donde se presenta la correlación experimental y se compara con lo establecido en la literatura.

Resultados y Análisis de Resultados

4.1 Resultados

4.1.1 Resultados de ensayos CPTu en la cámara de calibración del IBF para el material experimental Kali4

Se realizaron 14 ensayos de penetración estática de piezocono; según el programa de pruebas (Apéndice 1) solamente faltó de realizar 2 ensayos de los programados, sin embargo, según (Kimmig, 2017), basándose en las 14 pruebas (11 isotrópicas y 3 anisotrópicas) es suficiente para realizar la correlación propuesta.

Los siguientes diagramas muestran la resistencia en punta q_c , la fricción superficial del manguito τ_m , la relación de fricción τ_m / q_c , la densidad relativa de almacenamiento promedio I_D y el contenido de humedad promedio w en función de la profundidad (z) de cada una de las pruebas

llevadas a cabo en el IBF durante la práctica profesional.

Las líneas trazadas en los diagramas combinan los valores promedio de densidad relativa I_D (rojo) y contenido de humedad promedio w (verde) en función de la profundidad z de la CC. A la misma profundidad, también se determinó el valor medio de la resistencia máxima. El promedio del valor de q_c se llevó a cabo a una distancia z en el centro de las muestras obtenidas con el cilindro de perforación. Los valores de q_c promediados (línea azul + puntos rojos) se muestran en las relaciones $q_c - z$ de las siguientes Figuras.

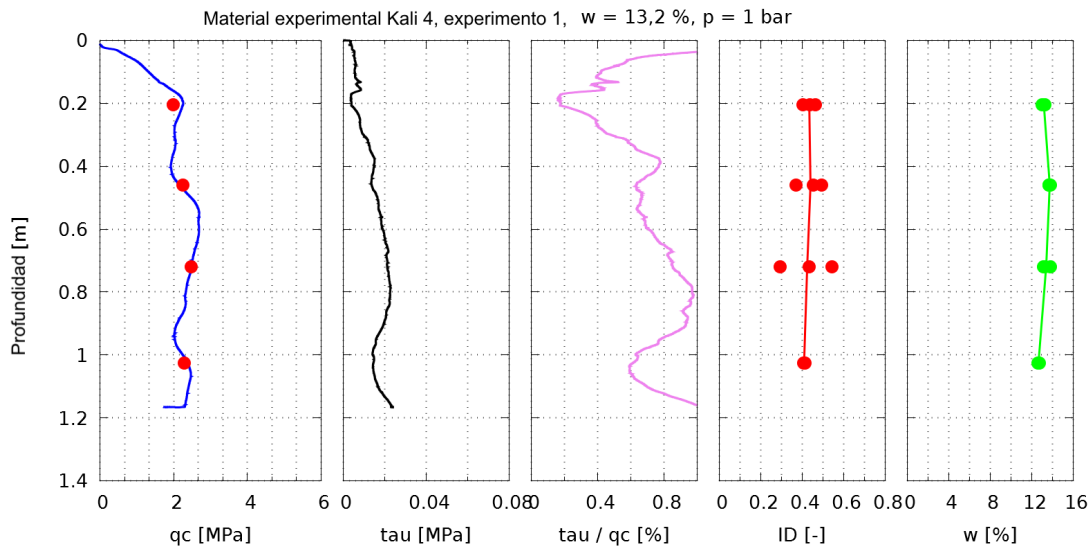


Figura 4.1. Resultado del ensayo 1 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 27/6/2017.

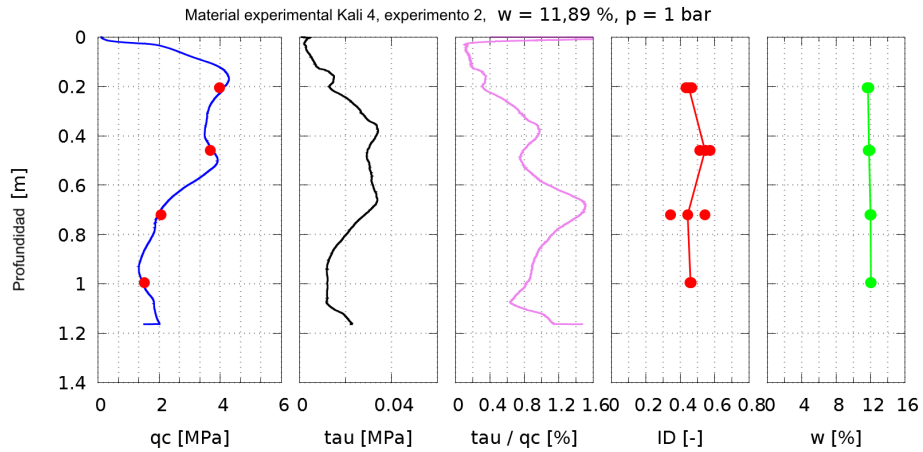


Figura 4.2. Resultado del ensayo 2 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 3/7/2017.

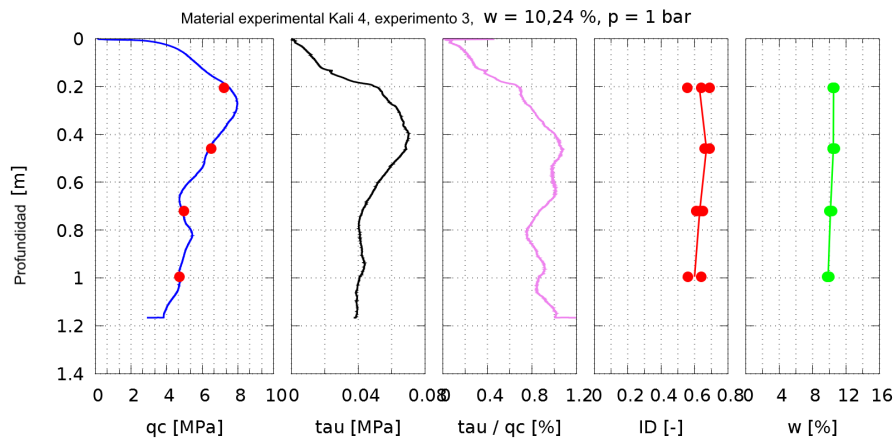


Figura 4.3. Resultado del ensayo 3 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 18/7/2017.

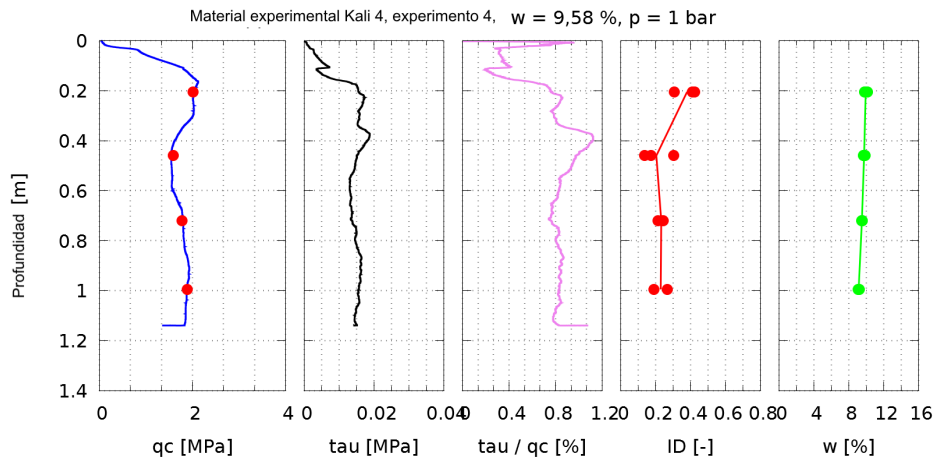


Figura 4.4. Resultado del ensayo 4 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 26/7/2017.

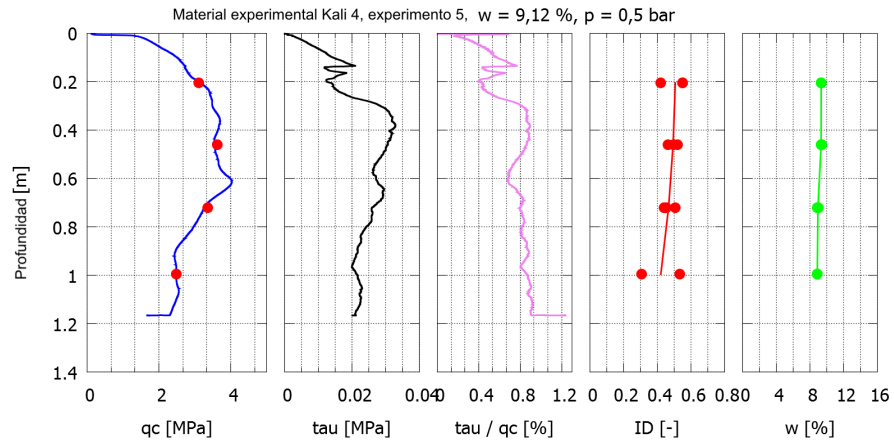


Figura 4.5. Resultado del ensayo 5 (Presión isotrópica: 50,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 2/8/2017.

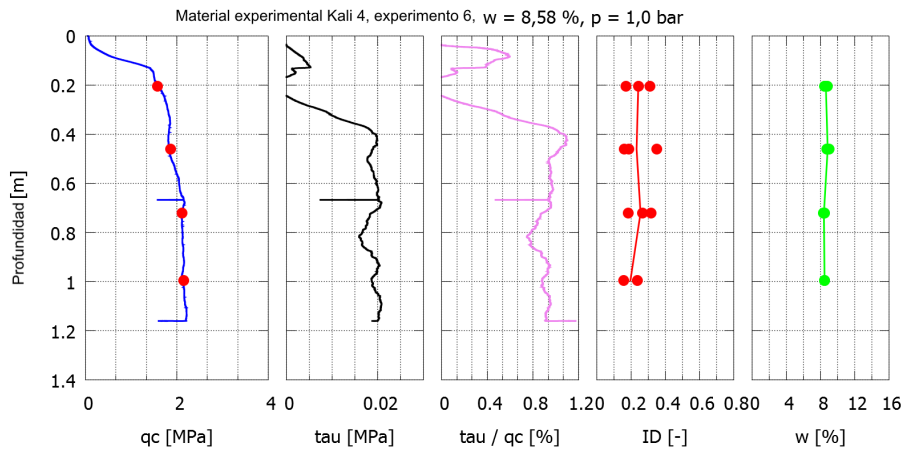


Figura 4.6. Resultado del ensayo 6 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 9/8/2017.

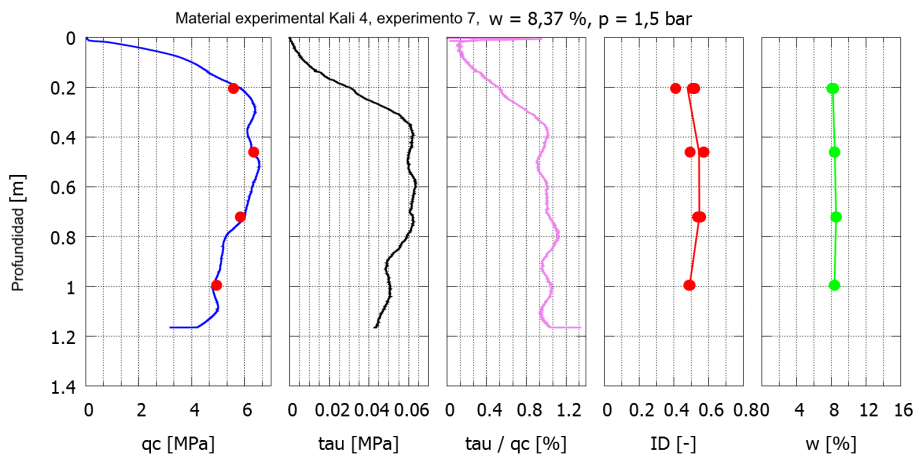


Figura 4.7. Resultado del ensayo 7 (Presión isotrópica: 150,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 16/8/2017.

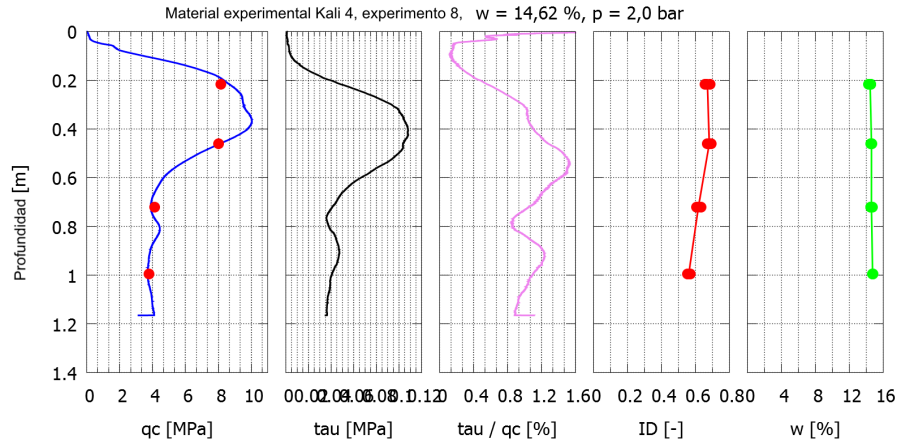


Figura 4.8. Resultado del ensayo 8 (Presión isotrópica: 200,0 kPa) sobre el material “Kali4”. **Fuente:** Obtenido en el IBF el día 24/8/2017.

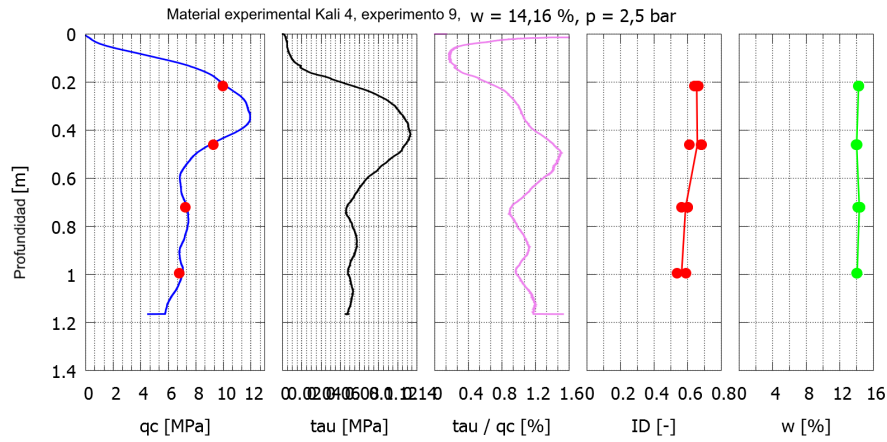


Figura 4.9. Resultado del ensayo 9 (Presión isotrópica: 250,0 kPa) sobre el material “Kali4”. **Fuente:** Obtenido en el IBF el día 30/8/2017.

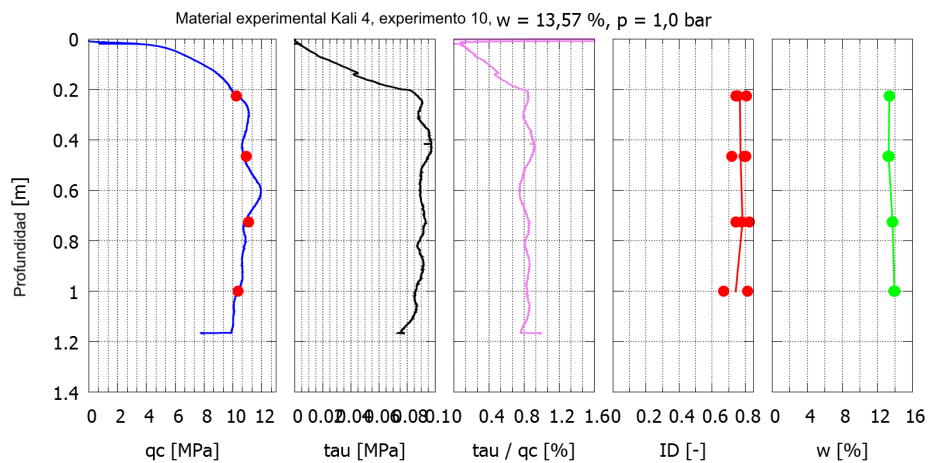


Figura 4.10. Resultado del ensayo 10 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. **Fuente:** Obtenido en el IBF el día 5/9/2017.

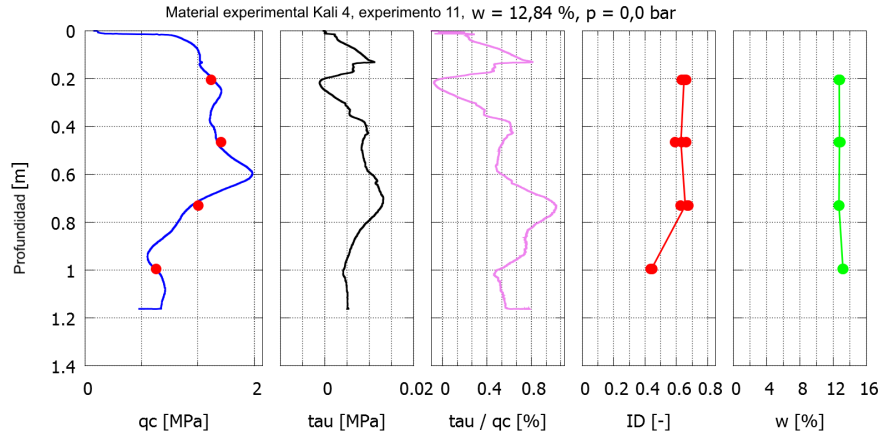


Figura 4.11. Resultado del ensayo 11 (Presión isotrópica: 0,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 18/9/2017.

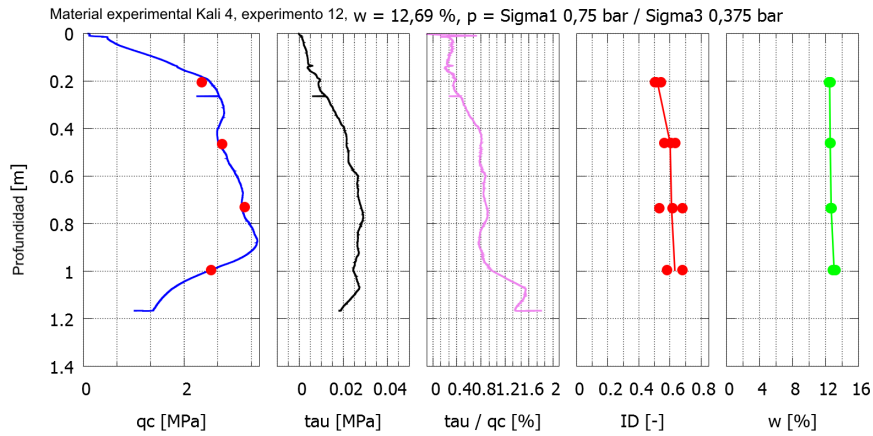


Figura 4.12. Resultado del ensayo 12 (Presión anisotrópica: 75,0; 37,5 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 19/9/2017.

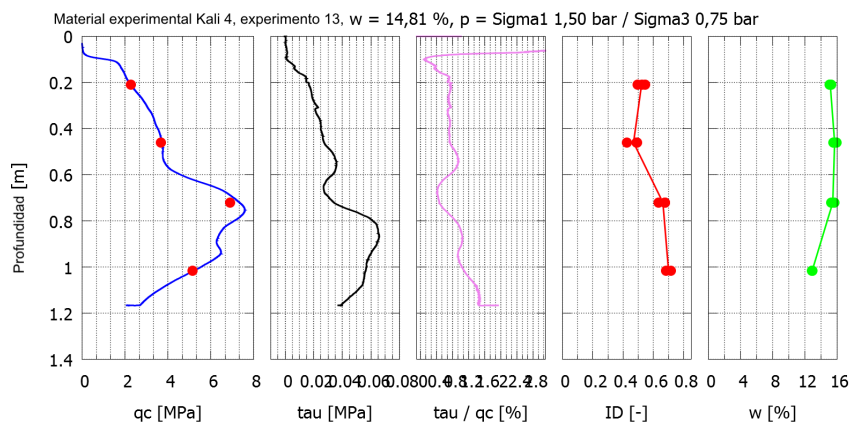


Figura 4.13. Resultado del ensayo 13 (Presión anisotrópica: 150,0; 75,0 kPa) sobre el material "Kali4". Fuente: Obtenido en el IBF el día 21/9/2017.

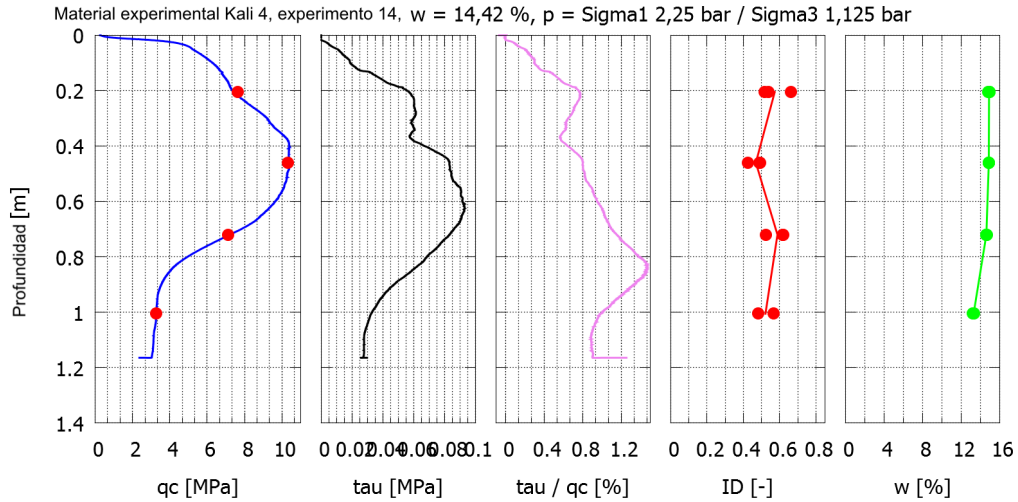


Figura 4.14. Resultado del ensayo 14 (Presión anisotrópica: 225,0; 112,5 kPa) sobre el material “Kali4”. **Fuente:** Obtenido en el IBF el día 26/9/2017.

Finalmente, con los datos para una presión de 100 kPa se desarrolló la Figura 4.15; en donde se relaciona la densidad relativa de almacenamiento (I_D) en función de la resistencia en punta del ensayo CPTu (q_{c1}); esta función se registró por medio de la Ecuación 4.1. La cual será

utilizada en los siguientes apartados para generar la correlación entre q_{c1} - I_D y la resistencia a licuefacción CRR- I_D .

$$I_D = -0,0147 + 0,1674 q_{c1} - 0,0091 q_{c1}^2, R^2 = 0,8527 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

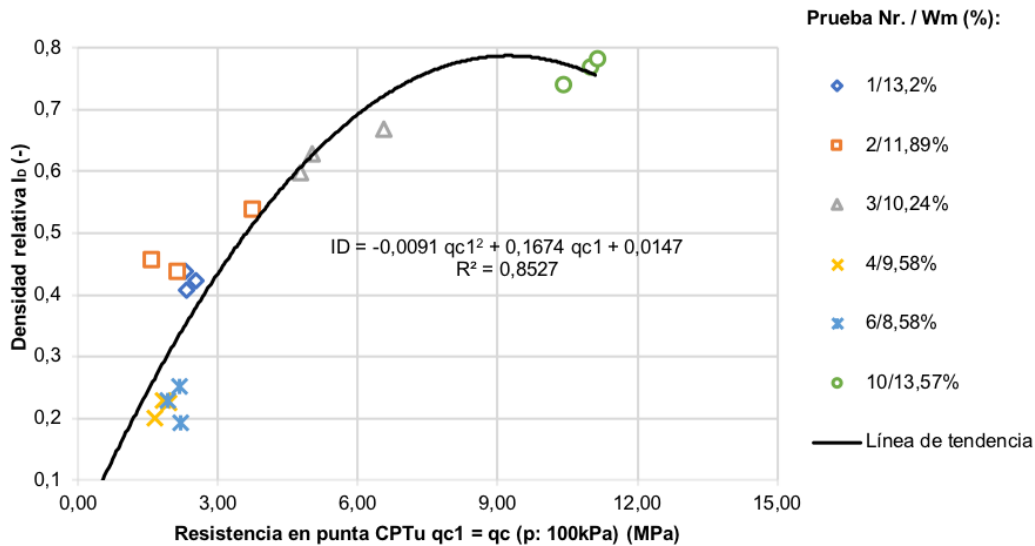


Figura 4.15. Densidad relativa de almacenamiento en función resistencia en punta q_c en los ensayos en la CC para el material “Kali4”. **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.1.2 Resultados de ensayos triaxiales cíclicos no drenados para el material experimental Kali4

Para determinar la resistencia a licuefacción, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas no drenadas en la arena Kali4, esto por parte del personal del IBF. Los resultados presentes en el siguiente apartado han sido facilitados por el IBF para hacer posible la realización de este informe. En estas pruebas se investigó la influencia de la densidad de almacenamiento y la influencia de la presión en la resistencia a licuefacción. Por el momento se han hecho pruebas solamente con una presión efectiva de 100 kPa, pero se tiene

programado estudiar cuatro presiones iniciales efectivas diferentes $p'_0 = 50$ kPa, 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa.

Todas las muestras se prepararon por caída libre, como se describió en el apartado de metodología; se manejaron diferentes contenidos de humedad, por lo que la densidad de almacenamiento varió en cada instalación. Los resultados de todos los experimentos individuales se pueden ver en las siguientes Figuras 4.16 – 4.23.

4.1.2.1 Presión efectiva inicial $p'_0 = 100$ kPa

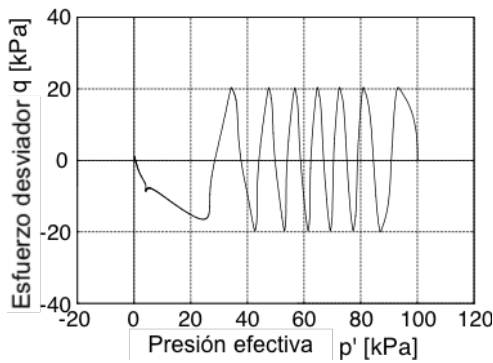


Figura 4.16. Resultado de la prueba 1 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

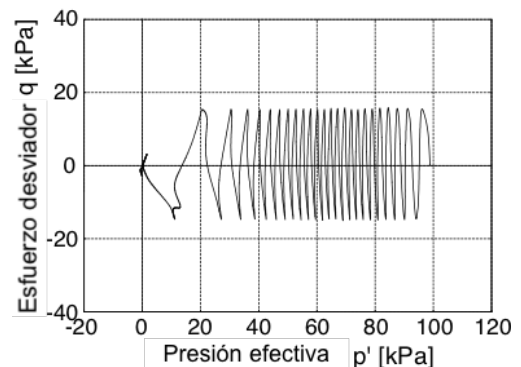


Figura 4.18. Resultado de la prueba 3 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

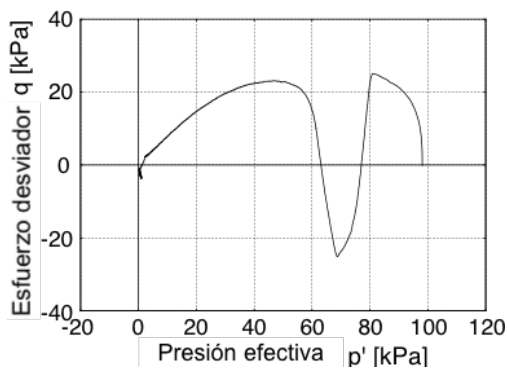


Figura 4.17. Resultado de la prueba 2 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

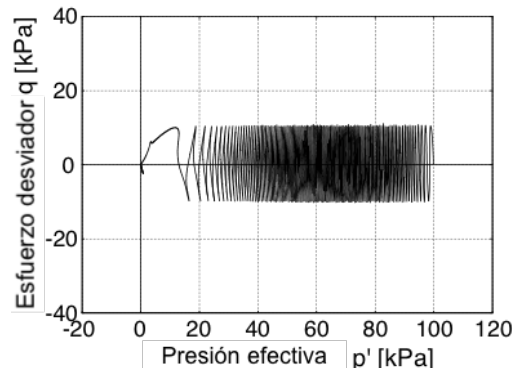


Figura 4.19. Resultado de la prueba 4 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

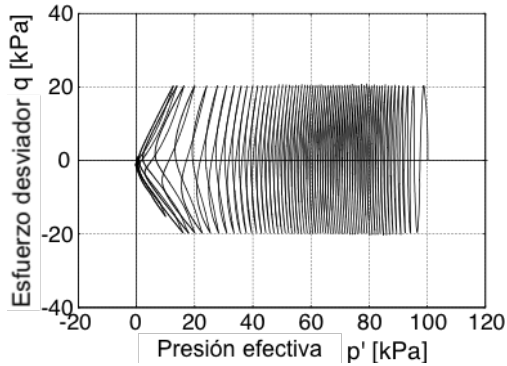


Figura 4.20. Resultado de la prueba 5 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

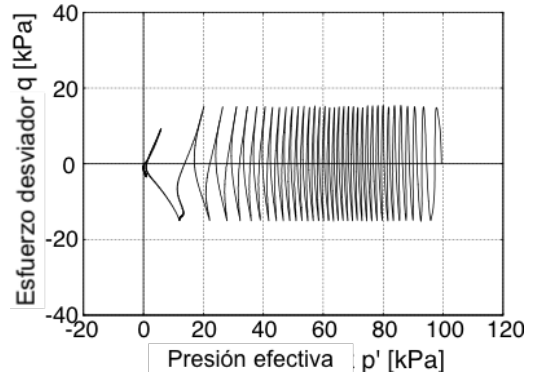


Figura 4.22. Resultado de la prueba 7 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

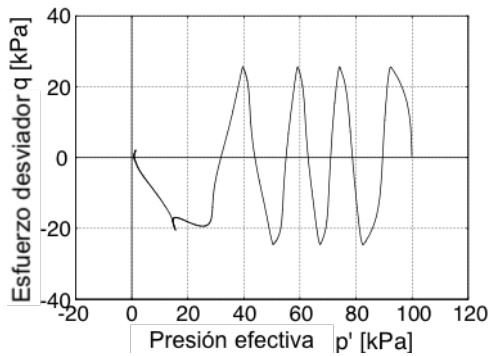


Figura 4.21. Resultado de la prueba 6 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

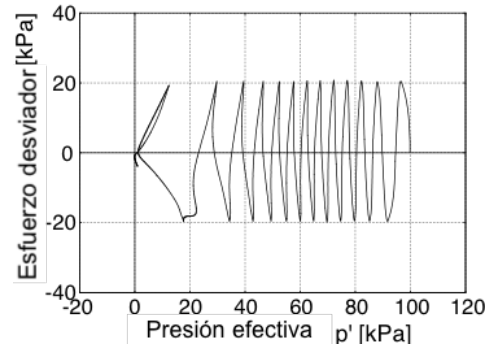


Figura 4.23. Resultado de la prueba 8 (Presión 100 kPa) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Elaborado en el IBF.

La relación de resistencia cíclica (CRR, $N_f = 10$) se representa gráficamente en la Figura 4.24 como una función de la densidad relativa de almacenamiento I_D . Para la presión inicial experimentada, existe una relación lineal. Esta curva para la presión $p'_0 = 100$ kPa es necesaria en

el siguiente apartado para el desarrollo del diagrama de correlación. La relación puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$CRR (N_f = 10) = 0,086 + 0,0531 I_D, R^2 = 1,0$$

Ecuación 4.2

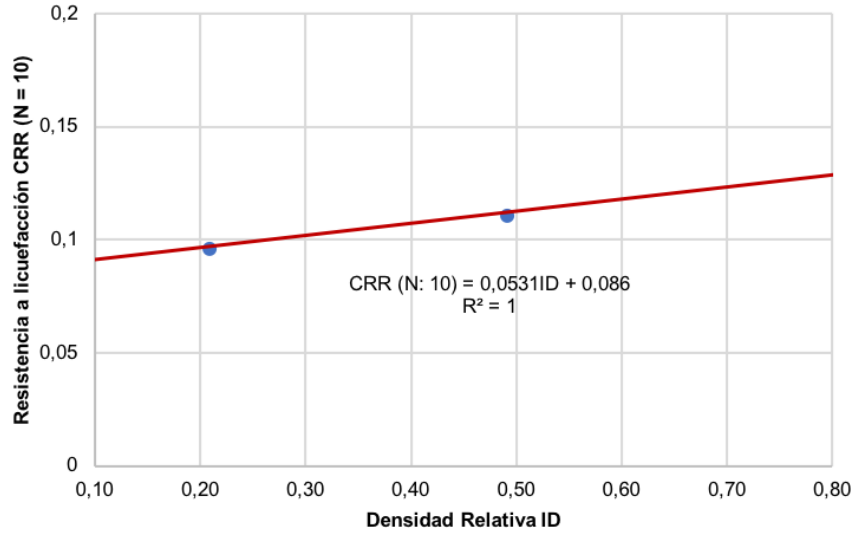


Figura 4.24. Relación de esfuerzos cíclicos CSR para licuefacción en 10 ciclos (CRR de resistencia a licuefacción) en función de la densidad relativa de almacenamiento inicial ID el material experimental “Kali4”. **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.1.3 Correlación entre la resistencia en punta normalizada $qc1$ y la relación de resistencia cíclica CRR para el material experimental Kali4

Los resultados de los ensayos CPTu en la cámara de calibración y las pruebas triaxiales cíclicas no drenadas, han sido utilizados para establecer un diagrama de correlación entre la resistencia a licuefacción y la resistencia máxima en punta del CPTu. El diagrama se muestra en la Figura 4.25. dado que los diagramas de correlación en la literatura siempre se configuran para una presión de referencia efectiva de 100 kPa, los datos experimentales para p y $p'_0 = 100$ kPa también se emplearon en este caso.

La sección superior izquierda de la Figura 4.25 proviene de los resultados de las pruebas triaxiales cíclicas no drenadas. Esta es la relación entre la resistencia a licuefacción por falla en 10 ciclos ($M_w = 7,5$) y la densidad relativa de almacenamiento I_D que se expresó en la Figura 4.24. En la sección inferior derecha de la Figura

4.25, se repite el resultado de los ensayos CPTu en la CC del IBF, mostrados en la Figura 4.15.

En el diagrama de la esquina superior derecha de la Figura 4.25, los valores se trazaron uno encima del otro, combinando así los pares (CRR, $qc1$) para las diferentes densidades de almacenamiento I_D ; donde se obtuvo una curva que describe la correlación entre la resistencia a licuefacción y la resistencia en punta máxima del ensayo CPTu para el material experimental “Kali4”; en fin, la relación entre la resistencia a licuefacción y la resistencia en punta del ensayo CPTu viene dado por:

$$CRR (N_f = 10) = 0,0868 + 0,0089 qc1 - 0,0005 qc1^2, R^2 = 1,0 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

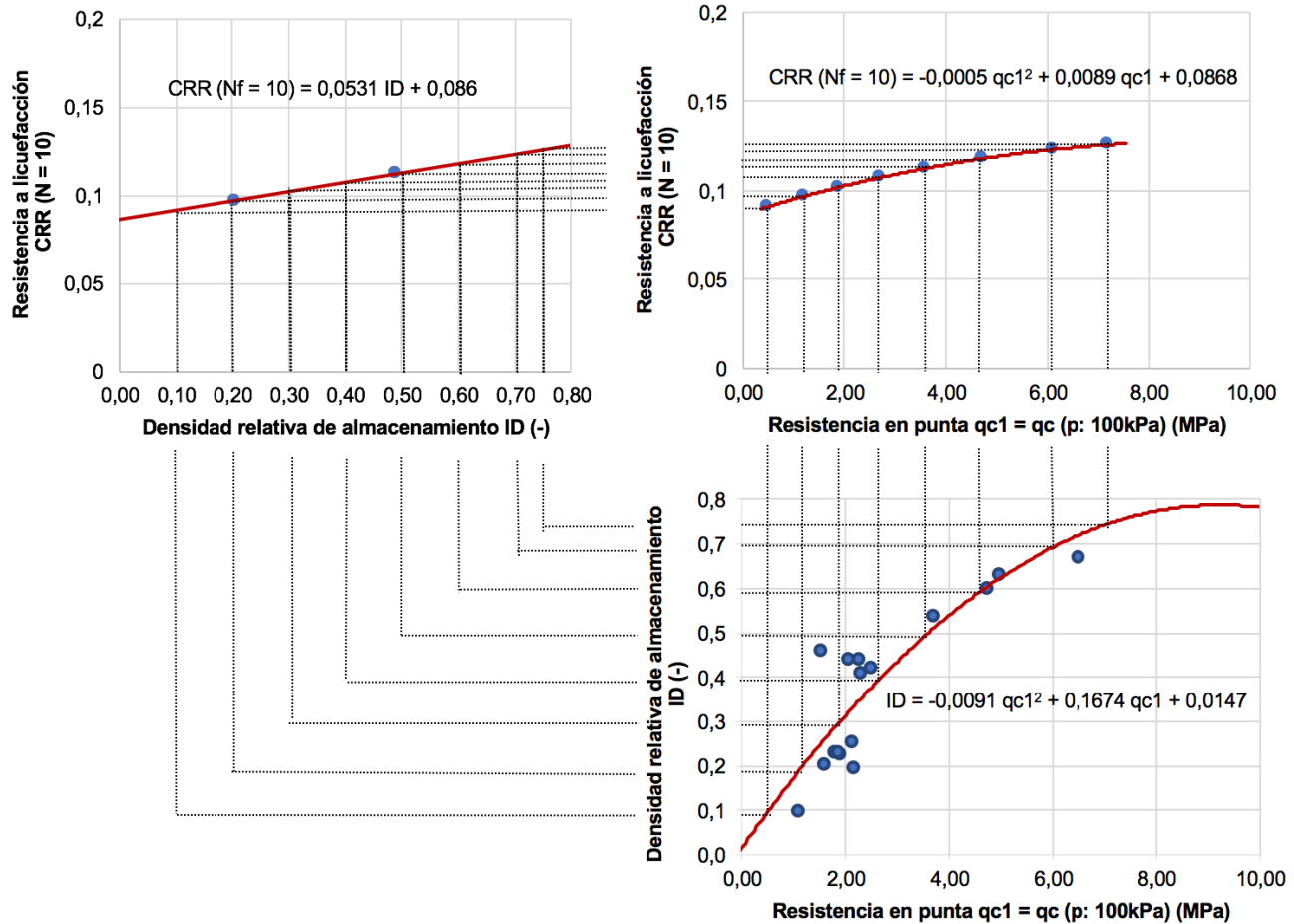


Figura 4.25. Correlación entre la resistencia a la licuefacción CRR para falla después de Nf = 10 ciclos y la resistencia en punta máxima normalizada $qc_1 = qc (p' = 100 \text{ kPa})$ para el material experimental "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.1.4 Comparación entre la correlación del material experimental y las existentes en la literatura

La Figura 4.26 compara la correlación CRR - qc_1 (Figura 4.25) con las correlaciones de trabajos previos en la CC del IBF; además, se compara la correlación experimental obtenida con las correlaciones para arenas de origen natural provenientes de la literatura. Se distingue que la correlación del material experimental es significativamente más plana que las de la literatura. En el rango aproximado de resistencias en punta de $5 \text{ MPa} \leq qc_1 \leq 7,5 \text{ MPa}$, se obtendrán

resistencias a licuefacción similares entre la nueva correlación del material experimental Kali4 y las existentes. Para resistencias en punta más pequeñas que 5 MPa, la nueva correlación para el material experimental Kali4 proporciona resistencias a licuefacción más altas que las presentes en la literatura, así mismo resistencias a licuefacción más pequeñas a partir de un $qc_1 > 7,5 \text{ MPa}$.

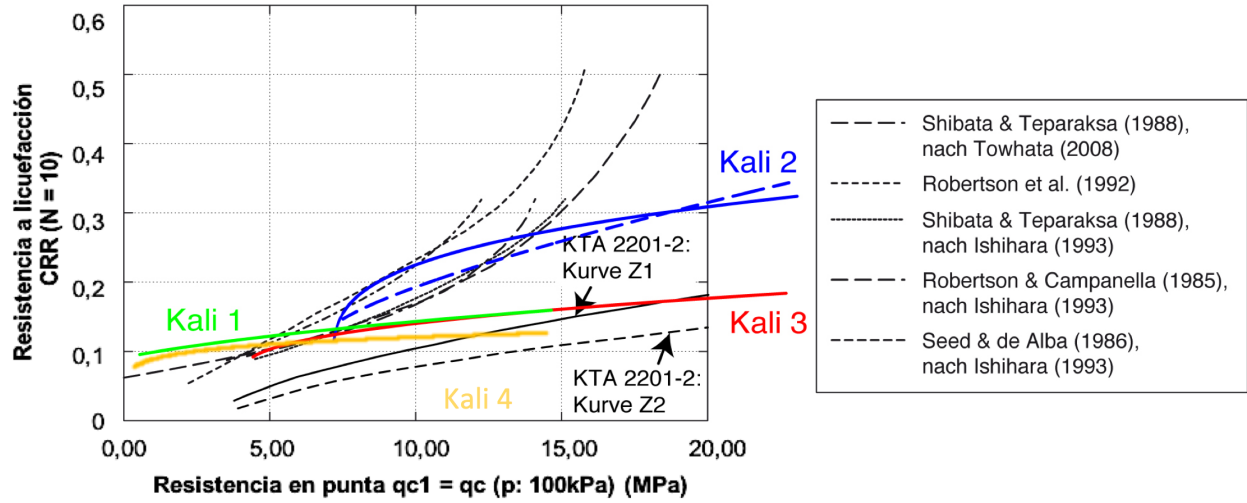


Figura 4.26. Comparación de la correlación CRR – qc1 para el material experimental Kali4 y trabajos previos con correlaciones presentes en la literatura para depósitos de arenas de origen natural. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.2 Análisis de Resultados

4.2.1 Ensayo CPTu en la cámara de calibración del IBF

De primera instancia se inspeccionan los resultados experimentales obtenidos de los 14 ensayos CPTu en la CC, el programa experimental ejecutado durante la práctica profesional se resume en la Cuadro 4.1. En los ensayos ejecutados, las densidades relativas de almacenamiento variaron en un rango aproximado de 0,2 - 0,8, asimismo la presión lateral de la CC, en un rango de 0,0 kPa a 250,0 kPa.

El Cuadro 4.1 proporciona los valores medios de la densidad de almacenamiento I_{Dm} y también el contenido de humedad derivado de todas las muestras de cada prueba. Los valores promediados de la resistencia de punta q_c y la densidad de almacenamiento I_D han sido determinados para la segunda, tercera y cuarta posición de profundidad. La muestra ubicada en la profundidad menor no se tomó en cuenta, ya que los datos de exploración suelen ser muy irregulares. Como se mencionó en el apartado de Marco Teórico y en la Metodología, el método de instalación es basado en la experiencia de investigaciones previas de cámaras de calibración y del mismo modo en la experiencia del personal del laboratorio; como era de esperarse, las pruebas muestran que generalmente tanto la resistencia en punta q_c como la fricción permanecen relativamente constantes a medida que aumenta la profundidad de la CC, lo cual sugiere que el material ha sido instalado de manera uniforme en la CC en la mayoría de los ensayos y que la metodología de instalación es adecuada en la mayoría de los casos; sin embargo, para los ensayos 8, 13 y 14, se debe reconsiderar repetirlos, ya que como se muestra en las Figuras 4.8, 4.13, 4.14 existe desviación entre datos y además en el Cuadro 4.2 se presenta un resumen de pruebas que contienen datos con desviaciones estándar de q_c incoherentes y por lo tanto, se certifica la existencia

de discontinuidad en los puntos rojos de los diagramas de q_c vs profundidad z ; esto además podría ser justificado por un cambio en la densidad relativa I_D ; de acuerdo con el Cuadro 4.2 una desviación estándar mide el grado de dispersión o variabilidad de los datos, en este caso una desviación estándar mayor de 1,0 MPa en el valor de q_c demuestra que la prueba ha sido inconsciente y sugiere que debe ser analizada para considerar una potencial repetición de la prueba.

En los primeros tres ensayos, las muestras se almacenaron con un contenido de humedad natural (contenido de humedad medido en campo) presente en las bolsas de almacenamiento (12% – 15%). Posteriormente, el contenido de humedad se controló y en la mayoría de los casos se incrementó y se volvió a mezclar con la ayuda del mezclador, esto para mantenerse en un rango aproximado de 12% - 15% como se mencionó en el apartado de metodología.

El Cuadro 4.1 muestra que el contenido medio de humedad y el porcentaje de saturación del material posteriormente disminuyó un poco con cada instalación de la muestra debido a la inevitable evaporación. El porcentaje de saturación muestra variaciones relativamente pequeñas sobre la profundidad de cada una de las pruebas (5,17% desviación estándar promedio), sin embargo, se considera que no se manipuló de la mejor forma el material de las “big bags” ya para estas pruebas las bolsas tenían un contenido de humedad diferente en cada una de las pruebas al ser manipuladas una y otra vez durante los ensayos. Lo que provocó discontinuidades en los resultados de contenido de humedad, densidad de almacenamiento y por ende diferencias en la resistencia en punta del CPTu vs la profundidad. Esta condición de diferencias en los q_c provocó que posteriormente se tuviera que

corregir la humedad nuevamente y mezclar las bolsas grandes unas con otras.

Asimismo, en el ensayo #1, después de la aplicación de la presión de 100 kPa, la muestra se dejó descansar aproximadamente durante una semana desde la instalación de la muestra hasta el sondaje (16/6/17 – 27/7/17) para examinar el efecto denominado "tixotropía" en las resistencias de q_c de arenas. Sin embargo, los resultados de este ensayo, que se enumeran como símbolos en forma de romboide color azul en la Figura 4.27; no difieren significativamente de los resultados de otros ensayos en los que se le aplicó presión estabilizadora durante poco tiempo (20 - 30 min).

La Figura 4.27 muestra la resistencia en punta q_c en función de la densidad relativa de almacenamiento I_D , este diagrama contiene solamente datos para una presión lateral de $p = 100$ kPa. Es notable que, a pesar de cierta dispersión de los datos, el comportamiento es definido por carácter polinómico de grado 2, referente al aumento de la resistencia en punta q_c con el aumento de la densidad relativa de almacenamiento I_D . La relación se puede describir mediante la Ecuación 4.4:

$$q_c(100 \text{ kPa}) = 4,46 - 22,11 I_D + 38,79 I_D^2, \quad R^2 = 0,9614 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Como se puede observar en la Figura 4.27, q_c nunca llegará a tener un valor de 0,0, ya que sin importar que la densidad relativa I_D sea 0,0 o la densidad de almacenamiento sea la mínima, los valores de q_c tienden a ser bajos, pero no nulos. Por lo tanto, para una densidad relativa baja (I_D cercana a 0,2) los datos de q_c tendieron a ser similares a datos con I_D de densidad media de aproximadamente 0,45. Según (Wichtmann, 2017) este comportamiento es normal ya que, para otras arenas anteriormente estudiadas, la resistencia en punta para densidades bajas tiende a tener un valor relativamente similar o generalmente constante.

Además, para realizar una comparación, en la Figura 4.27 también se muestran los incrementos de $q_c - I_D$ que se recomiendan en la norma DIN 4094-1 para arenas uniformes ($C_u < 3$) o mezclas de arena y grava. Ambas curvas según DIN exceden las resistencias de q_c para valores de I_D mayores a 0,3; pero para valores de densidad menores a 0,3, la curva experimental tiende a dar datos más altos de resistencia en punta que la curva para mezclas de arena y grava; esta relación justifica el hecho de no es conveniente utilizar los datos provenientes de la literatura o DIN para definir el comportamiento de depósitos sueltos de arenas; ya que no son consecuentes con depósitos del material experimental suelto "Kali4".

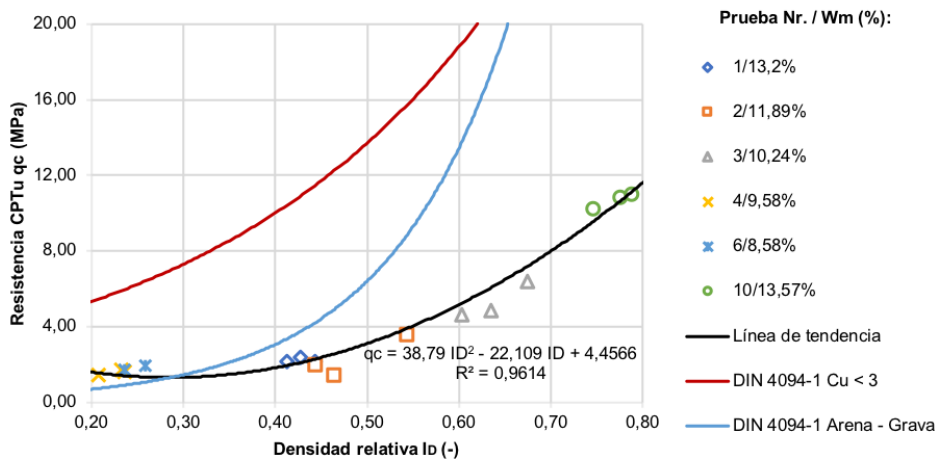


Figura 4.27. Resistencia en punta q_c en función de la densidad relativa de almacenamiento en los ensayos para una presión de 100 kPa en la CC para el material "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

CUADRO 4.1 RESUMEN DE RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO CPT_u EN LA CÁMARA DE CALIBRACIÓN DEL IBF

Prueba. Nr.	Presión (kPa)		w _m (%)	S _m (%)	I _D (-)	I _{Dm} (-)	q _c (MPa)	q _{c prom} (MPa)
	σ ₁	σ ₃						
1	σ ₁	100,00	13,20	34,33	0,440	0,424	2,241	2,33
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
2	σ ₁	100,00	11,89	30,95	0,540	0,480	3,675	2,42
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
3	σ ₁	100,00	10,24	26,57	0,671	0,634	6,494	5,39
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
4	σ ₁	100,00	9,58	24,88	0,204	0,222	1,584	1,75
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
5	σ ₁	50,00	9,12	23,72	0,494	0,461	3,618	3,15
	σ ₃	50,00						
	σ _{prom}	50,00						
6	σ ₁	100,00	8,58	22,33	0,232	0,228	1,863	2,04
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
7	σ ₁	150,00	8,37	21,80	0,545	0,528	6,338	5,71
	σ ₃	150,00						
	σ _{prom}	150,00						
8	σ ₁	200,00	14,62	37,50	0,682	0,620	8,003	5,31
	σ ₃	200,00						
	σ _{prom}	200,00						
9	σ ₁	250,00	14,60	36,38	0,658	0,603	9,283	7,77
	σ ₃	250,00						
	σ _{prom}	250,00						
10	σ ₁	100,00	13,57	34,92	0,772	0,766	10,938	10,79
	σ ₃	100,00						
	σ _{prom}	100,00						
11	σ ₁	0,00	12,84	33,10	0,629	0,576	1,611	1,26
	σ ₃	0,00						
	σ _{prom}	0,00						
12	σ ₁	75,00	12,69	32,73	0,601	0,614	2,751	2,83
	σ ₃	37,50						
	σ _{prom}	56,25						
13	σ ₁	150,00	14,81	37,95	0,469	0,611	3,676	5,24
	σ ₃	75,00						
	σ _{prom}	112,50						
14	σ ₁	225,00	14,42	37,86	0,469	0,526	10,296	6,89
	σ ₃	112,50						
	σ _{prom}	168,75						

Fuente: Cuadro elaborado en Microsoft Excel por el autor.

CUADRO 4.2. RESUMEN DE DESVIACIONES ESTÁNDAR EN LOS RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO CPT_u PARA MUESTRAS DEL MATERIAL “KALI4”

Prueba. Nr.	W instalación (%)	W _m instalación (%)	Desviación S W _m (%)	I _D (-)	I _{Dm} (-)	Desviación S I _D (-)	q _c (MPa)	q _c prom (MPa)	Desviación S q _c (MPa)
1	13,739	13,20	0,55	0,440	0,424	0,016	2,241	2,33	0,127
	13,394			0,424			2,479		
	12,653			0,409			2,284		
2	11,825	11,89	0,12	0,540	0,480	0,053	3,675	2,42	1,117
	11,999			0,440			2,068		
	12,048			0,460			1,527		
3	10,482	10,24	0,31	0,671	0,634	0,036	6,494	5,39	0,963
	10,134			0,631			4,970		
	9,855			0,600			4,713		
4	10,482	9,58	0,31	0,204	0,222	0,015	1,584	1,75	0,153
	10,134			0,232			1,773		
	9,855			0,229			1,888		
5	9,328	9,12	0,24	0,494	0,461	0,037	3,618	3,15	0,591
	8,950			0,467			3,356		
	8,873			0,421			2,489		
6	8,835	8,58	0,23	0,232	0,228	0,030	1,863	2,04	0,156
	8,398			0,255			2,118		
	8,471			0,196			2,147		
7	8,403	8,37	0,10	0,545	0,528	0,032	6,338	5,71	0,704
	8,550			0,547			5,842		
	8,368			0,491			4,948		
8	14,626	14,62	0,08	0,682	0,620	0,061	8,003	5,31	2,339
	14,621			0,618			4,136		
	14,760			0,561			3,790		
9	14,008	14,60	0,17	0,658	0,603	0,049	9,283	7,77	1,327
	14,330			0,588			7,233		
	14,066			0,564			6,798		
10	13,272	13,57	0,34	0,772	0,766	0,021	10,938	10,79	0,384
	13,721			0,784			11,087		
	13,935			0,743			10,359		
11	12,760	12,84	0,26	0,629	0,576	0,117	1,611	1,26	0,390
	12,693			0,657			1,336		
	13,174			0,441			0,841		
12	12,558	12,69	0,25	0,601	0,614	0,015	2,751	2,83	0,338
	12,675			0,610			3,204		
	13,033			0,631			2,542		
13	15,696	14,81	1,55	0,469	0,611	0,124	3,676	5,24	1,611
	15,468			0,663			6,894		
	12,908			0,700			5,140		
14	14,866	14,42	0,85	0,469	0,526	0,060	10,296	6,89	3,517
	14,614			0,588			7,110		
	13,290			0,522			3,273		

Fuente: Cuadro elaborado en Microsoft Excel por el autor.

En esta investigación también se ha propuesto estudiar el efecto de la aplicación de la presión de forma isotrópica y anisotrópica en la CC del IBF; en la Figura 4.28 se muestra una representación de la relación existente entre la resistencia en punta q_c (promedio por cada ensayo) en función de la presión promedio de confinamiento de la CC. Se utilizaron datos provenientes de distintas presiones, ya sea de comportamiento isotrópico ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) o anisotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$), con la intención de deducir si la condición anisotrópica tiene algún efecto sobre los resultados de q_c obtenidos. De acuerdo con estos resultados el efecto de la anisotropía en la CC no ha sido significativo para los ensayos en el material Kali4, así pues, se puede observar una tendencia lineal muy parecida entre valores de $q_c - p$ para datos obtenidos en condición isotrópica y anisotrópica; aunque este tema está en estudios por parte del IBF y aún hacen falta más pruebas con distintas presiones y en distintos materiales experimentales.

La Figura 4.29 muestra la relación de dependencia entre la resistencia en punta q_c y la presión isotrópica y anisotrópica p' con densidades relativas medias por profundidad, las cuales se encuentran en el rango $0,46 \leq ID \leq 0,63$. A pesar de la dispersión de los datos medidos, se puede observar un aumento significativo en la resistencia máxima q_c con la presión p' . A la Figura 4.29 se le realiza entonces un ajuste el cual se utiliza para disminuir el error producido por las diferentes densidades de almacenamiento obtenidas por

medio de una normalización dada por una densidad relativa media I_{Dm} de 0,57. Estas q_c "limpias" por densidad se representan en la Figura 4.30 en función de la presión. Una cierta variedad de datos todavía está presente, pero se ha reducido en comparación con la Figura 4.29.

Las Figuras 4.29 y 4.30 demuestran que efectivamente se da un aumento en la resistencia en punta q_c con el aumento de la presión en la CC; de acuerdo con el comportamiento descrito en las Figuras 4.29 y 4.30 aproximadamente por cada 50 kPa de presión se aumentan 2 kPa de resistencia en punta q_c . Por otra parte, en la Figura 4.30 las resistencias de q_c se corrigieron para una densidad relativa promedio de 0,57; de manera que es notable que aún existe una cierta variedad los datos de cada prueba, sin embargo, se encuentran más cercanos uno de otro y por lo tanto el error inducido por las diferencias de densidad se ha "corregido".

A diferencia de la mayoría de las pruebas, los datos provenientes del ensayo 14; no son consistentes con la corrección por densidad realizada, a causa de esto se debe repetir este ensayo como anteriormente se mencionó, ya que no se encuentra coherencia en los resultados obtenidos para esta prueba, de la misma manera la dispersión de los datos podría ser un efecto de la aplicación de presión de forma anisotrópica en la CC, por lo que se decidió que sería conveniente repetir este ensayo y comparar con los resultados obtenidos hasta ahora.

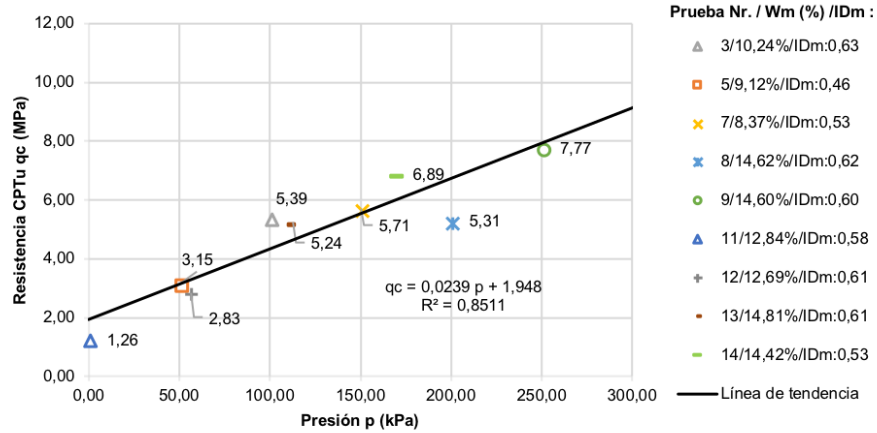


Figura 4.28. Relación de la resistencia en punta q_c en función de las presiones isotrópicas promedio (pruebas 3,5,7,8,9) y anisotrópicas promedio (pruebas 12,13,14) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

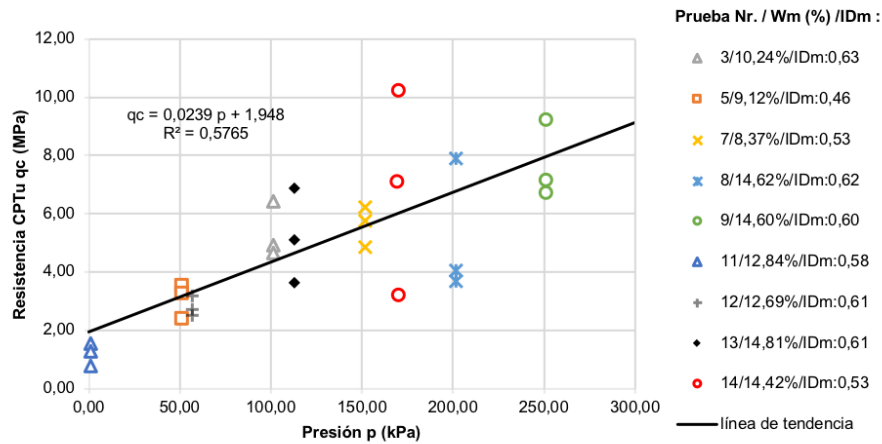


Figura 4.29. Resistencia en punta q_c en función de las presiones isotrópicas (pruebas 3,5,7,8,9) y anisotrópicas (pruebas 12,13,14) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

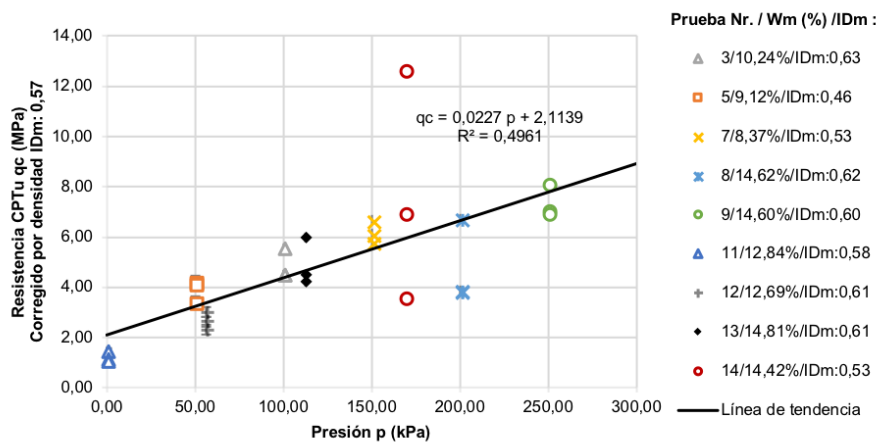


Figura 4.30. Resistencia en punta q_c corregido por una densidad $I_{Dm} = 0,57$ en función de las presiones isotrópicas (3,5,7,8,9) y anisotrópicas (12,13,14) sobre el material "Kali4". **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

En la Figura 4.31 las resistencias en punta de CPTu $q_c = q_{c1}$ 100 kPa han sido establecidas en la resistencia de sondeo de 4,563 MPa, calculada con la Ecuación 4.4 para la presión $p = 100$ kPa y la densidad de almacenamiento media $I_{Dm} = 0,57$. Los datos correspondientes a la relación de q_{c1} / q_c (100 kPa) se muestra en la Figura 4.31 en función de la presión de la CC. Se demuestra que, para una presión de aproximadamente 200 kPa, q_c (real) tiende a ser aproximadamente 1,5 veces el q_{c1} para una presión de 100 kPa; así mismo la línea de tendencia muestra que para una presión de 100 kPa la relación es 1; lo cual está en lo correcto y los datos son consecuentes con lo esperado (Kimmig, 2017).

Utilizando este diagrama, las ecuaciones para la normalización de la presión se pueden verificar y desarrollar. Para realizar la verificación de los datos, se utilizaron las funciones que describen el factor C_N , en donde la función que se agregó como una línea recta roja sólida en la Figura 4.32, la cual es más adecuada para la normalización de la presión del material experimental examinado, este factor viene descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{C_N} = 0,24418 + (1 - 0,24418) \left(\frac{p'}{100}\right)^{0,6381}$$

Ecuación 4.5

Donde se satisface la condición $1 / C_N = 1$ para $p' = 100$ kPa.

Según las Ecuaciones 3.7 y 3.8, las cuales han sido propuestas por (Shibata & Teparaksa, 1988), la relación q_{c1} / q_c (100 kPa) sería lo mismo que un factor de normalización de la presión a la inversa $1 / C_N$, del mismo modo se determinó cuál de las dos ecuaciones para la normalización de la resistencia en punta es dominante para el material experimental "kali4". Según los resultados, la ecuación polinómica de grado 2 (Ecuación 4.5) es la que mejor se ajusta al comportamiento real de los datos, ha sido nombrada como q_c / q_{c1} (100 kPa).

Una vez determinado el factor C_N se empleó y se verificó mediante la Figura 4.33, considerando que se debe satisfacer la condición $1 / C_N = 1$ para $p' = 100$ kPa.

En la Figura 4.33 se determina la relación de q_{c1} normalizado en función de la presión p de la CC; se observa un comportamiento estable en el valor de q_{c1} con el aumento de la presión; por lo que se comprueba que la Ecuación 4.5 efectivamente funciona para la normalización de q_c ; la resistencia en punta para una presión diferente de 100 kPa viene descrita por la Ecuación 4.6:

$$q_{c1} = -0,0002 p + 4,6972, R^2 = 0,00001$$

Ecuación 4.6

En fin, con la Figura 4.33 se demostró que el factor de normalización de la presión efectivamente corrige los valores de q_c para presiones diferentes a 100 kPa, esto ya que se observa un comportamiento regular en el valor de q_{c1} con el aumento de la presión; por lo que se comprueba que la Ecuación 4.5 efectivamente funciona para determinar el factor de normalización de la presión en la CC; pero a pesar de demostrar que el factor de normalización de la presión funciona, para efectos de crear la correlación, se decide utilizar los datos provenientes de una presión de 100 kPa para disminuir la varianza de los datos en la creación de la correlación entre CRR - q_{c1} (Wichtmann, 2017).

Finalmente, con los datos para una presión de 100 kPa, presentados anteriormente en la Figura 4.27, se desarrolló la Figura 4.15, en donde se relacionan la densidad relativa de almacenamiento (I_D) en función de la presión máxima de CPTu (q_{c1}); esta función se registró por medio de la siguiente ecuación:

$$I_D = 0,0147 + 0,1674 q_{c1} - 0,0091 q_{c1}^2,$$

$R^2 = 0,8527$ Ecuación 4.7

La cual se utilizará en los siguientes apartados para generar la correlación entre q_{c1} - I_D y la resistencia a licuefacción CRR- I_D .

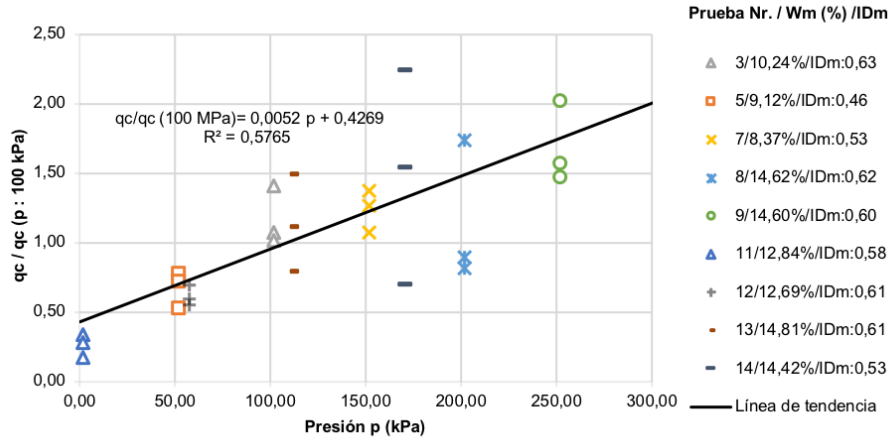


Figura 4.31. Resistencia en punta normalizada $qc / qc (p = 100 \text{ kPa})$ en función de la presión en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

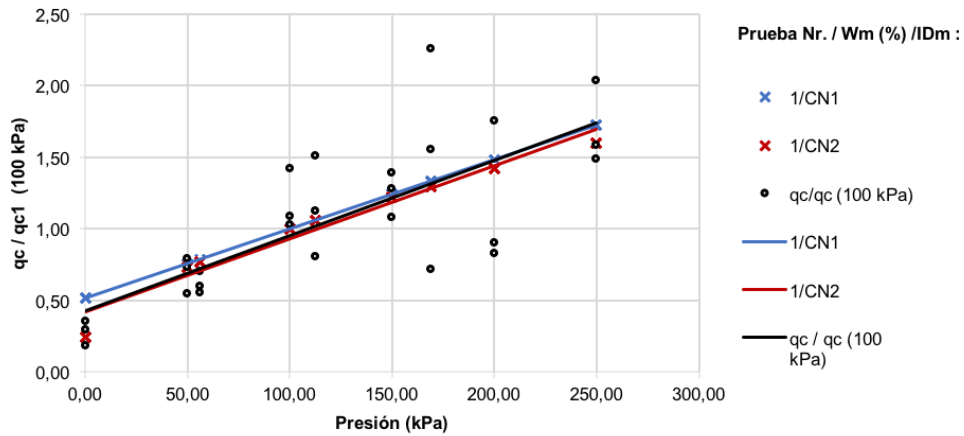


Figura 4.32. Línea de mejor ajuste para el factor de normalización CN. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

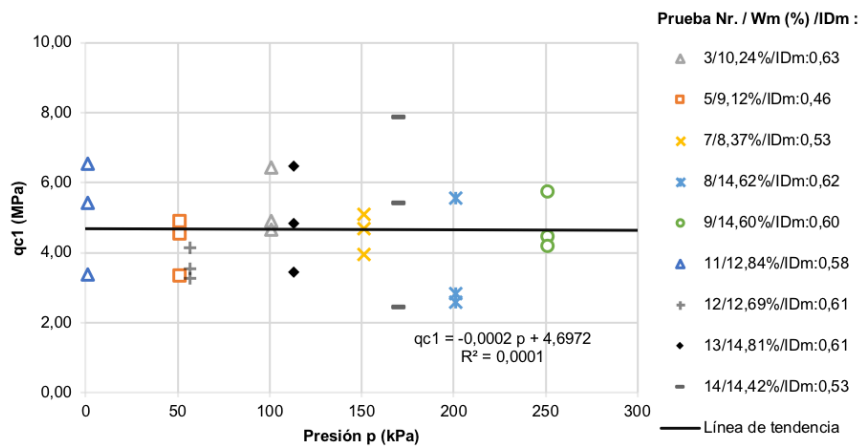


Figura 4.33. Densidad relativa de almacenamiento en función resistencia en punta qc en los ensayos en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.2.2 Ensayos triaxiales cíclicos no drenados

Los resultados de todos los ensayos individuales se pueden conocer en las Figuras 4.16 – 4.23; el Cuadro 4.3 resume el programa experimental realizado por el IBF hasta el momento de la redacción de este informe de práctica profesional.

Se probaron diferentes densidades de almacenamiento y amplitudes para cada prueba. En los ensayos triaxiales cíclicos no drenados 1 y 5, se aplicó la misma presión inicial y amplitud, aunque densidades relativas distintas, la primera con un estado suelto ($I_D = 0,12$) y en la segunda un estado denso ($I_D = 0,64$) de acuerdo con (Triantafyllidis , 2013); por otra parte en la primer prueba hicieron falta 7 ciclos de carga para alcanzar la licuefacción y en la segunda 65 ciclos. En otras palabras, los resultados de las pruebas, para determinar la resistencia a la licuefacción para la misma arena experimental (kali4), con las mismas tensiones iniciales (100 kPa) y amplitudes de esfuerzo desviador (20 kPa) están influenciados principalmente por la densidad de almacenamiento.

La Figura 4.34 muestra la relación de esfuerzos cíclicos $CSR = q^{ampl} / (2p'_0)$ en función del número de ciclos N_r hasta alcanzar el criterio de falla $|\epsilon_1| = 10\%$ para una presión inicial de 100 kPa. Ahora bien, con las mismas densidades de almacenamiento se generaron las curvas CSR - (N_r). Después, las relaciones de resistencia cíclica CRR se leyeron cuando se produce una falla de las muestras en 10 ciclos ($M_w = 7,5$). La CRR (relación de resistencia cíclica) se leyó como la CSR (Relación de esfuerzos cíclicos), que conduce a una licuefacción después de $N = 10$ ciclos. El valor de CRR se registró como una función de la densidad

relativa y según los resultados presentes en el Cuadro 4.3 y las Figuras 4.24, 4.34 se determina que a medida que aumenta la densidad relativa de almacenamiento I_D , también aumenta la resistencia a licuefacción CRR ($N = 10$); esto en una relación lineal, por lo tanto, concuerda con los resultados de la tesis de licenciatura de (Scholz, 2017) para otros materiales experimentales.

Aun así, es necesario y conveniente para el proyecto que se hagan más ensayos triaxiales cíclicos no drenados con mayor diversidad de densidades relativas, ya que para este informe de práctica profesional se contó solamente con 8 ensayos triaxiales para el material Kali4; los cuales se obtuvieron para densidades desde 0,15 a 0,64 y gracias a estas 8 pruebas se logró obtener la curva de CRR en función de la densidad relativa.

Así mismo en la Figura 4.34 los datos están relativamente dispersos de las curvas y escasamente fue posible realizar dos curvas; por lo que sería conveniente tener al menos 5 curvas (Wichtmann , 2017); por ejemplo, una curva para densidades aproximadas de 0,1 – 0,2, otra para 0,2 – 0,3, 0,3 – 0,4, 0,4 - 0,5 y así respectivamente hasta conseguir muestras densas de hasta 0,8 de densidad relativa.

Hay que hacer notar que el proyecto con el material Kali4 se encuentra en desarrollo y de acuerdo con los encargados de este proyecto (Wichtmann & Kimmig, 2017), además de realizar pruebas con más diversidad de densidades, será necesario variar la presión para analizar el comportamiento del material experimental a diferentes presiones iniciales efectivas p'_0 .

CUADRO 4.3. RESUMEN DE RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO NO DRENADO EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL “KALI4”

Prueba. Nr.	p'₀ efectivo (kPa)	w instalación (%)	Instalación		Inicio de ciclos		u₀ (kPa)	B (-)	p'₀ Real (kPa)	q ^{ampl} (kPa)	CSR: q ^{ampl} / 2p'₀	N (ε₁ = 10%)
			I _D (-)	e₀ (-)	I _D (-)	e₀ (-)						
1	100	13,64	0,12	0,81	0,22	0,78	500,00	0,99	100,09	20,00	0,0999	7
2		10,00	0,03	0,84	0,15	0,80	500,00	0,98	98,10	25,00	0,1274	2
3		9,82	0,00	0,85	0,19	0,79	500,00	0,98	98,81	15,00	0,0759	25
4		5,00	0,04	0,83	0,19	0,79	500,00	0,98	99,85	10,00	0,0920	126
5		20,00	0,60	0,67	0,64	0,66	500,00	0,97	100,19	20,00	0,0998	65
6		20,00	0,33	0,75	0,41	0,73	500,00	1,00	99,87	25,00	0,1252	4
7		20,00	0,21	0,78	0,28	0,76	500,00	1,00	99,45	15,00	0,0754	37
8		20,00	0,36	0,74	0,42	0,72	500,00	0,99	99,84	20,00	0,1002	13

Fuente: Cuadro elaborado en Microsoft Excel por el autor.

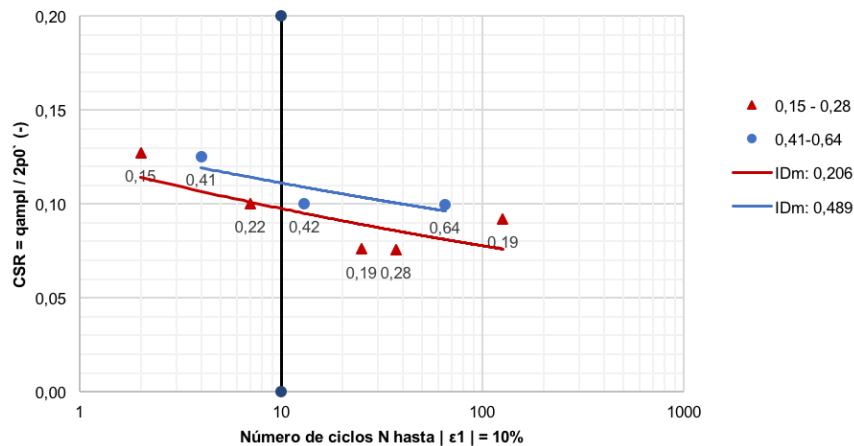


Figura 4.34. Relación de esfuerzos cíclicos CSR en función del número de ciclos para la licuefacción en el material experimental “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

4.2.3 Correlación resistencia en punta normalizada qc1 - relación de resistencia cíclica CRR

Acerca de la curva que describe la correlación para determinar el potencial de licuefacción del material experimental Kali4, presentada en el apartado de resultados como la Figura 4,24; es concluyente que este diagrama de correlación CRR - qc1 declara que la resistencia a licuefacción aumenta al aumentar la resistencia en punta CPTu. También debe tenerse en cuenta que las correlaciones de la literatura suelen tener en cuenta la tensión efectiva vertical $\sigma_v'₀$ en lugar de la presión efectiva media

p'₀. Entonces la relación de amplitud se define como $CRR = \tau^{ampl} / \sigma_v'₀ = q^{ampl} / (2p'₀)$ y la resistencia máxima está relacionada con una tensión vertical de $\sigma_v'₀ = 100$ kPa para obtener qc1.

Hay que tener en cuenta que, si la correlación se usa más adelante, las resistencias de CPTu deben referenciarse como valores de entrada a la presión efectiva media de 100 kPa (valor de entrada relacionado con la presión qc1 normalizada).

4.2.4 Comparación entre la correlación del material experimental y las existentes en la literatura

La Figura 4.35 compara los resultados provenientes de materiales experimentales ensayados en la CC del IBF. El diagrama de correlación generado para la comparación entre los materiales experimentales y las correlaciones provenientes de la literatura representa la resistencia a licuefacción como una función de la resistencia en punta. Las relaciones CRR - qc1 obtenidas para los cuatro materiales revelan que la correlación depende significativamente del material experimental.

Con la misma resistencia en punta qc1, para el material "Kali2" la resistencia a licuefacción fue significativamente mayor, los materiales experimentales "Kali1" y "Kali3" presentan resistencias a licuefacción CRR similares; mientras que la resistencia a licuefacción del material "Kali4" es menor que todas las anteriores. Según la tesis de licenciatura propuesta por (Scholz, 2017), este aumento en la resistencia del material Kali2 podría deberse al bajo nivel de finos y a la curva granulométrica con pendiente alta.

Con respecto a la diferencia granulométrica presente entre los cuatro materiales experimentales, mostrado en la Figura 2.7 y el Cuadro 2.3; y en relación con las resistencias en punta qc para los cuatro materiales presentados en la Figura 4.35, se identifica que la resistencia en punta disminuye con el aumento del contenido de finos, así que al material "Kali4" se le relaciona con las menores resistencias en punta.

Además, siendo consecuente con el resultado de la correlación para la resistencia a licuefacción para el material Kali4, los resultados indican que también un alto nivel de grano fino da como resultado una baja resistencia a licuefacción como se muestra en la Figura 4.35; determinando así que el material Kali4 tiene resistencias a la penetración de cono y a licuefacción menores por sus propiedades granulométricas.

En la Figura 4.26 presente en el apartado de resultados se muestra la comparación de las correlaciones para los cuatro materiales experimentales estudiados por el IBF con correlaciones para suelos de origen natural, provenientes de la literatura.

Este diagrama muestra que, en la región de bajas densidades de almacenamiento y bajas resistencias en punta existe una buena similitud. Sin embargo, para mayores densidades de almacenamiento y, por lo tanto, mayores resistencias en punta, las curvas de correlación para los materiales experimentales son más planas que las referenciadas de la literatura. En otras palabras, la resistencia a licuefacción de los materiales experimentales en esta área es menor de lo que habrían predicho las curvas de la literatura, verificando así la suposición propuesta por el personal del IBF para la realización del proyecto (Wichtmann & Kimmig, 2017).

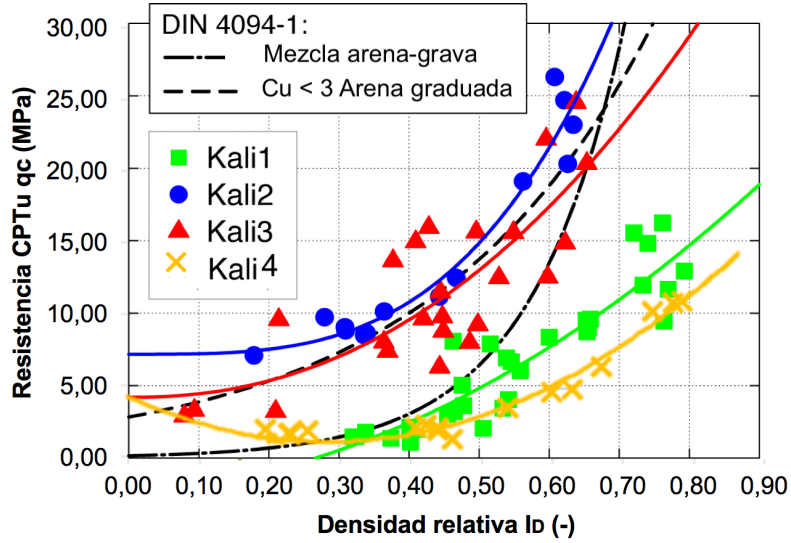


Figura 4.35. Comparación de resultados provenientes de materiales experimentales en la cámara de calibración del IBF. **Fuente:** Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se logró determinar que existe un aumento en la resistencia en punta q_c con el aumento de la densidad relativa de almacenamiento I_D y el aumento de la presión en la CC. Ambas dependencias fueron descritas por medio de ecuaciones.
- Se puede concluir que los efectos del “tixotropía” en las pruebas CPTu en la CC, no tienen una importancia significativa.
- Con este proyecto se confirma que los incrementos de $q_c - I_D$ que se recomiendan en la norma DIN 4094-1 para arenas uniformes ($C_u < 3$) o mezclas de arena y grava, a partir de $I_D = 0,3$ exceden las resistencias en punta q_c para el material experimental Kali4.
- El efecto de la anisotropía en la CC no ha sido significativo en los ensayos en el material Kali4.
- El factor de normalización de la presión (C_N) efectivamente corrige los valores de q_c para presiones diferentes a 100 kPa.
- De acuerdo con los ensayos triaxiales cíclicos no drenados, la resistencia a licuefacción está influenciada principalmente por la densidad de almacenamiento I_D ; por lo tanto, a medida que aumenta la densidad relativa de almacenamiento I_D , también aumenta la resistencia a licuefacción CRR ($N_f = 10$).
- Según el diagrama de correlación CRR - q_{c1} para el material experimental Kali4, la resistencia a licuefacción aumenta al aumentar la resistencia en punta CPTu.
- Con este informe de proyecto de graduación se delimitó que la correlación elaborada depende significativamente del material experimental, donde la resistencia en punta del ensayo CPTu disminuye con el aumento del contenido de finos; por lo tanto, al material experimental “Kali4” se le relaciona con menores resistencias en punta.
- Los resultados indican que también un alto nivel de grano fino da como resultado una baja resistencia a la licuefacción; determinando así que el material Kali4 tiene resistencias a la penetración de cono y a licuefacción menores que otros materiales experimentales estudiados anteriormente, esto por sus propiedades granulométricas.
- Según la comparación de las correlaciones para los cuatro materiales experimentales estudiados por el IBF con correlaciones para suelos de origen natural, provenientes de la literatura, se determina que en la región de bajas densidades de almacenamiento y bajas resistencias en punta una buena similitud.
- Ahora bien, para densidades de almacenamiento densas y, por lo tanto, mayores resistencias en punta, las curvas de correlación para los materiales experimentales son más planas que las referenciadas, provenientes de la literatura. En otras palabras, la resistencia a licuefacción de los materiales experimentales en esta área es menor de lo que habrían predicho las curvas de la literatura (Shibata y teparaksa (1988), Robertson y otros (1992), Ishihara (1993), Seed y Alba (1986)).
- La correlación realizada para el material Kali4 no es recomendable utilizarla para otros depósitos de suelos sueltos que no sean los materiales experimentales para la cual ha sido creada.

5.2 Recomendaciones

- Es importante el control de humedad de las muestras, por lo que se recomienda el uso de otro tipo de almacenamiento de la muestra experimental, ya que la pérdida de humedad en los ensayos ha sido significativa.
- Sería satisfactorio para la metodología del ensayo CPTu en cámaras de calibración, realizar una normativa referente al ensayo CPTu para poder realizar verificaciones con otras investigaciones.
- Sería recomendable realizar mediciones de velocidad de onda cortante V_s en la cámara de calibración y así crear correlaciones con estos resultados para la obtención de la densidad del material instalados en la CC.
- Se recomienda realizar algunas pruebas en la CC con un grado de saturación mayor, para analizar la presión de poros con el CPTu.
- Se recomienda que se realicen los ensayos 8, 14 y 13 de la prueba CPTu ya que los resultados no concuerdan con la tendencia general y así poder corregir los errores provenientes de estas pruebas.
- Se recomienda el estudio detallado del estado de anisotropía en la CC, ya que aún no se ha realizado variedad de pruebas, además verificar algunas de las pruebas realizadas como por ejemplo el ensayo CPTu 14.
- Para futuros proyectos, también se podría dar uso de los resultados provenientes de la relación de fricción en el CPTu en la CC.
- Cuando se determine que un depósito de arena es susceptible a licuefacción, es necesario aplicar técnicas de drenaje y densificación de suelos, por ejemplo: explosiones controladas, vibro compactación.
- Es necesario y conveniente para el proyecto que se elaboren más ensayos triaxiales cíclicos no drenados con diversidad de densidades relativas, ya que para este informe de práctica profesional solamente se contó con 8 ensayos triaxiales para el material Kali4.
- No es posible aplicar directamente los resultados de este proyecto en Costa Rica; primeramente, porque en el país no se realizan proyectos de minería a cielo abierto; además los materiales de las correlaciones realizadas (Kali4) y los suelos en Costa Rica difieren en aspectos como la mineralogía (criterios geológicos), la granulometría y la forma de partícula (criterios de composición); los cuales influyen sobre la susceptibilidad a la licuefacción.
- Recomiendo adquirir este tipo de equipo para la investigación de depósitos sueltos de materiales en las zonas más susceptibles a licuefacción en Costa Rica.

Apéndices y Anexos

6.1 Apéndices

Apéndice 1. Programación de ensayos CPTu realizados.

RWE-Projekt Kalibrationsversuche				Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik Karlsruher Institut für Technologie (KIT)				
Versuch	Datum Sondierung	Material	Wdh.	Einbau- lagerungsdichte	Ausbau- lagerungsdi	Vertikal- spannung	Horizontal- spannung	Mittlerer Druck
Lfd.-Nr.				$l_{b0,Soll}$ [-]	$l_{b0,Ist}$ [-]	σ_v [kPa]	σ_h [kPa]	p [kPa]
1		Kali 1	X	0,5		300	150	200
2		Kali 1	X	0,5		75	37,5	50
3		Kali 1		0,5		225	112,5	150
4		Kali 1		0,5		0	0	0
5		Kali 2		0,5		250	250	250
6		Kali 2		0,5		150	150	150
7		Kali 2		0,5		0	0	0
8		Kali 2	X	0,5		300	150	200
9		Kali 2		0,5		225	112,5	150
10		Kali 3	X	0,5		150	75	100
11		Kali 3		0,5		0	0	0
12		Kali 3		0,5		25	25	25
13		Kali 3		0,5		150	150	150
14		Kali 3		0,5		250	250	250
15		Kali 3		0,5		225	112,5	150
Fecha: Estado al día 4/11/2017 Orden:								
Einbau.								
16	-	Kali 4	X	0,0	-	100	100	100
17	27/6/17	Kali 4	✓	0,2	1	100	100	100
18	30/6/17	Kali 4	✓	0,4	2	100	100	100
19	17/7/17	Kali 4	✓	0,6	3	100	100	100
20	25/7/17	Kali 4	✓	0,8	4	100	100	100
21	3/9/17	Kali 4	✓	1,0	10	100	100	100
22	14/9/17	Kali 4	✓	0,5	11	0	0	0
23	31/7/17	Kali 4	✓	0,5	5	50	50	50
24	16/8/17	Kali 4	✓	0,5	7	150	150	150
25	24/8/17	Kali 4	✓	0,5	8	200	200	200
26	30/8/17	Kali 4	✓	0,5	9	250	250	250
27	-	Kali 4	X	0,5	-	300	300	300
28	19/9/17	Kali 4	✓	0,5	12	75	37,5	50
29	21/9/17	Kali 4	✓	0,5	13	150	75	100
30	26/9/17	Kali 4	✓	0,5	14	225	112,5	150
31	8/8/17	Kali 4	✓	0,5	6	100	100	100
32	-	Kali 4	X	0,5		300	150	200

Stand: 08.08.2017
Ivo Kimmig

Fuente: Realizado en reunión en el IBF por Ivo Kimmig y Sebastián Rodríguez.


Apéndice 2. Documento empleado por el personal de laboratorio para la recolección de datos y registro de trabajos complementarias al CPTu en la cámara de calibración.

Kalibrationszellen-Einbau

Datum: Mo., 03. Sept. 2017 Versuch: 10; 1.0 / 100 bar / kPa (dicht)

Einbaumasse: 3466 kg - inkl. Zelle + Deckel
 Uhrzeit: 77:45 Uhr (Sockel)

Lage-Nr.	Masse	IST-Tiefe (OK)	Lage-Nr.	Masse	IST-Tiefe (OK)
1	87,0 kg	146,0 cm	26		
2	"	139,0 cm	27		
3	"	131,5 cm	28		
4	"	125,0 cm	29		
5	"	118,5 cm	30		
6	"	111,0 cm	31		
7	"	104,5 cm	32		
8	"	97,5 cm	33		
9	"	90,0 cm	34		
10	"	84,0 cm	35		
11	"	77,5 cm	36		
12	"	70,0 cm	37		
13	"	64,0 cm	38		
14*1	"	57,0 cm	39		
15	"	50,0 cm	40		
16	"	43,0 cm	41		
17	"	36,5 cm	42		
18	"	30,0 cm	43		
19	"	23,0 cm	44		
20	"	16,0 cm	45		
21	"	9,5 cm	46		
22	"	2,0 cm	47		
23	<u>29,0-95</u>	<u>0,0 cm</u>	48		
24	<u>19,5</u>		49		
25			50		

Zuständige: Sebastian R. KobilD. 
 * 1 Big Bag-Wechsel
 Karlsruher Institut für Technologie

Parameter Sand	
Korndichte	ρ_s 2,622 [g/cm ³]
Trockendichte bei lockerster Lagerung	$\rho_{d,min}$ 1,283 [g/cm ³]
Trockendichte bei dichtester Lagerung	$\rho_{d,max}$ 1,698 [g/cm ³]
Porenzahl bei lockerster Lagerung	e_{max} 1,044 [-]
Porenzahl bei dichtester Lagerung	e_{min} 0,544 [-]

Schätzung!

Eingabewerte	
Durchmesser der Probe	d 926,0 [mm]
Gesamthöhe der Probe	h 1523,0 [mm]
Angestrebte relative Lagerungsdichte	I_{p0} 0,9 [-]
Wassergehalt des feuchten Materials	w 13,7 [%]
Anzahl der Lagen	n 24 [-]
Grad der Unterverdichtung	U 0 [%]

0,940

Abgeleitete Werte	
Höhe je Lage	h_i 63,4583333 [mm]
Volumen der Probe	V 1025679,70 [cm ³]
Porenzahl	e_0 0,574 [-]
Trockendichte	ρ_d 1,666 [g/cm ³]
Sättigungsgrad	S_r 62,4 [%]
Trockengewicht gesamt	m_d 1708447,2 [g]
Feuchtgewicht gesamt	m_f 1941851,9 [g]
Feuchtgewicht je Lage	m_h 80910,49 [g]

in kg -> 80,91

solite zwischen 20 und 70 % liegen

in kg ->	1708,4472	in t ->	1,708
in kg ->	1941,85185	in t ->	1,942
in kg ->	80,9104939	in t ->	0,081

Lage Nr. n	Unter- verdichtung Lage n [%]	$h_i (n-1)$ [mm]	$h_i (1+U_i/100)$ [mm]	Gesamthöhe Probe bis Lage n h_n [mm]	$h_n - h_{n-1}$ [mm]	h_n ohne Unter- verdichtung [mm]	Differenz zu h_n ohne Unter- verdichtung [mm]
1	0,00	0,00	63,46	63,46	63,46	63,45833333	0,00
2	0,00	63,46	63,46	126,92	63,46	126,9166667	0,00
3	0,00	126,92	63,46	190,38	63,46	190,375	0,00
4	0,00	190,38	63,46	253,83	63,46	253,8333333	0,00
5	0,00	253,83	63,46	317,29	63,46	317,2916667	0,00
6	0,00	317,29	63,46	380,75	63,46	380,75	0,00
7	0,00	380,75	63,46	444,21	63,46	444,2083333	0,00
8	0,00	444,21	63,46	507,67	63,46	507,6666667	0,00
9	0,00	507,67	63,46	571,13	63,46	571,125	0,00
10	0,00	571,13	63,46	634,58	63,46	634,5833333	0,00
11	0,00	634,58	63,46	698,04	63,46	698,0416667	0,00
12	0,00	698,04	63,46	761,50	63,46	761,5	0,00
13	0,00	761,50	63,46	824,96	63,46	824,9583333	0,00
14	0,00	824,96	63,46	888,42	63,46	888,4166667	0,00
15	0,00	888,42	63,46	951,88	63,46	951,875	0,00
16	0,00	951,88	63,46	1015,33	63,46	1015,333333	0,00
17	0,00	1015,33	63,46	1078,79	63,46	1078,791667	0,00
18	0,00	1078,79	63,46	1142,25	63,46	1142,25	0,00
19	0,00	1142,25	63,46	1205,71	63,46	1205,708333	0,00
20	0,00	1205,71	63,46	1269,17	63,46	1269,166667	0,00
21	0,00	1269,17	63,46	1332,63	63,46	1332,625	0,00
22	0,00	1332,63	63,46	1396,08	63,46	1396,083333	0,00
23	0,00	1396,08	63,46	1459,54	63,46	1459,541667	0,00
24	0,00	1459,54	63,46	1523,00	63,46	1523	0,00

Tiefenmessung nach Einstampfung:

1459,54	in cm
1396,08	146,0
1332,63	139,6
1269,17	133,3
1205,71	126,9
1142,25	120,6
1078,79	114,2
1015,33	107,9
951,88	101,5
888,42	95,2
824,96	88,8
761,50	82,5
698,04	76,2
634,58	69,8
571,13	63,5
507,67	57,1
444,21	50,8
380,75	44,4
317,29	38,1
253,83	31,7
190,38	25,4
126,92	19,0
63,46	12,7
0,00	6,3
0,00	0,0

in mm -> 1523,00
in cm -> 152,3
in m -> 1,52

Lagehöhe in cm: 6,35

Kalibrationszellen-Abbau

Fotographie-Stellung (OK)



Ausbau-Datum: 8. Sept. 2017

Ausbau-Masse: 3462 kg 5. Sept. 2017
 inkl.: Zelle + Deckel 15:20
(Sockel)

Versuch: 10; 1,0 / 100 bar / kPa

1. Lage - <u>14,0</u> cm			
			SOLL: 12,0 cm
Proben-Nr.	Korrekturen	Risse	Bemerkungen
Zyl. # <u>1</u>	<u>1x</u>	<u>vereinzelt</u>	
Zyl. # <u>2</u>	<u>1x</u>	<u>vereinzelt</u>	
Zyl. # <u>5</u>	<u>2x</u>	<u>vereinzelt</u>	

2. Lage - <u>38,0</u> cm			
			SOLL: 37,5 cm
Proben-Nr.	Korrekturen	Risse	Bemerkungen
Zyl. # <u>1</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	
Zyl. # <u>2</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	
Zyl. # <u>5</u>	<u>2x</u>	<u>-</u>	

3. Lage - <u>64,0</u> cm			
			SOLL: 63,5 cm
Proben-Nr.	Korrekturen	Risse	Bemerkungen
Zyl. # <u>1</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	
Zyl. # <u>2</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	
Zyl. # <u>5</u>	<u>2x</u>	<u>-</u>	

4. Lage - <u>91,5</u> cm			
			SOLL: 91,0 cm
Proben-Nr.	Korrekturen	Risse	Bemerkungen
Zyl. # <u>1</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	
Zyl. # <u>2</u>	<u>1x</u>	<u>-</u>	



Zuständige: Praktikant: Sebastian R.
Laborant: Nabil D.



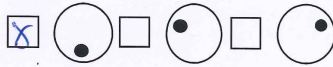
Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	14cm	Ausgeführt:	Sebastian
Bodenart:		Datum:	8/9/17
		Datum Ausbau:	8/9/17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 1	Tara Nr.	167
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	209,83 g
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	808,79 g
Volumen $V_{pr} = A_{pr} \cdot h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	747,6 g
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4585,4 g
Masse Eimer m_B [g]	191,89 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_p$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_p$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	14,0 cm	Ausgeführt:	Sebastian
Bodenart:		Datum:	8/19/17
		Datum Ausbau:	8/19/17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: Z	Tara Nr.	371
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	353,26 g
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	806,2 g
Volumen $V_{pr} = A_{pr} \cdot h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	805,6
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4577,8 g
Masse Eimer m_B [g]	194,0 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_p$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_p$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
 Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

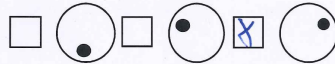
Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	14,0	Ausgeführt:	Sebastian
Bodenart:		Datum:	8/9/17
		Datum Ausbau:	8/9/17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 5	Tara Nr.	391
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	360,87 g
Querschnitt $A_{Pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	881,5 g
Volumen $V_{Pr} = A_{Pr} \cdot h_{Pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	820,3
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4678,8 g
Masse Eimer m_B [g]	199,7 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

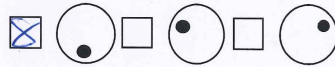
Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	38cm	Ausgeführt:	Sebastian
Bodenart:		Datum:	8/9/13
		Datum Ausbau:	8/9/17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 1	Tara Nr.	397
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	357,95 g
Querschnitt $A_{Pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	951,8 g
Volumen $V_{Pr} = A_{Pr} \cdot h_{Pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	882,2
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4551,9 g
Masse Eimer m_B [g]	191,7 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
 Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	38 cm	Ausgeführt:	Sobest
Bodenart:		Datum:	8.9.17
		Datum Ausbau:	8.9.17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 2	Tara Nr.	147
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	239,23 g
Querschnitt $A_{Pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	739,5 g
Volumen $V_{Pr} = A_{Pr} \cdot h_{Pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	680,7
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4634,7 g
Masse Eimer m_B [g]	191,5 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

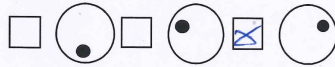
Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	38 cm	Ausgeführt:	Sebast
Bodenart:		Datum:	8/19/17
		Datum Ausbau:	8/19/17

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 5	Tara Nr.	159
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	233,56 g
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	755,10 g
Volumen $V_{pr} = A_{pr} \cdot h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	634,2
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4640,5 g
Masse Eimer m_B [g]	188,14 g
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_p$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_p$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	64,0 cm	Ausgeführt:	Daniel
Bodenart:		Datum:	08.09.2017
		Datum Ausbau:	08.09.2017

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 1	Tara Nr.	180
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	246,11
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	809,7
Volumen $V_{pr} = A_{pr} \cdot h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	741,5
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	194,4
Masse Eimer m_B [g]	4653,5
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_p$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_p$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	54,0 cm	Ausgeführt:	
Bodenart:		Datum:	08.09.2017
		Datum Ausbau:	08.09.2017

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes		
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 2	Tara Nr.	88	
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	189,36	
Querschnitt $A_{Pr} = d_s^2 * \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	713,1	
Volumen $V_{Pr} = A_{Pr} * h_{Pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	650,1	
		$m_w = B - C$ [g]		
		$m_d = C - A$ [g]		
		$w = m_w / m_d * 100$ [%]		
		Mittelwert w_M [%]		



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4574,6
Masse Eimer m_B [g]	191,8
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
 Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	64,0 cm	Ausgeführt:	Demiral
Bodenart:		Datum:	08.09.2017
		Datum Ausbau:	08.09.2017

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 5	Tara Nr.	451
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	334,5g
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 * \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	915,4
Volumen $V_{pr} = A_{pr} * h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	845,3
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d * 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4708,3
Masse Eimer m_B [g]	187,6
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
 Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	91,50m	Ausgeführt:	D. Enitel
Bodenart:		Datum:	08.09.2017
		Datum Ausbau:	08.09.2017

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: ✓	Tara Nr.	184
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	200,13
Querschnitt $A_{pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	711,5
Volumen $V_{pr} = A_{pr} \cdot h_{pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	648,6
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	



3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4517,4
Masse Eimer m_B [g]	192,1
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
 Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

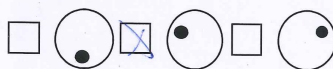
Bestimmung der Dichte des Bodens

DIN 18125-1

Ausmessen des Probekörpers - Laborversuch DIN 18125 - LA

Bauvorhaben:	RWE / Forschung	Labor Nr.:	RWE 2017 - Kali.#4 - MP1+2+3+6
Bohrloch / Schürfe:	Kalibrierzelle	Sachbearbeiter:	Kimmig / Wichtmann
Tiefe [m]:	91,5	Ausgeführt:	
Bodenart:		Datum:	
		Datum Ausbau:	

1. Bestimmung des Volumens		2. Bestimmung des Wassergehaltes	
Durchmesser Stutzen d_s [mm]	Zyl. #: 2	Tara Nr.	90
Höhe Stutzen h_s [mm]		A = m_B [g]	184,99
Querschnitt $A_{Pr} = d_s^2 \cdot \pi / 4$ [cm ²]		B = $m + m_B$ [g]	731,0
Volumen $V_{Pr} = A_{Pr} \cdot h_{Pr}$ [cm ³]		C = $m_d + m_B$ [g]	664,6
		$m_w = B - C$ [g]	
		$m_d = C - A$ [g]	
		$w = m_w / m_d \cdot 100$ [%]	
		Mittelwert w_M [%]	

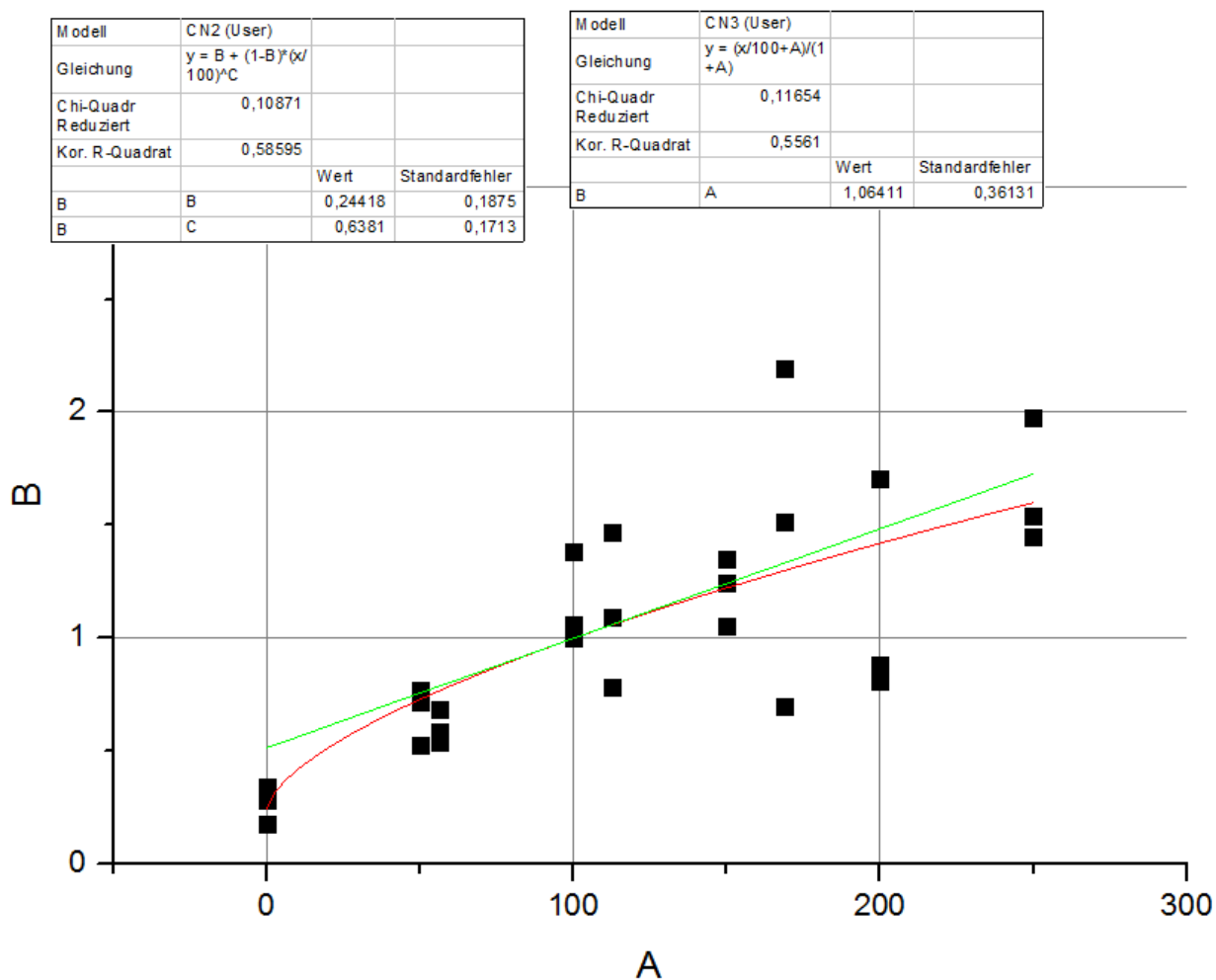


3. Bestimmung der Dichte	
Masse Eimer mit Probe $m + m_B$ [g]	4677,5
Masse Eimer m_B [g]	191,8
Masse Probe m [g]	
Trockenmasse $m_d = m / (1 + w_M / 100)$ [g]	
Dichte $\rho = m / V_P$ [g/cm ³]	
Trockendichte $\rho_d = m_d / V_P$ [g/cm ³]	

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Universitätsbereich
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)

Fuente: Hojas de registro de datos en el IBF para los trabajos con la CC.

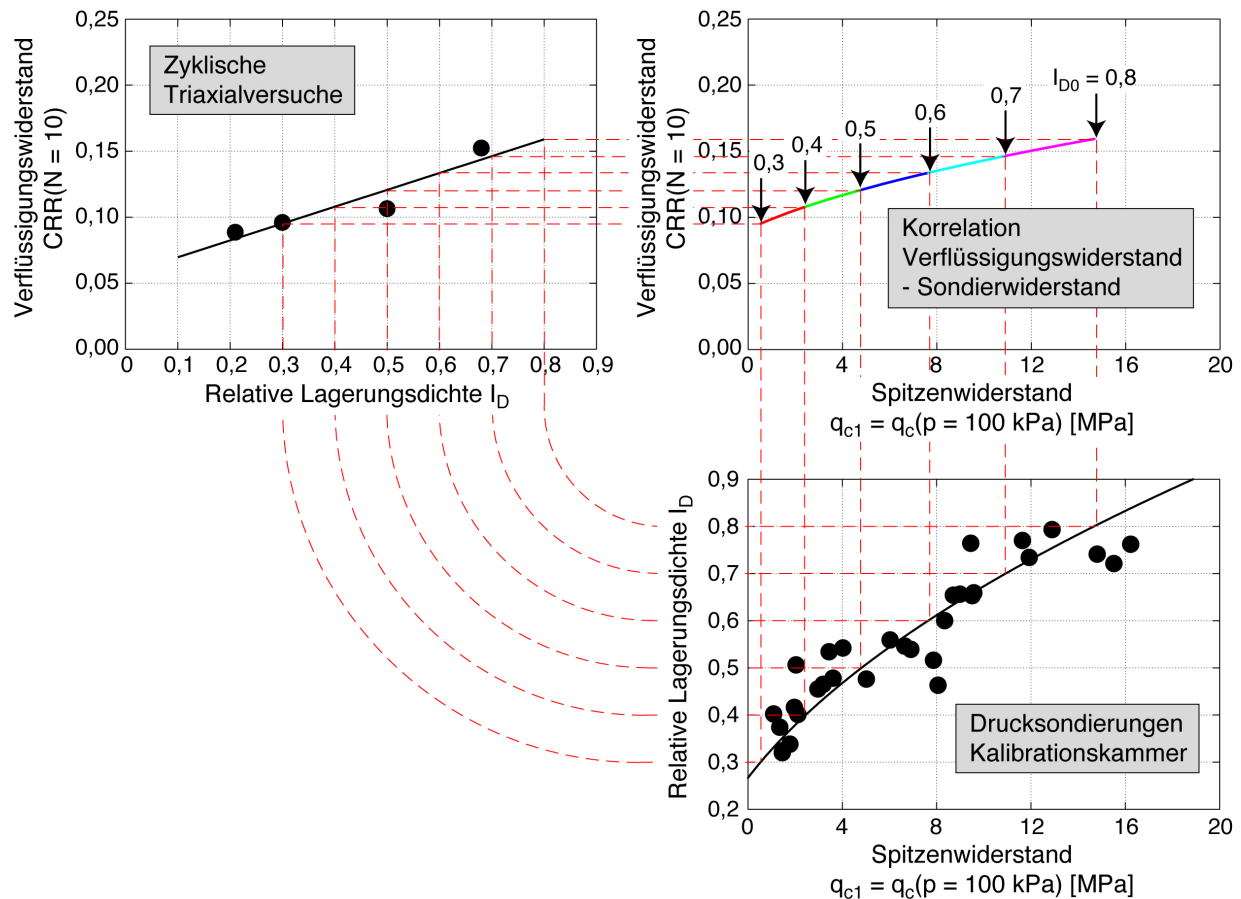
Apéndice 3. Curva de mejor ajuste al comportamiento de la resistencia en punta qc en función de la presión p.



Fuente: Realizado en reunión en el IBF por Ivo Kimmig y Sebastián Rodríguez.

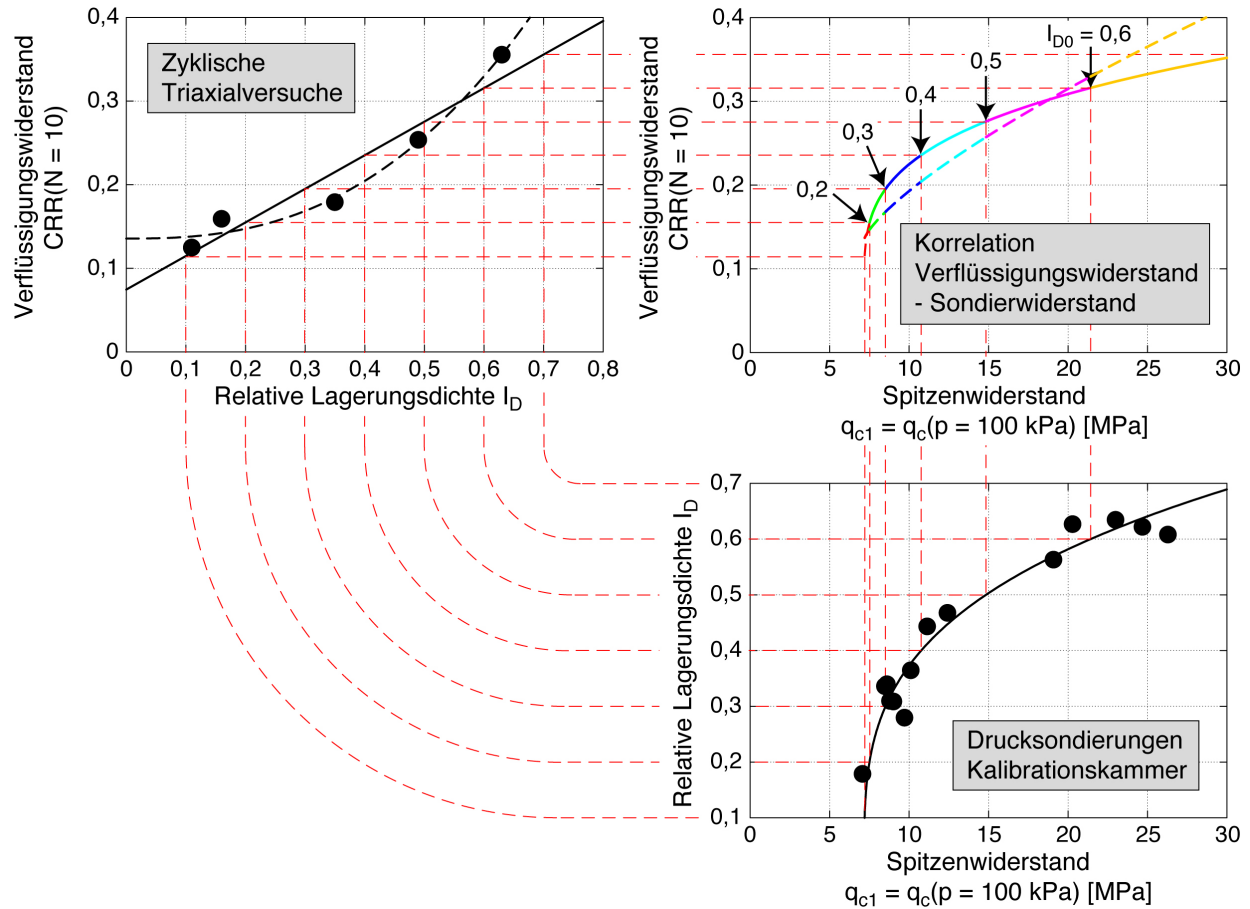
6.2 Anexos

Anexo 1. Correlación obtenida para el material experimental “Kali1”



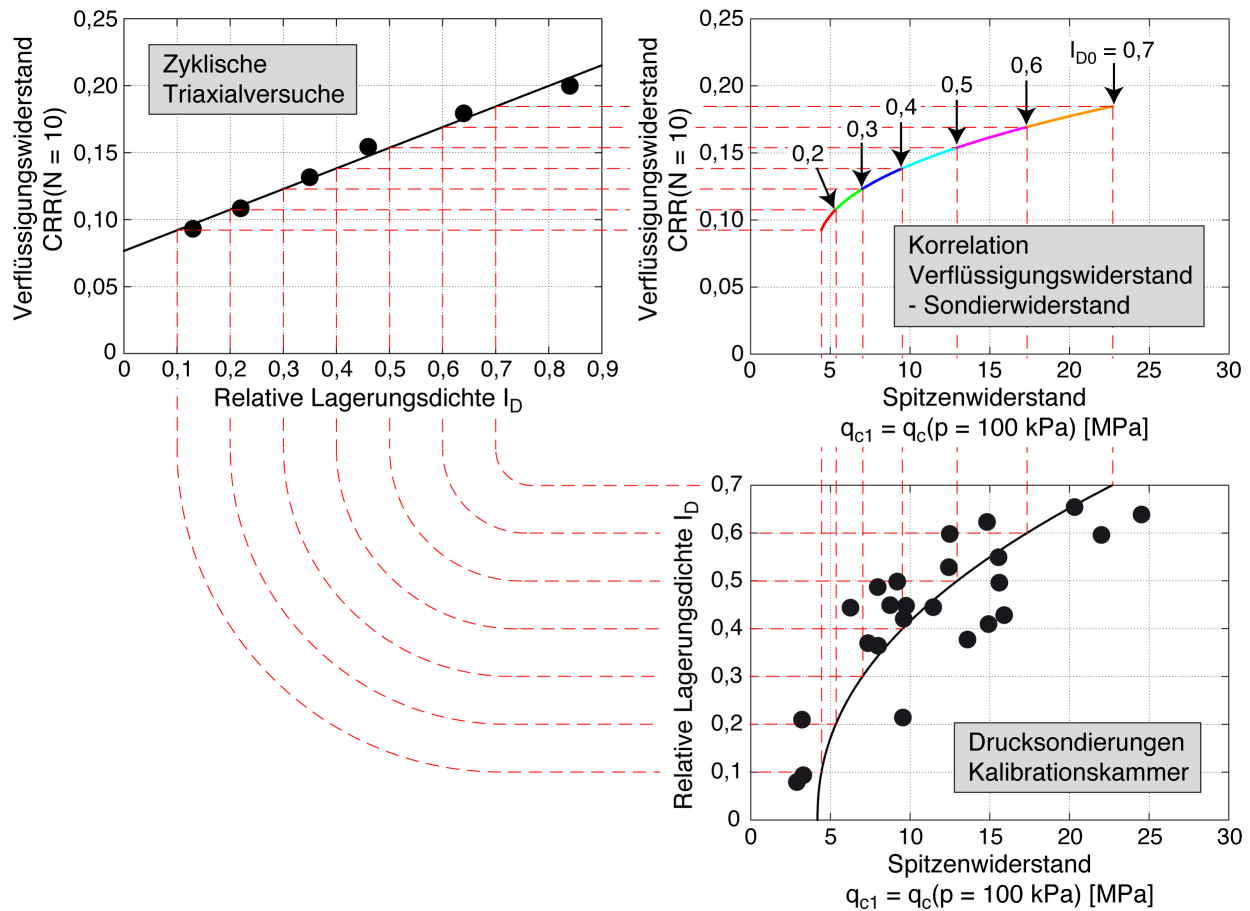
Fuente: Tomado de “Aufstellung einer Korrelation zwischen dem Spitzendruck aus Drucksondierungen und dem Verflüssigungswiderstand eines Tagebau-Kippenbodens - Vergleich von Drucksondierungen in der Kalibrationskammer mit undranierten zyklischen Triaxialversuchen” por T. Wichtmann y Th. Triantafyllidis.

Anexo 2. Correlación obtenida para el material experimental “Kali2”



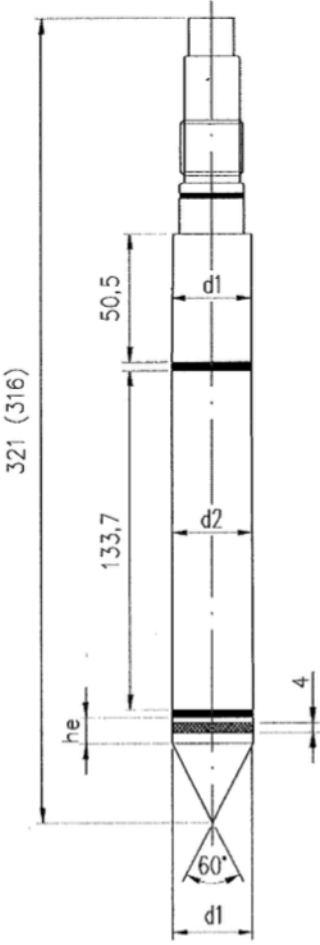
Fuente: Tomado de “Entwicklung von Korrelationen zur Ermittlung des Verflüssigungswiderstandes von Sand in Tagebau-Restseeböschungen auf der Basis von Drucksondierungen” por Maximilian Connor Scholz.

Anexo 3. Correlación obtenida para el material experimental “Kali3”



Fuente: Tomado de “Entwicklung von Korrelationen zur Ermittlung des Verflüssigungswiderstandes von Sand in Tagebau-Restseeboschungen auf der Basis von Drucksondierungen” por Maximilian Connor Scholz.

Anexo 4. Ficha técnica del piezocono CPTu utilizado para realizar las pruebas

A.P. van den Berg Machinefabriek b.v. tel. :0513-631355 fax. :0513-631212	Geradheitstoleranz + MINIMALE ABMESSUNG Kegel, Reibungsmantel und Gewindeausschussteil	Richtlinien: NEN 3680 NEN 5140 APB Richtlinie
Spitze Typ: Durchmesser des Kegels: (gemäss NEN 5140) Durchmesser der Reibungsmantel: Kegel: (Produktionsmass) Mantel (C-Spitze): Reibungsmantel (Cf-Spitze): Kegel für gebrauchte Spitze: Minimale Durchmesser Mantel: (C-cone) Minimale Durchmesser Reibungsmantel: (Cf-Spitze) Benutz Kegel bei "benutzte Spitze": Minimale Durchmesser von Gewinde Adapter: Höhemass Kante Kegel: Maximale Geradheitstoleranz:	10 cm^2 $35,3 \leq d_1 \leq 36,0$ $d_1 \leq d_2 < d_1 + 0,35$ $d_1 = 35,7 \begin{matrix} +0,2 \\ 0 \end{matrix}$ $d_2 = 35,7 \begin{matrix} +0,2 \\ 0 \end{matrix}$ $d_2 = 35,9 \begin{matrix} +0,1 \\ 0 \end{matrix}$ $d_1 = 35,5 \begin{matrix} +0,1 \\ 0 \end{matrix}$ $d_2 = 35,2$ (APB Richtlinie) $d_2 = 35,3$ $d_2 \leq 35,65$ $d = 35,3$ $7 \leq h_e \leq 10$ 1 mm auf einer Länge von 1000 mm (max. Schwingung 1,0 mm.)	

Fuente: Tomado de "Entwicklung von Korrelationen zur Ermittlung des Verflüssigungswiderstandes von Sand in Tagebau-Restseeboschungen auf der Basis von Drucksondierungen" por Maximilian Connor Scholz.

Referencias Bibliográficas

- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). Código de cimentaciones de Costa Rica. (3). San José, Costa Rica.
- ASTM D5778-12. (Enero de 2012). Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.
- Braja Das, M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. CENGAGE Learning.
- Butlanska, J. (13 de Mayo de 2014). CONE PENETRATION TEST IN A VIRTUAL CALIBRATION CHAMBER. Barcelona, España.
- Castro, S. M. (22 de Abril de 1991). Licuefacción de los suelos, típica de zonas con depósitos arenosos. Limón, Costa Rica.
- D. R., & A. T. (2015). *3rd Ishihara Lecture: An investigation into why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice*.
- DIN 4094-1. (2002). Felduntersuchungen, Teil1: Drucksondierungen. Alemania.
- Endesa S.A. (2011). *Endesa*. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/proyectos/a201610-mineria-restauracion-minera.html>
- Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik E.V. (1998). *DGEB*. Recuperado el Octubre de 2017, de <http://www.dgeb.eu/Home>
- Guzmán, A. A. (1987). Mecanismos de licuación y flujo de suelos granulares durante sismos. Bogotá, Colombia.
- HUAI, H. H., & HUANG, B. A. (1999). *Calibration of Cone Penetration Test in Sand*. Taiwan.
- Idriss, M., & Boulanger, W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. California.
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science Publications.
- Jamiolkowski, M., Ghionna, v., Lancellotta, R., & Pasqualini, E. (1988). *New correlations of penetration test for design practice*. Rotterdam.
- Kimmig, I. (2 de Noviembre de 2017). Realización de correlaciones entre CPTu y CRR. (S. Rodríguez, Entrevistador)
- Krammer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*.
- Liao, S., & Whitman, R. (1986). Catalogue of liquefaction and non-liquefaction occurrences during earthquakes. Massachusetts.
- Moreno, C. V. (2015). Análisis de licuación de arenas mediante el empleo de métodos de campo, análisis de respuesta de sitio y modelos numéricos de generación de presión de poro. México DF.
- Núñez, J. G. (2007). *Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco (Colombia)*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Parkin, K. (1988). *The calibration of cone penetrometers*. Orlando.
- R. P., & C. K. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Recuperado el Octubre de 2017, de www.greggdrilling.com
- Rincón, A. L. (2014). Determinación del Comportamiento de Licuación por Flujo de la Arena del Depósito Cuaternario del Municipio de Paipa Mediante Ensayos Triaxiales No Drenados.
- RWE AG. (Octubre de 2017). *RWE Corporate Website*. Obtenido de <http://www.rwe.com/>
- S. T., & T. W. (1988). *Teparaksa. Evaluation of liquefaction potential of soils using cone penetration tests*.
- Salas, O. V. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. San José.
- Sandoval, E., & Pando, M. (2012). Influencia del origen y la mineralogía de las arenas en la resistencia a licuación.
- Scholz, M. C. (2017). *Entwicklung von Korrelationen zur Ermittlung des Verflüssigungswiderstandes von Sand in Tagebau-Restseeboschungen auf der Basis von Drucksondierungen*. Tesis Licenciatura, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe.
- SciELO. (2012). *scientific electronic library online*. Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-35922014000100009
- Seed, B., & Idriss, M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.
- T. T. (2013). *Arbeitsblätter für Bodenmechanik*. IBF.

- Trillos, G. D. (2011). *Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU*. Trabajo de grado, Bogotá.
- W. T. (11 de Noviembre de 2017). Avances del informe de práctica profesional en el IBF. (S. Rodríguez, Entrevistador)
- W. T., & K. I. (10 de Noviembre de 2017). Avances en resultados de la práctica profesional en el IBF. (S. Rodríguez, Entrevistador)
- W. T., & T. T. (2012). Behavior of granular soils under environmentally induced cyclic loads.
- W. T., & T. T. (2017). *Aufstellung einer Korrelation zwischen dem Spitzendruck aus Drucksondierungen und dem Verflüssigungswiderstand eines Tagebau-Kippenbodens - Vergleich von Drucksondierungen in der Kalibrationskammer mit undranierten zyklischen Triaxialversuchen*. Informe de labores 5, IBF KIT, Karlsruhe.
- Youd, L., Idriss, M., Andrus, R., Arango, I., Castro, G., Christian, J., . . . Mitchell. (2001). LIQUEFACTION RESISTANCE OF SOILS: SUMMARY REPORT FROM THE 1996 NCEER AND 1998 NCEER/NSF WORKSHOPS ON EVALUATION OF LIQUEFACTION RESISTANCE OF SOILS.

Índice de figuras

Resumen ejecutivo

Figura 1. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función de resistencia en punta q_c . Fuente: (Dorby & Abdoun, 2015).....	2
Figura 2. Curvas granulométricas de los materiales experimentales. Fuente: (Wichtmann & Kimmig, 2017)...	3
Figura 3. Esquema de la cámara de calibración del IBF. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).	3
Figura 4. Estado de esfuerzos en el ensayo triaxial cíclico. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).....	4
Figura 5. Correlación entre la resistencia a licuefacción CRR para falla después de $N_f = 10$ ciclos y la resistencia en punta máxima normalizada $q_{c1} = q_c$ ($p' = 100$ kPa) para el material experimental "Kali4". Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	4
Figura 6. Comparación de la correlación CRR – q_{c1} para el material experimental "Kali4" con trabajos previos del IBF y con correlaciones presentes en la literatura para depósitos de arenas de origen natural. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	5

Capítulo I

Figura 1.1. Zonas de extracción de carbón en Alemania. Fuente: (SciELO, 2012).....	9
Figura 1.2. Excavadora utilizada en los procesos de extracción de carbón. Fuente: (RWE AG, 2017).	9
Figura 1.3. Reutilización de fosas explotadas en minería. Fuente: (Endesa S.A., 2011)	10
Figura 1.4. Mapa sísmico de Alemania. Fuente: (Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik E.V., 1998).	10
Figura 1.5. Efectos de licuación de suelos por el terremoto de Limón en 1991. Fuente: (Castro, 1991).	11
Figura 1.6. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR y la velocidad V_{s1} de la onda cortante en función de la fracción de grano fino del suelo. Fuente: (Dorby & Abdoun, 2015).	12
Figura 1.7. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función del número de impactos SPT $(N_1)_{60}$. Fuente: (Dorby & Abdoun, 2015).....	12
Figura 1.8. Relación entre la resistencia a licuefacción CRR en función de resistencia en punta q_c . Fuente: (Dorby & Abdoun, 2015).	12

Capítulo II

Figura 2.1. Esquema de elemento de suelo sometido a tensiones cíclicas. Fuente: (Núñez, 2007).	14
Figura 2.2. Esquema idealizado del suelo de mezcla trifásica para una unidad cúbica. Fuente: (Braja Das, 2015).....	15
Figura 2.3. Ensayos de penetración in situ más comunes. Fuente: (Trillos, 2011).	16
Figura 2.4. Terminología de un penetrómetro de piezocono. Fuente: (ASTM D5778-12, 2012).	17
Figura 2.5. Esquema de la cámara de calibración del IBF. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).....	18
Figura 2.6. Densidad de almacenamiento en función de la resistencia máxima q_c para arenas con $C_u \leq 3$ sin agua subterránea. Fuente: (DIN 4094-1, 2002).	20

Figura 2.7. Densidad de almacenamiento en función de la resistencia máxima q_c para mezclas de arena y grava sin agua subterránea. Fuente: (DIN 4094-1, 2002).	20
Figura 2.8. Correlación entre la resistencia máxima y el ángulo de fricción para arenas con $C_u \leq 3$. Fuente: (DIN 4094-1, 2002).	20
Figura 2.9. Estado de esfuerzos en el ensayo triaxial cíclico. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).	21
Figura 2.10. Relación de vacíos crítica. Fuente: (Krammer, 1996).	22
Figura 2.11. Parámetro de estado. Fuente: (Krammer, 1996).	22
Figura 2.12. Esquema de relación de esfuerzo cíclico. Fuente: (Moreno, 2015).	23
Figura 2.13. Valores del factor de reducción según la profundidad. Fuente: (Youd, y otros, 2001).	23
Figura 2.14. Curvas granulométricas de los materiales experimentales. Fuente: (Wichtmann & Kimmig, 2017).	24
Figura 2.15. Comparación de la nueva correlación CRR – q_{c1} para el material experimental Kali1 con correlaciones obtenidas de la literatura. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).	26
Figura 2.16. Comparación de la nueva correlación CRR – q_{c1} para el material experimental Kali1, Kali2 y Kali3 con correlaciones obtenidas de la literatura. Fuente: (Scholz, 2017).	26

Capítulo III

Figura 3.1. Corrección de humedad del material utilizado en los ensayos. Fuente: IBF.	28
Figura 3.2. Cámara de calibración en el sótano del IBF. Fuente: IBF.	29
Figura 3.3. Cámara de calibración en el sótano del IBF. Fuente: IBF.	29
Figura 3.4. Instalación de la muestra en la CC del IBF. Fuente: IBF.	29
Figura 3.5. Instalación de la muestra en la CC del IBF. Fuente: IBF.	30
Figura 3.6. Ejecución del CPTu en la CC del IBF. Fuente: IBF.	30
Figura 3.7. Equipo hidráulico y PC utilizados con el ensayo CPTu en el IBF. Fuente: IBF.	30
Figura 3.8. Superficie de la muestra en la CC después del ensayo 10. Fuente: IBF.	31
Figura 3.9. Superficie de la muestra en la CC después del ensayo 6. Fuente: IBF.	31
Figura 3.10. Posiciones del muestreo en la CC después del CPTu. Fuente: (Wichtmann & Triantafyllidis, 2017).	32
Figura 3.11. Posiciones del muestreo para la profundidad de 12 cm. Fuente: IBF.	32
Figura 3.12. Introducción vertical de los cilindros perforadores para el muestreo. Fuente: IBF.	32
Figura 3.13. Posiciones del muestreo para la profundidad de 12 cm. Fuente: IBF.	33
Figura 3.14. Horno para muestras del IBF. Fuente: IBF.	33
Figura 3.15. Esquema del dispositivo utilizado en el ensayo triaxial cíclico no drenado. Fuente: (Wichtman & Triantafyllidis, 2012).	33
Figura 3.16. Placa al pie de la muestra con filtro central y disco de goma. Fuente: IBF.	34
Figura 3.17. Pared de hule del dispositivo. Fuente: IBF.	34
Figura 3.18. Formador de la muestra del dispositivo. Fuente: IBF.	34
Figura 3.19. Marco de caída con embudo de caída para introducir el material húmedo en el formador de la muestra. Fuente: IBF.	35
Figura 3.20. Muestra lista para ensayo. Fuente: IBF.	35
Figura 3.21. Muestra lista para ensayo triaxial cíclico. Fuente: IBF.	35
Figura 3.22. Ensayo triaxial cíclico no drenado. Fuente: IBF.	36

Capítulo IV

Figura 4.1. Resultado del ensayo 1 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 27/6/2017.	40
Figura 4.2. Resultado del ensayo 2 (Presión isotrópica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 3/7/2017.	41

Figura 4.3. Resultado del ensayo 3 (Presión isotrónica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 18/7/2017.....	41
Figura 4.4. Resultado del ensayo 4 (Presión isotrónica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 26/7/2017.....	41
Figura 4.5. Resultado del ensayo 5 (Presión isotrónica: 50,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 2/8/2017.....	42
Figura 4.6. Resultado del ensayo 6 (Presión isotrónica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 9/8/2017.....	42
Figura 4.7. Resultado del ensayo 7 (Presión isotrónica: 150,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 16/8/2017.....	42
Figura 4.8. Resultado del ensayo 8 (Presión isotrónica: 200,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 24/8/2017.....	43
Figura 4.9. Resultado del ensayo 9 (Presión isotrónica: 250,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 30/8/2017.....	43
Figura 4.10. Resultado del ensayo 10 (Presión isotrónica: 100,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 5/9/2017.....	43
Figura 4.11. Resultado del ensayo 11 (Presión isotrónica: 0,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 18/9/2017.....	44
Figura 4.12. Resultado del ensayo 12 (Presión anisotrópica: 75,0; 37,5 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 19/9/2017.....	44
Figura 4.13. Resultado del ensayo 13 (Presión anisotrópica: 150,0; 75,0 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 21/9/2017.....	44
Figura 4.14. Resultado del ensayo 14 (Presión anisotrópica: 225,0; 112,5 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Obtenido en el IBF el día 26/9/2017.....	45
Figura 4.15. Densidad relativa de almacenamiento en función resistencia en punta qc en los ensayos en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	45
Figura 4.16. Resultado de la prueba 1 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	46
Figura 4.17. Resultado de la prueba 2 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	46
Figura 4.18. Resultado de la prueba 3 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	46
Figura 4.19. Resultado de la prueba 4 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	46
Figura 4.20. Resultado de la prueba 5 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	47
Figura 4.21. Resultado de la prueba 6 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	47
Figura 4.22. Resultado de la prueba 7 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	47
Figura 4.23. Resultado de la prueba 8 (Presión 100 kPa) sobre el material “Kali4”. Fuente: Elaborado en el IBF.....	47
Figura 4.24. Relación de esfuerzos cíclicos CSR para licuefacción en 10 ciclos (CRR de resistencia a licuefacción) en función de la densidad relativa de almacenamiento inicial ID el material experimental “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	48
Figura 4.25. Correlación entre la resistencia a la licuefacción CRR para falla después de Nf = 10 ciclos y la resistencia en punta máxima normalizada qc1 = qc (p´= 100 kPa) para el material experimental “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	49
Figura 4.26. Comparación de la correlación CRR – qc1 para el material experimental Kali4 y trabajos previos con correlaciones presentes en la literatura para depósitos de arenas de origen natural. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	50

Figura 4.27. Resistencia en punta q_c en función de la densidad relativa de almacenamiento en los ensayos para una presión de 100 kPa en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	52
Figura 4.28. Relación de la resistencia en punta q_c en función de las presiones isotrópicas promedio (pruebas 3,5,7,8,9) y anisotrópicas promedio (pruebas 12,13,14) sobre el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	56
Figura 4.29. Resistencia en punta q_c en función de las presiones isotrópicas (pruebas 3,5,7,8,9) y anisotrópicas (pruebas 12,13,14) sobre el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	56
Figura 4.30. Resistencia en punta q_c corregido por una densidad $I_{Dm} = 0,57$ en función de las presiones isotrópicas (3,5,7,8,9) y anisotrópicas (12,13,14) sobre el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	56
Figura 4.31. Resistencia en punta normalizada $q_c / q_c (p = 100 \text{ kPa})$ en función de la presión en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	58
Figura 4.32. Línea de mejor ajuste para el factor de normalización CN. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	58
Figura 4.33. Densidad relativa de almacenamiento en función resistencia en punta q_c en los ensayos en la CC para el material “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.	58
Figura 4.34. Relación de esfuerzos cíclicos CSR en función del número de ciclos para la licuefacción en el material experimental “Kali4”. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.	60
Figura 4.35. Comparación de resultados provenientes de materiales experimentales en la cámara de calibración del IBF. Fuente: Diagrama elaborado en Microsoft Excel por el autor.....	62

Apéndices

Apéndice 1. Programación de ensayos CPTu realizados.....	67
Apéndice 2. Documento empleado por el personal de laboratorio para la recolección de datos y registro de trabajos complementarias al CPTu en la cámara de calibración.	68
Apéndice 3. Curva de mejor ajuste al comportamiento de la resistencia en punta q_c en función de la presión p.	83

Anexos

Anexo 1. Correlación obtenida para el material experimental “Kali1”	84
Anexo 2. Correlación obtenida para el material experimental “Kali2”	85
Anexo 3. Correlación obtenida para el material experimental “Kali3”	86
Anexo 4. Ficha técnica del piezocono CPTu utilizado para realizar las pruebas	87

Índice de cuadros

Cuadro 2.1. Descripción de las densidades de almacenamiento de suelos. Fuente: (Triantafyllidis , 2013)...	15
Cuadro 2.2. Relación entre la resistencia en punta del CPTu y la densidad en arenas uniformes, húmedas y de grano fino -medio. Fuente: (Triantafyllidis , 2013).	20
Cuadro 2.3. Propiedades físicas - mecánicas de los materiales de experimentales. Fuente: (Kimmig, 2017).	24
CUADRO 4.1 RESUMEN DE RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO CPTu EN LA CÁMARA DE CALIBRACIÓN DEL IBF	53
CUADRO 4.2. RESUMEN DE DESVIACIONES ESTÁNDAR EN LOS RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO CPTu PARA MUESTRAS DEL MATERIAL “KALI4”	54
CUADRO 4.3. RESUMEN DE RESULTADOS PROVENIENTES DEL ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO NO DRENADO EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL “KALI4”	60